TÜRKİYE CUMHURİYETİ'NİN YÜZÜNCÜ YILI

İnşaat Muhendisliğinde Özel Konular

Editör
Mustafa Aytekin

BİDGE

BİDGE Yayınları

İnşaat Mühendisliğinde Özel Konular

Editör: Prof. Dr. Mustafa Aytekin

ISBN: 978-625-372-437-5

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 25.12.2024
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İçindekiler

Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği 5

Esin ACAR 5

Geoteknik Mühendisliğinde İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Tekrar Kullanımı 32

Mehmet ALPYÜRÜR 32

Bir Otoyol Köprüsünün Hasar Görebilirlik Analizi 55

Zeynep YILMAZ 55

Murat Serdar KIRÇIL 55

Ulaştırma yapılarında kullanılacak Betonların Basınç Dayanımına Kimyasal ve Mineral Katkı Maddelerinin Etkisinin İstatistiksel Yöntemlerle Belirlenmesi 73

Üsame EKİCİ 73

Mars Yapılarında Özel Tasarım Yükleri 108

Saffet KILIÇER 108

Atık Lastiklerin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı 134

Mehmet ALPYÜRÜR 134

Kıyıboyu Kum Taşınımının Parametrik ve Derin Makine Öğrenimi bir Yöntemle İncelenmesi 157

Mehmet SANDALCI 157

Karbon Elyaf Katkısının Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi 181

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU 181

Mustafa AKPOLAT 181

Merve Gülfer BOZDEMİR 181

Ayşe BURAL 181

Kesik Ve Yoğun Gradasyonlu Asfalt Karışım Tasarımı: İlkeler Ve Farklılıklar 215
Nimet İNKAYA 215
Taş Mastik Asfalt Karışımlar Sürüş Güvenliğini Nasıl Arttırmaktadır? 235
Nimet İNKAYA 235
Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Trafik Üzerindeki Etkisinin Bibliyometrik Analizi 259
Özlem BATTAL ŞAL 259
Sahla Alarshi 259
Blokzincir Teknolojisinin Akıllı Otopark Sistemlerinde Kullanılabilirliği 288
Özlem BATTAL ŞAL 288
Kentsel Altyapı Sistemlerinde Etkin Su Kayıp Yönetimi için Aktif Sızıntı Kontrolü: Temel Kavramlar ve Kazanımlar 313
Cansu BOZKURT 313
Mahmut FIRAT 313
Malzemelerdeki Gözenekliliğin Ses Yutuculuk Performansı Üzerine Bir İnceleme 335
Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU 335

BÖLÜM I

Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği

Esin ACAR[1]

Giriş

Akarsu, boru içi ya da kanal akışlarında, tabanlarında oluşan sediment birikimi özellikle atıksular gibi akışın devam ettiği boru hatlarında zamanla birikerek tortu oluşturmaktadır. Oluşan bu tortular boru içi ya da kanal içi akışının kesit alanının daraltmakta ve kapasitesini düşürmektedir. Tabanda biriken bu tortu oluşumuna sediment adı verilmektedir. Bu kapsamdaki çalışmalara da hareketli tabanlı akımların hidroliği denilmektedir. Sediment yapısı itibariyle farklı taşınım şekillerine sahiptir ve bu katı madde taneleri tabanda yuvarlanma, sıçrama ve kayma harektinde bulunurlar. Katı maddenin yapısı gereği ve akış özelliklerine göre de askıda kalma durumu da söz konusudur. Askı maddeleri türbülanslı bir akıma

[1] Öğr. Gör. Dr., Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin/Türkiye, Orcid: 000-0002-3926-2804, esinacar@hotmail.com.tr

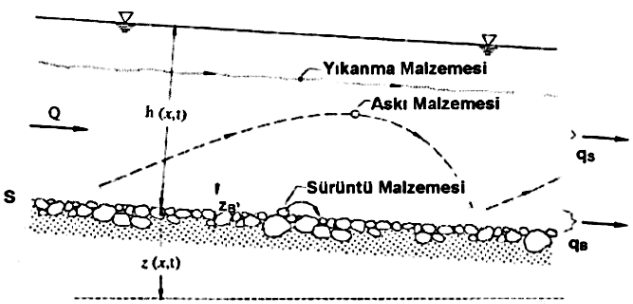
sahip olup, daha çok kum silt gibi ince malzemelerden oluşmaktadır. Çalışmada sürüntü maddelerinin hareketi incelenerek, kritik kayma gerilmesi hesapları ile katı maddelerin tane özellikleri konusunda yapılan çalışmalar ile kullanılan formüller verilmiştir.

1. Sediment Taşınımı

Katı madde taşınımında dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan birisi, sediment yatağının oluşmasını engellemektir. Sedimentlerin taşınması için gerekli olan bir akışkan hızına ihtiyaç bulunmakta olup bu akışkan hızı kritik akışkan hızı olarak ifade edilmektedir. Eğer akışkan hızı kritik akışkan hızından küçükse, sedimentler taşınamamakta ve sediment yatağı oluşmaktadır. Sediment yatağının oluşumu, yük kaybı, borunun tıkanması gibi problemlere yol açmaktadır (Sorgun & Ülker, 2016).

1.1. Sedimentin Taşınım Şekilleri

Akarsuda hareket eden katı madde taneleri orjinlerine göre yatak malzemesi ve yıkanma malzemesi olarak sınıflandırıldığı gibi taşınım şekillerine göre de sınıflandırılabilir (Şekil 1) (Bayazıt & Avcı, 2010)



Şekil 1: Sediment tanelerinin akarsularda taşınım şekillleri

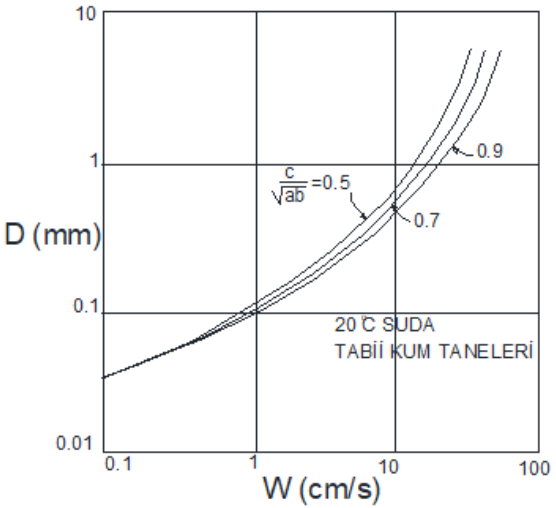
Kaynak: (Bayazıt & Avcı, 2010; Graf, 1998)

Akarsuda yatak kayma gerilmesinin (hızın, debinin) artışıyla bir noktadan sonra yataktaki bazı taneler kısa süreli olarak titreşmeye başlar, fakat hareket etmezler. Akımın şiddeti biraz daha artınca akıma en çok açık olan taneler en büyük kuvvetlerin etkisinde kaldıkları için yerlerinden sökülür. Ne zaman başladığının kesin olarak belirlenmesi güç olan bu duruma yatakta hareketin başlaması ya da kritik durum (initiation of motion, incipient motion, threshold of motion, criticial stage) adı verilir. Akımın şiddeti daha da arttırılırsa yataktaki bazı taneler yatak üzerinde sürüklenerek, kayarak ya da yuvarlanarak ilerlemeye başlar. Buna sürüntü hareketi (bed load transport) denir. Sürüntü hareketi yapan taneler daima yatakla temas halinde olduklarından ağırlıkları yatak tarafından taşınır. Taneler uzun duraklama süreleri ile bölünen kısa süreli adımlar atarak ilerlediklerinden ortalama hızları akımın yatak yakınındaki hızına göre çok daha küçüktür. Akım koşullarının daha da şiddetlenmesi halinde yataktaki bazı taneler yataktan sökülünce uzun bir süre su ortamı içinde taşınırlar. Buna askı hareketi (suspended load transport) denir. Askı hareketi genellikle yataktan sıçrayan tanelerin yeterli büyüklükte (tane çapından büyük boyutta) türbülans çevrilerinin bulunduğu bölgeye girmeleriyle oluşur. Ancak bazı taneler türbülanslı patlama (bursting) olayı sırasında çevriler tarafından yataktan koparılarak askı haline geçebilirler. Tanenin askı halinde taşınabilmesi için yukarıya yönelmiş türbülans çalkantı hızın tanenin suda çökelme hızından büyük olması gerekir. Böylece sudan daha ağır olan tanelerin yerçekimi ile çökelmesi türbülans hız çalkantılarının uyguladığı kuvvetlerle dengelenmiş olur (Bayazıt & Avcı, 2010).

1.2 Tane Biçimi

Tanenin biçimi genellikle "küresellik" ile ifade edilir. Küresellik tane ile aynı hacimdeki kürenin alanının oranıdır. Bir tanenin biçimi meydana geldiği kayanın özelliklerine bağlıdır. Taneler akarsu tarafından zamanla daha yuvarlak hale getirilirlerse de ilk biçim tamamıyla kaybolmaz. Yaklaşık olarak elipsoid gibi kabul edebileceğimiz bir tanenin asal eksen uzunluklarının büyükten küçüğe doğru a, b, c ile gösterirsek, D_n aynı hacimli kürenin çapı (nominal çap) olmak üzere tabiattaki taneler için ortalama değerler olarak a=1,39 D_n, b=1,05 D_n, c=0,72 D_n verilebilir. Buna göre küreselliğin ortalama değeri 0,75 dir. Tanenin çökelme hızını karakterize etmek bakımından $\frac{c}{\sqrt{ab}}$ şeklinde bir biçim faktörü tanımlamak uygun olur. Bu faktörün değeri genellikle 0,5-0,7 arasında değişir (Bayazıt, 1971).

Tabii kum tanelerinin çökelme hızı daha önce tanımlanan $\frac{c}{\sqrt{a.b}}$ biçim faktörüne bağlı olarak Şekil 2'de verilmiştir (Bayazıt, 1971).



Şekil 2: Çeşitli biçim faktörleri olan tabii kum tanelerinin su içinde çökelme hızları

Kaynak: (Bayazıt, 1971)

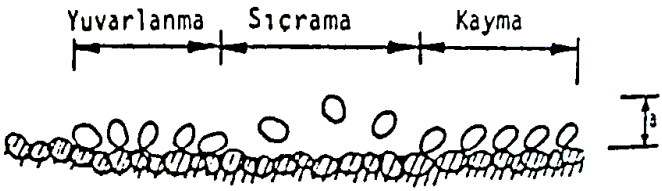
2. Katı Maddenin Hareket Şekilleri

Katı madde akarsu ve açık kanallarda iki şekilde hareket edebilir (Sümer & ark., 1983):

a) taban hareketi, b)askı hareketi.

2.1.Taban Hareketi

Daha çok iri kum ve çakıl gibi ağır malzeme bu hareketi yapar. Taban hareketi yapan taneler teker teker gözlendiğinde, bunların taban üzerinde bazen yuvarlanarak, bazen kayarak, bazen de sıçrayarak hareket ettikleri görülür (Şekil 3.).

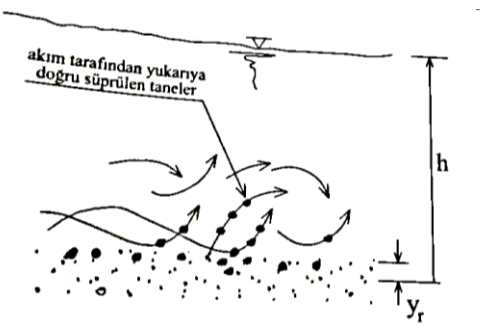


Şekil 3: Taban hareketleri

Kaynak: (Sümer & ark., 1983)

2.2 Askı Hareketi

Bu hareketi daha çok, ince kum ve silt gibi daha hafif malzeme yapar. Akım türbülanslıdır; o halde akım içerisindeki herhangi bir noktada hızın düşey bileşeni sıfır etrafında titreşmektedir. Yukarı doğru yönlenmiş hız bileşeninin mevcudiyeti, o anda o noktada yukarı doğru hareket eden bir su kütlesinin bulunduğunu gösterir. Bu su kütlesi beraberinde ince katı maddeyi de yukarı doğru taşır. Bu tesir, ince katı maddenin akımın içerisinde taşınmasına sebep olur. Katı maddenin bu hareketine askı hareketi diyoruz (Şekil 4). Askı hareketi yapan katı maddeye askı malzemesi denir (Sümer & ark., 1983):



Şekil 4: Türbülanslı akımda tanelerin askı haline geçmesi

Kaynak: (Yüksel, 2014)

Akarsu ve kanallarda taşınan katı madde, büyüklüklerine göre şu sınıflara ayrılır (Tablo 1).

Tablo 1: Katı maddelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması

Kaya	> 250 mm
İritaş	250 mm- 60 mm
Çakıl	60 mm- 2 mm
Kaba kum	2 mm- 0.5 mm
Orta kum	0.5 mm- 0.25 mm
İnce kum	0.25 mm- 0.06 mm
Silt	0.06 mm- 0.004 mm
Kil	> 0.004 mm

Kaynak: (Sümer & ark., 1983)

ifadeleri yazılabilir. Katı madde taşınımı açısından en önemli sınıflar kum ile, çakılın 2-20 mm aralığıdır.

Yüksek Reynolds sayılarında tane viskoz alt tabakanın dışına çıkar, tane yakınında akım çizgileri yer değiştirir, tanenin arkasında ayrılma oluşur. Ayrılma bölgesinin büyüklüğü sınır tabakasının ayrılma noktasına bağlı olup tanenin biçimi ve Reynolds sayısı ile ilgilidir. Ayrılma sonunda tanenin önünde ve arkasında basıncın farklı değerler almasıyla taneyi akım yönünde hareket ettirmeye çalışan bir kuvvet doğar. F_D sürükleme kuvveti yüzeysel direnç (sürtünme) ve biçim direnci (basınç) bileşenlerinden oluşur (Bayazıt, 2010).

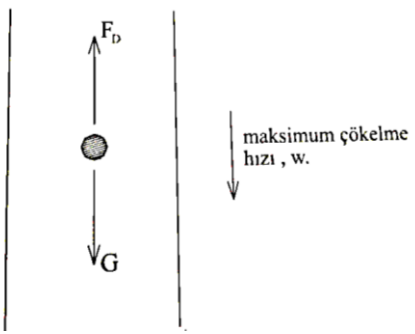
Eğer tane tabandan yukarıya doğru fırlarsa ve askı haline geçerse taneyi yukarıya doğru hareket etmesini sağlayan bir kuvvet etkimektedir. Tanenin askı halinde kalabilmesi için yukarıya doğru yönelmiş olan bu kuvvetin, tanenin ağırlık kuvvetini yenecek büyüklükte olması gerekir. Düşey bir silindirin içinde askı halinde bir tane düşünelim (Şekil 5) ve akışkan statik halde bulunsun, bu taktirde tanenin kendi ağırlığının etkisinde çökelmeye başlar ($\rho_s > \rho$) ve bir limit hıza (w) kadar hızlanır, bu hızda tanenin ağırlığı yukarı doğru etkili olan kuvvete eşit olacaktır, yukarıya doğru etkili kuvvet hidrodinamik kaldırma kuvveti (F_L) olarak adlandırılır. Bu kuvvet (Yüksel, 2014);

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho A_s w^2$$

ifadesiyle verilir, burada A_s, tanenin alanıdır. O halde, $G=F_L$

$$(\rho_s - \rho) g V_s = C_L \frac{1}{2} \rho A_s w^2$$

yazılır. Burada ise V_s tanenin hacmini göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5: Çökelen bir taneye etkili kuvvetler

Kaynak: (Yüksel, 2014)

Eğer silindirin içinde yukarıya doğru yönelmiş bir akış söz konusu ise v>w tane yukarıya doğru hareket eder.

Küresel bir tane için, yukarıda verilen eşitlikten çökelme hızı,

$$w = \sqrt{\frac{4\Delta g d}{3C_L}}$$

burada $\Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}$ ve C_L hidrodinamik kaldırma katsayısıdır, bu katsayı $Re = \frac{wd}{\nu}$ ve tane şekline bağımlıdır.

Re<1 ise C_L=24/Re ve

$$w = \frac{\Delta g d^2}{18\nu} \text{(Stokes bağ.)}$$

Re>1 ise C_L'nin değişimi Şekil 6'da gösterilen grafik ile verilmiştir. Buradaki şekil faktörü = $\frac{c}{\sqrt{ab}}$'ünde c; birbirine dik tane boyutlarından en kısasını göstermektedir (Yüksel, 2014).

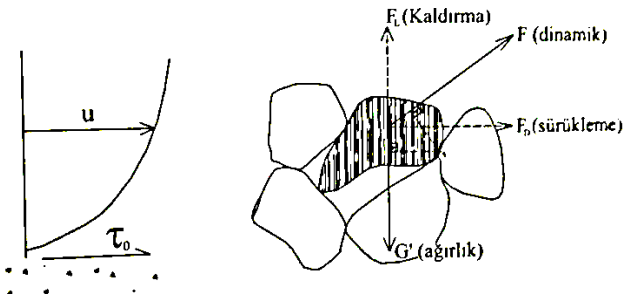
Sürükleme kuvveti viskoz etkilerden ve tanenin arkasında sınır tabakasının ayrılmasından doğar. Yatak yakınında akım laminer ise kuvvet sadece viskoziteye bağlıdır, viskoz alt tabaka taneyi tamamen örterse ($u_* D/\nu \leq 5$) bu durum görülür, tanenin arkasında sınır tabakası ayrılmaz, sürükleme kuvveti tanenin akımla temas eden sürtünme kuvvetinden oluşur. Yüksek Reynolds sayılarında tane viskoz alt tabakanın dışına çıkar, tane yakınında akım çizgileri yer değiştirir, tanenin arkasında ayrılma oluşur. Ayrılma sonunda tanenin önünde ve arkasında basıncın farklı değerler almasıyla taneyi akım yönünde hareket ettirmeye çalışan bir kuvvet doğar. F_D sürükleme kuvveti

yüzeysel direnç (sürtünme) ve biçim direnci (basınç) bileşenlerinden oluşur (Bayazıt &Avcı, 2010).

Durgun bir akışkan içerisinde V hızı ile hareket eden bir cisme, harekete ters yönde bir kuvvet gelir. Bu kuvvete, cisme gelen direnç kuvveti denir (Şekil 6) (Sümer & ark., 1983).

Sürükleme kuvveti,

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho A w^2$$

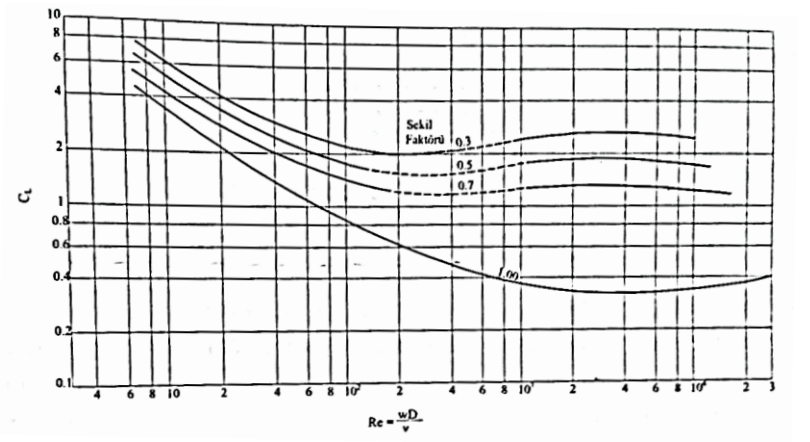


(a) *(b)*

Şekil 6: Taban hareketine neden olan akışkan kuvvetleri, a) Taban kayma gerilmesi, b) Bir taneye etkili kuvvetler

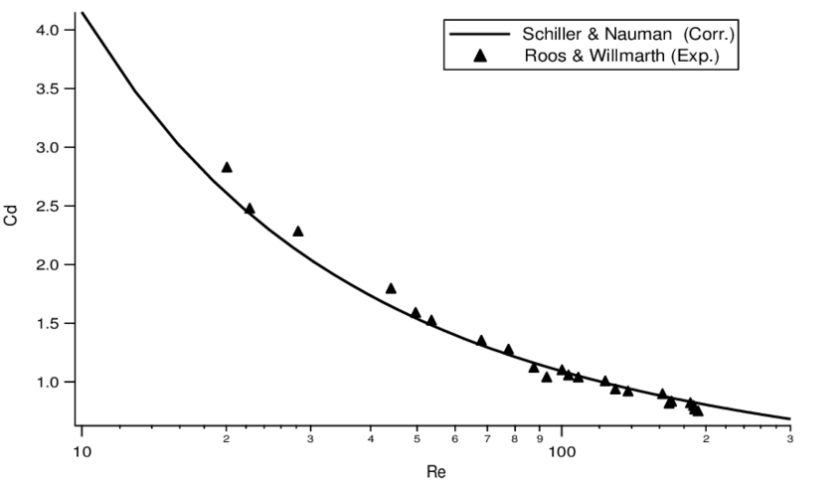
Kaynak: (Yüksel, 2014)

Burada C_D ve C_L sürükleme ve kaldırma katsayıları (Şekil 7 ve Şekil 8), u tanenin yakınında akım hızı, A tanenin akıma dik izdüşümünün alanıdır (Bayazıt &Avcı, 2010). Daneyi etkileyen kuvvetlerden ağırlığın akım doğrultusuna dik bileşeni daneyi yerinde tutmaya, kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve ağırlığın akım doğrultusundaki bileşeni ise daneyi harekete geçirmeye çalışmaktadır (Öcal, 2007; Güngör, 1997).



Şekil 7: Reynolds sayısına ve farklı şekil faktörlerine bağımlı C_L kaldırma katsayısı

Kaynak: (Yüksel, 2014)



Şekil 8: Schiller & Naumann'ın sürtünme katsayısı (CD) için ampirik korelasyon ve Roos & Willmarth'ın deneysel sonuçları

Kaynak: (Kaufmann, 2004; Schiller & Nauman, 1935, Roos & Wilmarth, 1971)

Danelerin harekete geçtiği durum veya sınır sürükleme gerilmesinin tespiti için laboratuvarlarda birçok araştırma yapılmış zeminin cins ve danelerine göre pratikte çalışan mühendislerin kullanabilecekleri tablolar tanzim edilmiştir. Krey' e göre sınır sürükleme gerilmesi için (Çeçen, 1982),

$\tau_{kr} = 0{,}076\ (\gamma_s - \gamma).d$ (kg/m^2)

γ_s: danenin özgül ağırlığı (kg/m^3)

d: süründü maddesi dane çapı (m)

γ : Suyun özgül ağırlığı (kg/m^3)

formülü d>0,006 (m) için uygundur.

0,006<d<0,003 (m) arasında

$\tau_{kr} = 0{,}000285\ (\gamma_s - \gamma).d^{\frac{1}{3}}$ (kg/m^2)

şeklinde yazmak gerekir.

3. Süründü Maddesi Hareketi ve Debisi

Süründü maddesi hareketi ve dolayısıyla debisini veren formüllerin miktarı çoktur. Burada bunların en çok kullanılanlarından kısaca bahsedilecektir (Çeçen, 1982).

Du Boys tarafından verilen formül en eskilerdendir (Boys, 1879):

$$g_{toplam} = \psi\tau_0(\tau_0 - \tau_{kr})$$

Burada $\tau_0 = \gamma RJ$ olarak alınmıştır. $\tau_0 = \tau_{kr}$ oluncaya kadar hareketi durmaktadır. Ψ bir katsayıyı ifade etmekte, g_{toplam} toplam süründü maddelerini göstermektedir.

Meyer-Peter, Müller (1949) tarafından verilen formül ise uzun yıllar değişik malzeme ile yapılan deneylere dayanmaktadır, probleme tesir eden faktörler deneysel yollar ile elde edilmiştir. Meyer-Peter, Müller formülünün bazı kabullerden sonra basitleştirilmiş şekli aşağıdadır (Çeçen, 1982):

$$g'' = 8\left(\frac{g}{\gamma}\right)^{\frac{1}{2}}\left[\gamma h J - 0.047\gamma_S'' d_m\right]^{\frac{3}{2}}$$'dir.

Burada,

g'': Süründü maddesinin, su altında tartıldığı taktirde, birim genişlik için debisi kg/s

g: Yer çekimi ivmesi

γ: Suyun özgül ağırlığı

h: Derinlik

J : Enerji çizgisinin eğimi

γ_S'': Danenin su altındaki özgül ağırlığı $(\gamma_s - \gamma)$

d_m: Danelerin ağırlık bakımından %50'sini geçiren elek çapı.

Meyer-Peter, Müller formülü vahşi dere karakterini haiz olan dereler ve akarsularda ve kısmen de ova akarsularında kullanılır. Nehir rejiminden sel rejimine geçişte süründü maddesi debisi hakiye nazaran küçük değerler verir. İri daneli malzemenin çok az olduğu akarsularda ise kullanılması uygun olmaz. Kalinske (1947) diğerlerine nazaran değişik bir esastan hareket etmekte ve tabandaki daneler üzerine türbülansın tesirini hesaba katmaktadır. Kalinske'den evvel tabandaki kayma gerilmesi sabit olarak alınırdı.

Birçok kabul ve basitleştirmelerden sonra Kalinske formülü (Çeçen, 1982):

$$\frac{g_s}{u_*.d.\gamma_s} = 2.5\theta\left(\frac{\tau_{kr}}{\tau_0}\right)$$

Burada,

$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g.R_s.J_e}$= Kayma gerilmesinin hızı (m/s)

τ_0 : Tabandaki kayma gerilmesi

R_s: Hidrolik yarıçap (etüd edilen tabana tekabül eden)

θ: Türbülans derecesine göre bağıntıyı veren fonksiyon

d: Dane çapı

g_s: Total sürüntü maddesi debisi

γ_s: Malzemenin özgül ağırlığı

Kalinske formülü sürüntü maddesi danelerinin üniform olması halinde iyi sonuçlar vermektedir. Deney kanallarında kullanılır, bazen akarsular için dahi kullanılabilir (Çeçen, 1982).

Einstein (1942) formülü, sürüntü maddesinin yuvarlanma, kayma ve sıçramalar yapma suretiyle yaptığı hareketleri belirtecek şekilde kurulmuştur. Einstein en ince danelerden ibaret olan %10 u kadar malzemeyi hesaba katmamayı teklif etmektedir. Zira bu ince daneler iri danelerin arasında saklı kalmakta ve en küçük akım hızlarında yıkanmakta bu yüzden sürüntü maddesi hareketi bakımından karakteristik değerlere tesirleri olmamaktadır. Tek bir dane alındığı zaman bunun muhtelif hareketler yapması sonunda hangi sabit ortalama mesafeye kadar hareket ettiği

hesaplanmaktadır. Muayyen dane çapını haiz danelerin birim zaman içerisinde tabandaki birim yüzeye çökenlerinin sayısı, dane çapı, dane formu, özgül ağırlık ve akım durumuna bağlıdır. Buna mukabil aynı birim yüzeyden hareket eden belirli çaptaki danelerin sayısı ise bu danelerin çapına ve buradan taşınma ihtimaline tabidir. Türbülans araştırmaları göz önünde tutularak muayyen danelerin taşınma ihtimali olan p için (Çeçen, 1982),

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_*.\psi - \frac{1}{\eta_0}}^{+B_*.\psi - \frac{1}{\eta_0}} e^{-t^2}.dt = \frac{A_* \Phi}{1 + A_* \Phi}$$

vermektedir.

Einstein bu danelerin taşınma derecesini ifade için,

$$\Phi = \frac{q_s}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{gD^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ve hareket derecesi için,

$$\psi = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{D}{R.J_e}$$

formülünü vermiştir. Buna ait değerler (Şekil 9) gösterilmiştir. Kanal tabanının akıma karşı gösterdiği direnç Şekil 10'da verilmiştir.

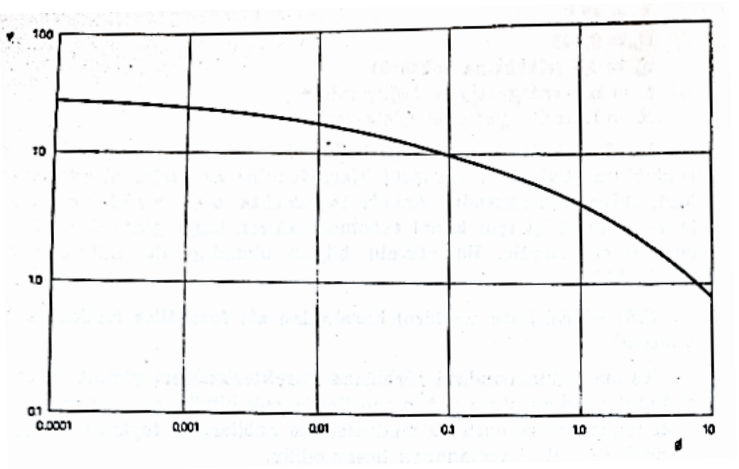
Bu formüllerde,

g_s: Bütün genişlikten geçen sürüntü maddesi debisi

J_e: Enerji çizgisi eğimi

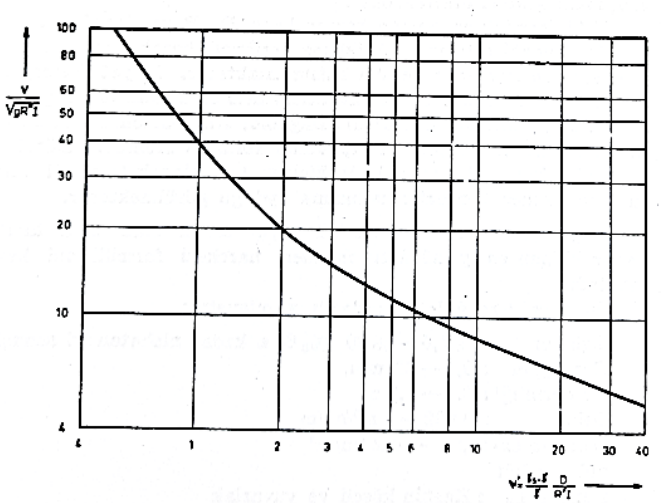
γ: Suyun özgül ağırlığı

γ_s: Sürüntü maddelerinin özgül ağırlığı



Şekil 9: Einstein'e göre sürüntü maddesi fonksiyonu

Kaynak: (Çeçen, 1982)



Şekil 10: Kanal tabanının akıma karşı gösterdiği direnç

Kaynak: (Çeçen, 1982)

$A_* = 43,5$

$B_* = 0,143$

$\eta_0 = 0,5$ (Kaldırma faktörü)

t = Bir entegrasyon değişkenidir

R = Hidrolik yarıçapı göstermektedir.

Bu değeri, R' danelerin pürüzlülüğüne, R' ise tabandaki buruşukluklara (dalgalar, buruşukluklar, dirinler v.s.) tekabül edecek şekilde ikiye ayırmaktadır. Askıda taşınmakta olan maddeler türbülansa tesir ettiği için kanal tabanının akıma karşı gösterdiği dirence tesir etmektedir. Bu etkinin büyük olmadığı da bilinmektedir (Çeçen, 1982).

3.1. Sürüntü Maddesi Hareketine Ait Formüller Hakkında Düşünceler

Taban yakınlarındaki türbülans karakteristikleri sürüntü maddesi hareketleri ile ilgili bütün teorilerde çok büyük rol oynar. Askıdaki maddeler ve sürüntü maddelerinin debilerinin toplamı olan katı maddelerin debisi toplanarak hesap edilir. Eski formüllerin hemen hemen hepsi Du Boys formülü tipindedir. Tabandaki ortalama sürükleme gerilmesi hesaba katılmakta taban etkiyen kuvvetler hesaba katılmamaktadır. Meyer-Peter, Müller formülü tabana etkiyen kuvvetleri hesaba katmasına rağmen yine Du Boys formülü tipindedir. Bagnold, Ning Chien, Selim Yalın'ın araştırmaları ve Meyer-Peter, Müller arasında mütabakat hasıl olmakta ve bu formül türbülansın tam olarak teşekkül etmesi halinde Froude benzerlik kanununa uyduğu görülmektedir. Meyer-Peter,

Müller formülü yayın tarihi olan 1948 tarihine kadar bilinen en iyi süruntü maddesi hareketi formüllerini kapsamaktadır (Çeçen, 1982).

Bu formül aşağıdaki şartlarda yapılmıştır:

Eğimler : %1,5- %20 (%60 a kadar nispeten iyi sonuçlar)

Dane çapı : 0,8-30 mm

Su derinliği : 0,1-1,2 m

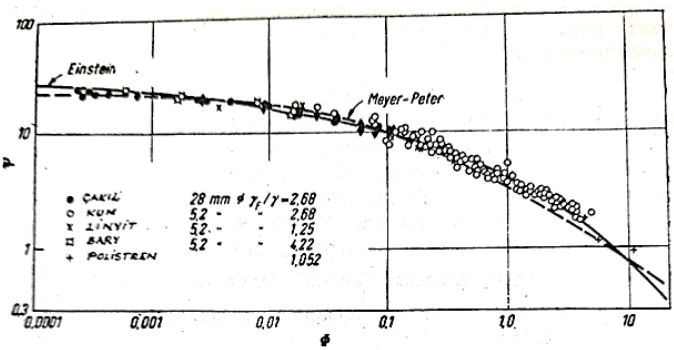
Debi : 0,002-2 m^3/sn/m

Danenin özgül ağırlığı : 1,05 – 4,2 tm/m^3

Dane şekli : Keskin köşeli ve yuvarlak

Einstein formülünü bu şartlar içerisinde kullanmak uygun olur.

Ning Chien, Einstein formülü ile Meyer-Peter, Müller formülü karşılaştırılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: Eşit danelerden ibaret olan yatak malzemesi için Einstein ve Meyer-Peter, Müller formüllerinin Ning Chien tarafından karşılaştırılması

Kaynak: (Çeçen, 1982)

Kalinske'nin formülü Einstein formülüne çok benzemektedir. Fakat eşit danelerden ibaret tabanlarda da daha iyi sonuçlar vermektedir. Einstein formülü ise ince veya orta incelikteki taban malzemesi mevcut olması halinde iyi sonuçlar vermektedir. Buna rağmen eğimi küçük ova akarsularına nazaran daha iyi sonuçlar bu formül ile elde edilmektedir (Çeçen, 1982).

4. Kritik Kayma Gerilmesi

Fiziksel olarak incelediğimiz bu olayın bağlı olduğu kanunu elde etmek için ilk olarak olayı etkileyen değişkenleri belirtmek ve boyut analizini uygulamak gerekir. Olaya giren değişkenler şunlardır (Bayazıt, 1971);

1. Akışkanın özellikleri: γ, ν
2. Taban malzemesinin özellikleri: D, γ_s
3. Akımın özellikleri: τ_0
4. Yerçekimi ivmesi: g

Burada akımı belirleyen büyüklük olarak, eski araştırıcıların yaptığı gibi V ortalama hız değil, τ_0 taban kayma gerilmesi alınmıştır. Gerçekten, V nin kullanılması halinde ayrıca akım derinliğini de göz önüne almak gerekmektedir. Halbuki $\tau_0 = \gamma RS$ akımın tabana etkilediği sürükleyici kuvveti temsil ettiği için daha anlamlı bir büyüklüktür.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}},\ \gamma_s^* = \frac{\gamma_{s-\gamma}}{\gamma}$$

tanımlarını yapacak olursak bağıntısı şu şekli alır:

$$\frac{u_*^2}{\gamma_s^* gD} = fonksiyon\left(\frac{u_* D}{\nu}, \frac{\gamma_S}{\gamma}\right)$$

$\frac{u_* D}{\nu}$ kayma gerilmesi hızı üzerine kurulmuş tane Reynolds sayısı (Re∗), $\frac{u_*^2}{\gamma_s^* gD}$ ise aynı şekilde kurulmuş tane Froude sayısının (Fr∗) karesidir.

5. Katı Madde Tanelerinin Özellikleri

Bir katı madde tanesinin harekete başlaması, akım tarafından taşınması ve yeniden hareketsiz hale geçmesi yalnız akımın değil, aynı zamanda tanenin özelliklerine de bağlıdır. Taneleri kohezyonlu ve kohezyonsuz olarak iki bölüme ayırabiliriz. Kohezyonsuz tanelerin hareketi yalnız ayrık tanelerin özelliklerine (büyüklük, biçim, yoğunluk, konum gibi) bağlı olduğu halde kohezyonlu tanelerin harekete geçmesi taneler arasındaki kohezyon bağı ile ilgilidir. Kum ve çakıl kohezyonsuz, kil ise kohezyonlu taneler bölümüne girerler (Bayazıt, 1971).

5.1. Tanelerin Harekete Başlaması

Yeterince yuvarlak bir tane (küre ve silindir) bir düzlem taban üzerinde yatay bir kuvvetin etkisiyle yuvarlanmaya başlar. Cidarları aşınabilir olmasından dolayı, taneler tam olarak yuvarlak olmayabilir ve yatay olmayan, engebeli tabanlar üzerinde de yer almış olabilirler. Genellikle doğada taneler üniform olmayan boyutlara sahiptirler. Böylece, bir kuvvetin tesir etmesi durumunda, taneler harekete karşı olan tabii dirençleri aşıldığında harekete geçeceklerdir. Taban ile akışkan arakesit düzleminde, akışkan hareketi tanelerin yüzeyinde bir kayma gerilmesinin oluşmasına neden olur. Yapılan deneylerden, kayma gerilmesinin sıfırdan

başlayıp artarak belirli bir değere ulaşması durumunda tanelerin taban üzerinde harekete başladıkları gözlenmiştir. Bu değer hareketin başlangıcı olarak adlandırılmaktadır. Tabanda kayma gerilmesi biraz daha arttırıldığında ince tanelerin akımın içine karışarak askı halinde taşındıkları gözlenir. Eğer akımda bulunan tedirgin edici dinamik kuvvetler (sürtünme kuvveti, kaldırma kuvveti, tane yüzeylerindeki viskoz kuvvetler) kohezyonsuz zeminlerdeki esas stabilite faktörü olan ağırlık kuvvetlerinden büyükse tabanda danelerin dengesi bozulur ve harekete geçerler. Dinamik kuvvet (F) yani hidrodinamik direnç ve hidrodinamik kaldırma kuvveti; τ_0 taban kayma gerilmesi ve d^2 tanenin yüzey alanı ile orantılıdır. Stabiliteyi sağlayan ağırlık kuvveti; $(\rho_s - \rho)gd^3$ ile orantılıdır. Bu kuvvetlerin S dönme noktasına göre momentleri alınırsa aşağıdaki ifade elde edilir (Yüksel, 2014);

$$\alpha_1 \tau_0 \frac{\pi}{4} d^2 \geq \alpha_2 (\rho_s - \rho) g \frac{\pi}{6} d^3$$

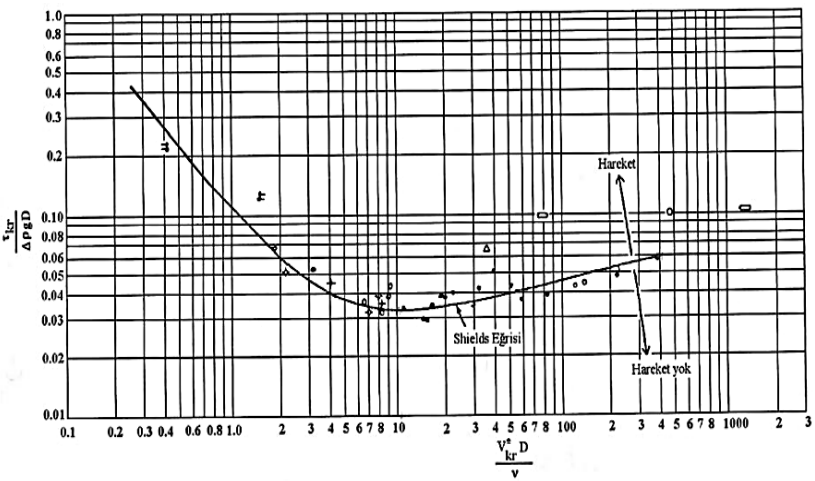
veya,

$$\tau_0 =\geq C(\rho_s - \rho)gd$$

Burada C faktörü taban yakınındaki akım şartlarına, tane şekline, bir tanenin diğer tanelere göre durumuna vs. bağımlıdır. ρ_s ve ρ ise sırasıyla tanelerin ve akışkanın özgül kütleleridir. Taban yakınındaki akım şartları; tane Reynolds sayısına $Re_* = \frac{U_* d}{\nu}$ bağlı olarak değişen (d/δ) tane boyutunun viskoz alt tabaka kalınlığına oranıyla tariflenebilir. Reynolds sayısı tane boyutunun viskoz alt tabaka kalınlığına oranıyla tariflenebilir. Reynolds sayısı tane boyutunun ve kayma hızının fonksiyonudur. O halde;

$$\psi_{kr} = \frac{\tau_{kr}}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{U_{*kr}^2}{\Delta gd} = f\left(\frac{U_{*kr}d}{\nu}\right) = f(Re_*)$$

dir. Bu ifadenin sol tarafı boyutsuz kritik kayma gerilmesi veya tane Froude sayısı, sağ tarafı ise tane Reynolds sayısı olarak isimlendirilir. Bu boyutsuz sayılar esas alınarak ilk araştırma Shields tarafından yapılmıştır. Hareketin başlangıcıyla ilgili bu çok önemli çalışma sonucunda kendi adıyla bilinen Shields Diyagramı (Şekil 12) verilmiştir.



Şekil 12: Shields eğrisi

Kaynak: (Yüksel, 2014)

Fakat partikül hareketlerini incelemek için partiküle etki eden kuvvetlerin hesaplanması (F_L ve F_D) ile partiküllerin farklı fiziksel özelliklerine ve akım şartlarına bağlı olarak hareketleri de incelenmiştir. Bu hareketleri yapan partiküller sürüntü malzemesi, askıda malzeme olarak ve toplam katı madde debisi alınarak

hesaplanmıştır. Ayrıca boru içindeki konsantrasyon da hesaplanmıştır (Yüksel, 2014).

Konsantrasyon ve toplam katı madde debisi hesaplamalarında Acaroğlu'na ait formülden yararlanılmıştır (Acaroğlu, 1968).

Acaroğlu Formülü: Acaroğlu, regresyon analizini kullanarak toplam katı madde konsantrasyonu (ppm) için şu formülü teklif etmiştir:

$$C = 10^6 \left(\frac{21.44 D_{50}^{1.5}}{RV}\right)\left(\frac{JR}{D_{50}}\right)^{2.52}$$

Birim genişlikten geçen askı maddesi debisi ve toplam askı maddesi debisi Şentürk tarafından ortaya konan denklemler ile hesaplanmıştır (Yüksek, 2018).

Şentürk Formülü: Birim genişlikten geçen askı maddesi debisi (kg/sn/m) şöyle hesaplanır:

$$q_a = \left(\frac{\gamma_s^{1.5} D^{1.5}}{313.805}\right)\left(\frac{\gamma RJ}{\gamma_s D}\right)^{1.49}$$

Sonuç

Hareketli tabanlı akımların hidroliği kapsamında sediment hareketleri ile birikimleri özellikle kapalı kanal ya da boru hatlarında önemli bir duruma işaret etmektedir. Bu sebeple problemin çözümüne bağlı kalarak hangi formül ve hesaplardan yaralanılması gerektiği önemlidir. Sediment birikiminin akışa vermiş olduğu olumsuz etkileri önlemek amacıyla farklı geometrik şekiller ya da boru malzemesi seçimi gibi çözümler oluşturulmaktadır. Akış hızının sediment birikimine etkisi bilinmekte olup, düşük hızlarda tortu oluşumu artarken yüksek hızlarda ise azalmaktadır. Tortu

birikimi kanal ya da boru içi akış kesitinde daralma oluşturacağı için hesaplanan debi akışı gerçekleşemeyecektir. Bu sebeple sedimetin taban hareketleri ile askıda olan miktarlarının doğru hesaplanması projelerde optimum çözüm sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Sorgun, M. & Ülker, E. (2016). İki Boru Arasındaki Katı Madde Taşınımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Der*gisi, 18 (54), 455-465.

Bayazıt, M. & Avcı, İ. (2010). Akarsularda Akım ve Sediment Taşınımı. *Birsen yayınevi*, İstanbul, 309 s.

Graf, W.H. (1998). Fluvial Hydraulics, *John Willey & Sons*. Chichester, UK, 692 s.

Bayazıt, M. (1971). Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği. *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi matbaası*, İstanbul, 250 s.

Sümer, B. M., Ünsal, İ. & Bayazıt, M. (1983). Hidrolik. *Birsen yayınevi*, İstanbul, 325 s.

Yüksel, Y. (2014). Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik. *Beta Basım Yayım*, İstanbul, 1003 s.

Öcal, O. (2007). Yapay Sinir Ağları Algoritması Kullanılarak Akarsu Havzalarında Yağış-Akış-Katı Madde İlişksinin Belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 93 s. (Yüksek Lisans Tezi)

Güngör, M. (1997). Akarsu Kıvrımlarına Yerleştirilen Köprü Kenar Ayakları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulma Derinliğinin Belirlenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul, 112 s. (Doktora Tezi)

Schiller, L. & Nauman, A. (1935). A drag coefficient correlation. *VDI Zeitung*, 77, 318-320.

Roos, F.W. & Wilmarth, W.W. (1971). Some experimental results on sphere and disk drag. *AIAA Journal*, 9,285–291.

Kaufmann, A. (2004). Towards eulerian-eulerian large eddy simulation of reactive two-phase flows. Université de Toulouse, *Institut National Polytechnique de Toulouse*, Fransa, 252 s. (Doktora tezi).

Çeçen, K. (1982). Hidrolik-Cilt II-Açık Kanallar. *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul, 302 s.

Boys, P. D. (1879). Le Rhône et les rivières à lit affouillable. Etude du régime du Rhône et de Faction exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indéfiniment affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées*, French, 49(2), 141–195.

Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1949). Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. *Schweizerische Bauzeitung*, 67, 29-32.

Kalinske, A.A. (1947). Movement of sediment as bed in rivers. *Trans Am. Geophys*. Union, 28(4), 615-620.

Einstein, H.A. (1942). Formulas fort he transportation of bedload. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 561-577.

Acaroğlu, E.R. (1968). Sediment Transport in Conveyance Systems. *Cornell University*, Ithaca, New York. (Doktora tezi).

Yüksek, Ö. (2018). Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği Ders Notları. *Karadeniz Teknik Ünivesitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Trabzon.

BÖLÜM II

Geoteknik Mühendisliğinde İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Tekrar Kullanımı

Mehmet ALPYÜRÜR[1]

Giriş

İnşaat ve Yıkıntı Atıkları (İYA) mevcut herhangi bir yapının inşa edilmesi veya yıkımı sırasında ortaya çıkan ve birçok geoteknik mühendisliği uygulamalarında değerlendirilmesi gereken atık malzemelerden biridir. Son yıllarda ülkemizde yaşanan yıkıcı depremlerin ardından, depremlerin oluşum sıklığının artması ve yıkılma potansiyeline sahip yapıların sayısının artması sonucunda, büyük miktarda İYA birikimi oluşmakta ve gelecekte de artması beklenmektedir. Şekil 1'de 6 Şubat 2023'te yaşanan

[1] Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ALPYÜRÜR, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur/Türkiye, Orcid: 0000-0002-6878-5874, malpyurur@mehmetakif.edu.tr

Kahramanmaraş merkezli depremlerin ardından oluşan inşaat yıkıntı atıkları görülmektedir.

Şekil 1: Kahramanmaraş merkezli depremlerin ardından oluşan inşaat yıkıntı atıkları (https://www.trthaber.com).

İYA, AB'de üretilen tüm atıkların üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır (https://environment.ec.europa.eu). İYA malzemeleri, yeni bina ve inşaat mühendisliği yapıları inşa edildiğinde ve mevcut binalar ve inşaat mühendisliği yapıları yenilendiğinde veya yıkıldığında (yapı söküm faaliyetleri dahil) üretilir. İnşaat mühendisliği yapıları arasında sokaklar ve otoyollar, köprüler, kamu hizmeti tesisleri, iskeleler ve barajlar gibi kamu işleri projeleri yer almaktadır. 2018 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde 600 milyon ton İYA üretilmiştir; bu miktar, üretilen kentsel katı atık miktarının iki katından fazladır. İYA malzemeleri genellikle aşağıdakiler gibi hacimli, ağır malzemeler içerir:

- Beton
- Ahşap

- Asfalt
- Alçı
- Metaller
- Tuğlalar
- Cam
- Plastikler
- Kurtarılmış bina bileşenleri (kapılar, pencereler ve sıhhi tesisat armatürleri)
- Temizlenen sahaladan ağaçlar, kütükler, zemin ve kaya (https://www.epa.gov)

Dünya son birkaç on yıldır büyük bir altyapı gelişimi yaşamaktadır. Daha fazla yeni şehir ve yerleşim alanı inşa edilmekte ve mevcut şehirler zamanla nüfus yoğunluğunun önemli ölçüde artmasıyla genişletilmektedir. Bu nedenle, mühendislik ve inşaat malzemelerine olan talep aşırı hale gelmekte ve bu durum da çevreyi birçok yönden tehlikeye atan mevcut doğal kaynaklar üzerinde aşırı bir tüketime neden olmaktadır. Dahası, bina ve yapıların inşa edilmesi ve yıkılmasıyla oluşan artıklar dünya çapında önemli bir artış kazanarak bir yılda üretilen toplam katı atığın üçte birinden fazlasını kaplamaktadır.

Bu atıkların geri dönüşüm tesislerinde işlenerek farklı alanlarda kullanılması giderek önem kazanmaktadır. Şekil 2'de bir inşaat ve yıkıntı atığı geri dönüşüm tesisi örneği görülmektedir.

İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanımı

Depremler bir ülke için gerekli önlemlerin alınması gereken ciddi bir sorundur. Bu bağlamda son yıllarda ekonomik ömrünü tamamlamış yapılar yıkılmıştır. Yıkılan yapılardan çok sayıda inşaat yıkıntı atığı oluşmaktadır. Bu atıklar depolama tesislerinde

toplanmakta ve çok fazla yer kaplamaktadır. Dolayısıyla bu atıkların hem depolama tesislerini boşaltarak hem de doğaya zarar vermeden yeniden kullanılarak değerlendirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu atıkların yeniden değerlendirilmesinde alternatif bir yöntem ise zemin iyileştirmedir.

Şekil 2: İnşaat ve yıkıntı atığı geri dönüşüm tesisi (https://www.cdegroup.com).

Zemin iyileştirme, artan nüfusun ihtiyaçları için arazi kullanımındaki artan talep oranının bir sonucu olarak derinlemesine daha fazla araştırma yapılması gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Zemin iyileştirmenin temel nedenleri arasında plastisiteyi azaltmak, geçirgenliği ve sıkıştırılabilirliği azaltmak ve zemin mukavemetini artırmak vardır. Atıklar, geoteknik özellikleri

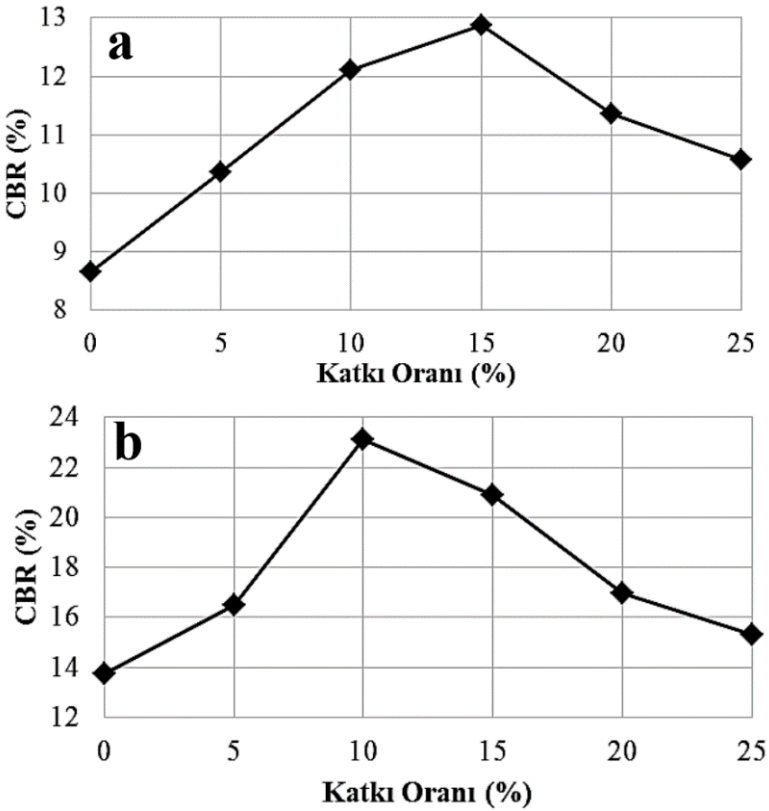
açısından yetersiz olan zeminlerin iyileştirilmesinde çimento, kireç, uçucu kül ve bitüm gibi diğer bazı katkı malzemeleriyle birlikte kullanılabilir. İnşaat yıkıntı atıkları da bu atıklardan biridir. Bu atıkların ortadan kaldırılması için düşünülen bazı yöntemler vardır. Bahsedilen yöntemlerden biri de inşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirme prosedürlerinde kullanılmasıdır.

İyileştirilmesi gereken problemli zeminlerden biri olan şişen zeminler, herhangi bir altyapı projesinin yürütülmesi sırasında mühendislerin karşılaştığı en ciddi sorunlardan biridir. Kimyasal katkı maddeleri kullanmak zemin iyileştirmenin en geleneksel ve yaygın yöntemlerinden biridir. Bununla birlikte, sahada zemin iyileştirme, birçok mühendislik uygulaması için en ekonomik çözümlerden biridir. İnşaat ve yıkıntı atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılması popüler bir araştırma konusudur. İnşaat atık malzemesi olarak beton, tuğla, gazbeton, cam gibi malzemeler bir çok araştırmada kullanılmıştır.

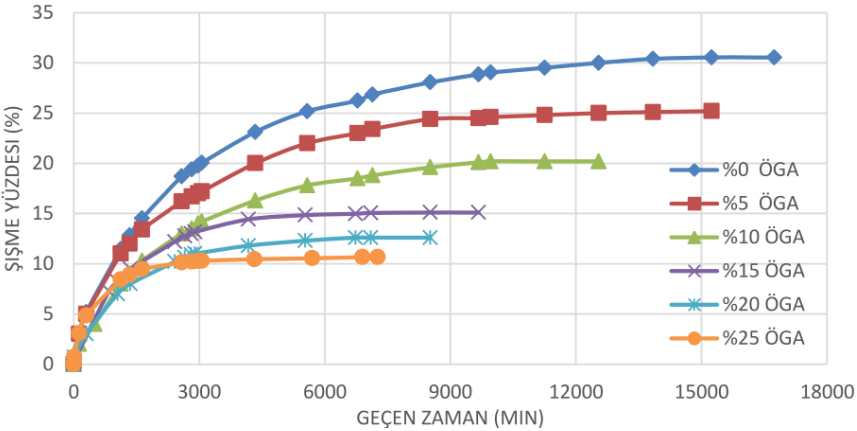
Alpyürür & Şenol (2016, 2017, 2018) yaptıkları çalışmalarda, yıkıntı atığı olarak gazbetonun zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Gazbeton malzemesi, öğütülerek kullanılmış ve farklı zemin tiplerine etkisini araştırmak amacı ile yüksek plastisiteli kil olarak bir bentonit (CH), bir düşük plastisiteli kil zemin (CL) ve bir kum zemin (SP) numuneleri ile karıştırılarak deneyler yapılmıştır. İnşaat yıkıntı atığı olarak öğütülmüş gazbeton atığı (ÖGA) katkısı ile kil zeminlerin serbest basınç mukavemeti ve CBR değerlerinin, kum zeminin ise kayma mukavemeti açısının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4). Ayrıca CH numunesinin şişme basıncı ve şişme yüzdesinde önemli derecede azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 3). Yapılan laboratuvar çalışması sonucunda pratik uygulama

için optimum katkı oranları, kil ve kum zeminler için kuru ağırlıkça %10-15 olarak belirlenmiştir.

Vural (2019), çalışmasında, Sakarya'da 1999 yılı depremlerinde yıkılan binalara ait yıkıntı atıkları ile laboratuvar ortamında zemin iyileştirmesi yapılarak bu zeminlerin CBR değerleri belirlenmiştir. Çalışmada, inşaat yıkıntı atığı, kireç ve kaolin karıştırılarak bu karışımların 1, 7 ve 28 günlük CBR değerleri ölçülmüştür. Karışımlarda kireç oranı %0 referans, %5 ve %8 seçilirken, inşaat atığı oranı %0 referans ile %23 arasında, kaolin ise %0 referans ve %72 ile %100 arasında seçilmiştir. Karışımlarda birinci, yedinci ve yirmi sekizinci gün için en düşük CBR değerleri sırasıyla 26,3, 28,65 ve 33,13 olarak %3 Yıkıntı atığı, %5 Kireç ve %92 Kaolin kullanıldığında, en yüksek CBR değeri ise 33,52, 34,70 ve 34,95 ile %23 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin kullanıldığında elde edilmiştir.



Şekil 3: ÖGA katkısının killerin CBR değerine etkisi a) düşük plastisiteli kil (CL) b) yüksek plastisiteli kil (CH) (Alpyürür & Şenol, 2016)



Şekil 4: CH-ÖGA numunelerinin zamana bağlı olarak şişme yüzdeleri (Alpyürür & Şenol, 2018).

Bagriacik & Mahmutluoglu (2020), inşaat yıkıntı atıkları (İYA) ve çimentonun kumlu zeminlerin zemin stabilizasyonu ve mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. İYA kullanılarak taşıma kapasitesi değerlerinde 3,09 kata kadar artışlar elde edildiği belirlenmiştir. Kumlu zemin için optimum iyileştirme derinliği değeri 520 kPa basınç değerine kadar H/D = 0,75 (H: zemin iyileştirme derinliği, D: model temel çapı) olarak elde edilmiştir. Ayrıca, zamana göre en yüksek taşıma kapasitesine 28 gün sonunda ulaşıldığı ve belirtilen zaman periyodu aşıldıktan sonra taşıma kapasitesi değerlerinde önemli bir artış olmadığı bulunmuştur. Bu nedenle, herhangi bir zemin iyileştirme işleminin tamamlanmasından sonra herhangi bir inşaat çalışmasına başlanmadan önce en az 28 gün geçmesi önerilmektedir.

Saeed & Rashed (2020), çalışmasında İYA ile stabilize edilen zeminin geoteknik özelliklerindeki değişiklikleri araştırmak için testler yürütülmüştür. Sonuçlardan, şişen zeminlerin şişme

potansiyelinin azaldığı ve serbest basınç dayanımı (SBD) değerinde orijinal değerinin 3 katına kadar çarpıcı artışlar bildirildiği sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, İYA'nın zemin stabilizasyonunda kullanılacak ekonomik bir çözüm olduğunu, inşaat atıklarını geri dönüştürmek ve daha fazla depolama alanına olan sürekli ihtiyacı çözmek için sürdürülebilir bir fikir olduğunu göstermektedir.

Cabalar, Abdulnafaa, & Isbuga (2021), büyük ölçekli bir model kutuda gerçekleştirilen çeşitli inşaat ve yıkıntı malzemeleri içeren bir kil üzerinde yapılan plaka yükleme testlerinin bir dizi sonucunu ve bu malzeme karışımlarının kullanımına ilişkin sayısal bir doğrulamayı sundu. Testler, 2,0 m çapında ve 1,5 m derinliğinde betonarme dairesel bir kutuda hazırlanan üç farklı tipte İYA malzemeli (beton, asfalt ve tuğla) kile uygulandı. İYA malzemeleri kile kuru ağırlıkça %10 karışım oranıyla eklendi ve ardından optimum su içeriğinde (w_{opt}) ve karşılık gelen maksimum kuru yoğunlukta (γ_{drymax}) sıkıştırıldı. Test sonuçları, İYA malzemelerinin kilin nihai taşıma kapasitesini %50-75 aralığında artırdığını göstermiştir.

Lukiantchuki & ark. (2021), fiber takviyeli çimento karışımlarında lateritik doğal zemininin özelliklerini iyileştirmek için inşaat yıkıntı atığı kullanımını incelemiştir. İYA'na ek olarak, zeminin kuru ağırlığının bir yüzdesi olarak Portland çimentosu ve polipropilen lifler eklenmiştir. Laboratuvar test sonuçları, zeminin İYA ile kısmen değiştirilmesinin ve zemin-İYA karışımlarına %0,1 oranında 50 mm uzunluğunda polipropilen lif eklenmesinin, zeminin tek başına performansından daha iyi olduğunu ve geoteknik uygulamalar için uygulanabilir bir alternatif malzeme ürettiğini göstermektedir.

Patil & ark. (2021), çalışmasında farklı oranlarda inşaat atığı ve siyah pamuk toprağı kullanılarak çeşitli testler gerçekleştirdiler ve inşaat atığı eklenmesiyle zeminin yük taşıma kapasitesinde bir artış olduğunu ve bu yük taşıma kapasitesinin İYA %10 oranında eklendiğinde maksimuma ulaştığını gözlemlediler. Zeminin yük taşıma kapasitesi %10 katkı oranında %26,49, %15'te %3,52 arttı, %20'de ise %9,64 azaldı ve %30 katkı oranında ise 61,897 azaldı. Dolayısıyla, zemini %10 İYA ile değiştirerek stabilize etme yönteminin, zayıf siyah pamuk toprağının yük taşıma kapasitesini ve mukavemetini artırdığı sonucuna varılabilir.

Atık malzemeleri işlemek için alkali aktive edilmiş malzemelerin kullanılması geoteknik mühendisliğinde daha yaygın hale gelmektedir. Bu malzemelerin çimentolu bir malzeme olarak zemin parçacıklarına eklenmesi, sorunlu zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirebilir ve çevre kirliliğini en aza indirebilir.

Bagriacik (2021), alkali aktive edilmiş inşaat yıkıntı atıklarının büyük ölçekli zemin iyileştirme uygulamaları için bir stabilizatör olarak kullanılmasının fizibilitesini incelemiştir. Alkali aktivatör olarak İYA kullanımı zemin mühendisliği özellikleri için daha iyi bir çözümdür ve zemin iyileştirmesine katkıda bulunur sonucuna varmıştır.

İYA, çevresel sürdürülebilirlik ve çimentolu malzemelerin mukavemetinin artırılması ihtiyacı nedeniyle bir araştırma merkezi haline gelmiştir. Bununla birlikte, İYA'nın daha geniş uygulamaları sınırlıdır, çünkü homojen olmayan yüzey yapısı işlenebilirliğini sınırlar.

Zhang & ark. (2022), sülfat-alkali aktivasyonu altında polipropilen elyaf takviyeli çimento stabilize edilmiş zeminde (ÇSZ) agrega olarak İYA'nın uygulanabilir kullanımını değerlendirdi. ÇSZ numuneleri Portland çimentosu ve İYA'nı %10, %20 ve %30 oranlarında içeriyordu. Ayrıca, sodyum sülfatla alkali aktivasyondan sonra polipropilen elyaf (%0,2, %0,4 ve %0,8 dozaj seviyesinde) %1, %2 ve %4 olarak tanımlanmıştır. Portland çimentosu, polipropilen elyaf, İYA ve sodyum sülfat için optimum oranların sırasıyla %30, %4, %20 ve %0,8 olarak belirlendi. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, iyileşmeyi hidratasyon ürünü oluşumuna, köprüleme etkisine ve artan parçacık sürtünmesine bağladı.

Büyüyen inşaat sektörüyle birlikte, hem inşaat hem de yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan atıklarda sürekli bir artış görülmektedir. Yapı Malzemesi Tanıtım Konseyi'nin (BMPTC) bir tahminine göre, Hindistan'da yılda 150 milyon ton İYA atığı üretilmektedir.

Sangeetha & ark. (2022), Siyah pamuk toprağının özelliklerini incelemiş ve siyah pamuk toprağının zemin stabilizasyonunda geri dönüştürülmüş İYA kullanımını araştırmıştır. Testler, siyah pamuk toprağının mukavemetini artırmak için farklı oranlarda İYA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) %2'den %18,09'a artış gösterdini belirlemişlerdir.

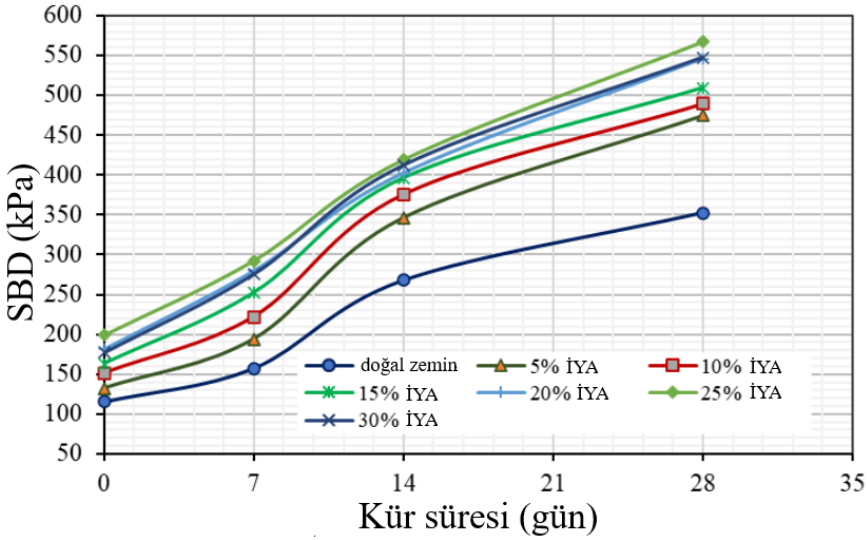
Bagriacik, (2022), bir kil zeminin iyileştirilmesinde İYA'nın kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kil zeminin taşıma kapasitesi oranları ve gerilme dağılımları farklı İYA oranları, farklı iyileştirme derinlikleri (H/D) ve farklı kür süreleri için incelenmiştir. Sonuç

olarak kil zeminde optimum İYA oranının %14, iyileştirme derinliğinin 1,5 ve optimum kür süresinin 14 gün olması gerektiği önerilmiştir.

Daha az trafiğe sahip yollar, park yerleri ve alçak katlı binaların sığ temellerinin yapımında İYA'nın uygulanması, farklı yapıların temel çökmesi sorununu çözecek, doğal rezervleri koruyacak, sürdürülebilir atık geri dönüşümünü sağlayacak ve çevreyi organize bir şekilde kurtaracaktır.

Islam & Islam (2022), inşaat ve yıkıntı atığı tozu kullanılarak zayıf zeminin geoteknik davranışını iyileştirmeyi amaçlamıştır. İYA-zemin karışımında farklı İYA yüzdelerinde farklı koşullar altında yapılan çeşitli deneylerde, katkılı zeminin CBR değerinde ve SBD'da dikkate değer bir iyileşme gözlemlenmiştir (Şekil 5). İYA, kil zeminin CBR ve SBD değerlerini iyileştirdiğinden, yumuşak zemin iyileştirme için kum, taş, tuğla parçaları vb. gibi yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerine alternatif olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Munoz Perez, Salazar Pretel, & Villena Zapata (2023), geri dönüştürülmüş yıkıntı malzemesi içeren yüzey temelleri için zeminin mekanik özelliklerini değerlendirdi. İYA ile iyileştirilmiş killi bir zeminin mekanik davranışı analiz edildi. Sonuç olarak, SBD testlerine göre tüm İYA yüzdeleri için zeminin kohezyon ve sürtünme açısında bir iyileşme sağlandı. Böylelikle İYA'nın killi özellikteki bir zeminin mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koydu.



Şekil 5: Farklı kür sürelerinde zemin numunelerinin serbest basınç dayanımı (Islam & Islam, 2022).

İnşaat Yıkıntı Atıklarının Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı

Modern toplumlar, günümüzde artan çevresel duyarlılıklar nedeniyle kaynakların sürdürülebilirliğini iyileştirmek için zorlu çabalar sarf etmektedir. Yüksek miktarlarda üretilen ve genellikle düzensiz bir şekilde bertaraf edilen İYA sorununa çözüm bulmak giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu malzemenin dolgu malzemesi olarak büyük ölçekli projelerde yeniden kullanılması uzun vadeli çevresel faydalara yol açabilir. Son yıllarda yol yapımında İYA kullanımı önemli ve zorlu bir konu olmuştur.

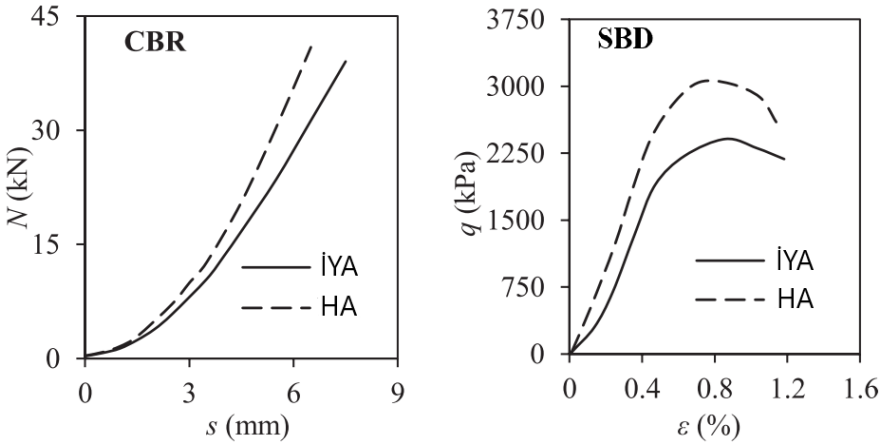
Ok & ark. (2020), dolgu gibi geoteknik uygulamalarda İYA malzemelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, İYA malzemelerinin aşırı su emme değerine karşı önlem alınması koşuluyla dolguda kullanılan ham agregaya(HA) iyi bir

alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır Şekil 6'da İYA ve HA malzemelerinin SBR ve serbest basınç deneylerinden elde edilen karşılaştırmalı yük deplasman eğrileri verilmiştir.

Kalantar Hormozi & ark. (2021), çalışmasında yol temeli ve alt temel için uygun bir aday olup olmadıklarını belirlemek amacıyla İYA'nın geoteknik özellikleri incelenmiştir. Basınç özellikleri ve CBR sayıları standart sınırlardan az olmasına rağmen, çimento stabilizasyonu ile iyileştirilmiş ve bu yol katmanları için uygun hale gelmiştir.

Yılmaz & Ercikdi (2022), İnşaat ve yıkıntı atıklarının yeraltı madenciliğinde cevher üretimi sırasında oluşan boşlukları doldurmak için dolgu malzemesi olarak kullanılabilir olduğunu belirtmiştir.

Prajapati & Rangwala (2022), istinat duvarlarında dolgu zemini ile karıştırılacak takviyeli bir malzeme olarak İYA kullanımının etkinliğini sunmuştur. Sıkıştırma parametreleri ve kesme parametreleri de dahil olmak üzere zemin ve İYA'nın çeşitli endeks ve mühendislik özellikleri, farklı İYA ve zemin oranları için belirlenir ve karşılaştırılır. Sıkıştırma testleri ve üç eksenli basınç testi, en iyi sonuçların toprağın %37,5 oranında İYA ile değiştirilmesiyle elde edildiğini göstermiştir. Zeminin %37,5'i İYA ile değiştirildiğinde, Optimum nem içeriği ve maksimum kuru birim ağırlık değerlerinin sırasıyla %6,95 ve %2,06 oranında arttığı, kohezyonun %30,35 oranında azaldığı ve iç sürtünme açısının %85,44 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, İYA'nın istinat duvarlarının dolgusunda takviye malzemesi olarak potansiyel uygulamasını vurgulamaktadır.



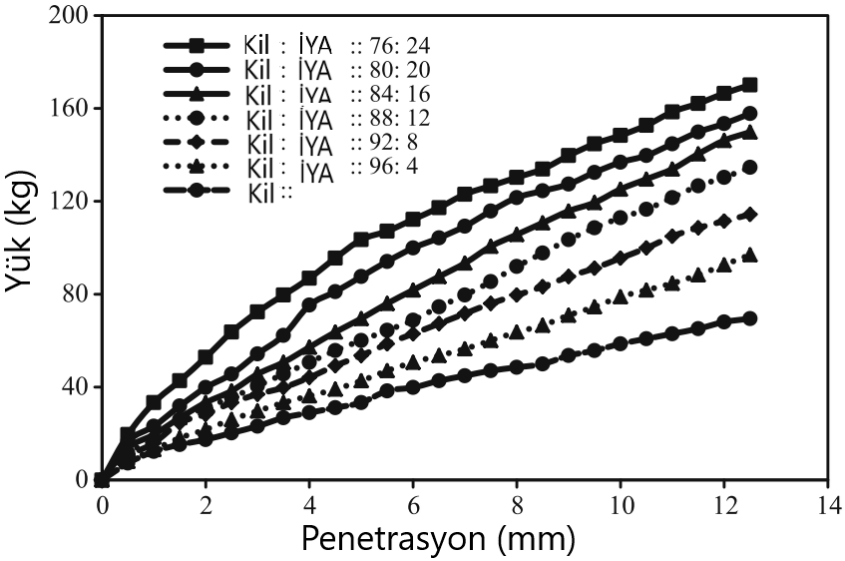
Şekil 6: İYA ve HA'nın yük-deplasman eğrileri (Ok et al., 2020).

Anita & Divya (2024), Hindistan'daki bir atık işleme ünitesinden toplanan İYA malzemesinin çeşitli fraksiyonlarının karakterizasyonu üzerine ayrıntılı deneysel araştırmalar yapmıştır. Sonuçları, mekanik olarak stabilize edilmiş zemin (MSE) duvarlarında dolgu malzemesi olarak heterojen İYA malzemesi karışımının kullanılmasının uygunluğunu bulmak için standart düzenlemelerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan, iki farklı İYA malzemesi fraksiyonunun geosentetik takviyeli MSE duvarlarının dolgusu olarak kullanılabileceği bulunmuştur.

İnşaat Yıkıntı Atıklarının Diğer Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Sharma, Kumar & Kapoor (2019), İYA olarak öğütülmüş beton molozu (ÖBM) ile karıştırılmış kum (ÖBM-K) kompoziti üzerine oturan temeller üzerinde yapılan model plaka yükleme testlerinin deneysel sonuçlarını sunmuştur. ÖBM-K kompozit tabakası, kum üzerine yerleştirildiğinde yalnızca nihai taşıma kapasitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda temelin buna karşılık

gelen oturmasını da azaltır (Şekil 7). Test sonuçlarından, ÖBM-K kompozitinin sürdürülebilir malzemelerden biri olarak temellerin altına yerleştirilebileceği doğrulanmıştır.



Şekil 7: Çeşitli karışımlar için yüke karşı penetrasyon eğrisi (A. Sharma & Sharma, 2020).

İnşaat ve yıkıntı atıklarından gelen geri dönüştürülmüş malzemeler, ulaşım altyapılarının temel ve alt temel katmanları ve beton üretimi gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak, İYA geri dönüştürülmüş malzemelerin ince taneli fraksiyonu bu uygulamalar için uygun görülmemektedir ve sıklıkla yeniden kullanılmak yerine çöplüklere atılmaktadır. Vieira (2020) ince taneli İYA malzemelerin, bu yapıların inşasında tipik olarak kullanılan zeminin yerine, geosentetik takviyeli yapıların (setler ve istinat duvarları) dolgusu olarak kullanılma olasılığını değerlendirmiştir. Bu makalede sunulan

sonuçlar, İYA geri dönüştürülmüş malzemelerin geosentetik takviyeli yapıların inşasında kullanılmasının uygunluğunu ve böylece İYA atıklarının depolanması ve doğal agregaların çıkarılmasıyla oluşan çevresel etkilerin azaltılması yoluyla karbon ayak izimizin azaltılabileceğini desteklemektedir.

İnşaat ve yıkıntı atığı malzemelerinin yeniden kullanılması ve su basması sorunlarının çözülmesi için Li & ark. (2023), İYA'nın geçirgen kaplama uygulanmasının uygulanabilirliğini araştırmıştır. Geri dönüştürülmüş tuğla agregası (GDTA) ve geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA), farklı karıştırma oranları ve derecelerinde geçirgen kaplama temel malzemeleri olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıca filtre kirletici olarak geotekstiller kullanılmıştır. Genel olarak, İYA yeraltı suyunu kirletmeden yeraltında kullanılma potansiyeline sahiptir. İYA'daki ağır metal konsantrasyonları yerel zemindekinden daha azdır ve malzeme kaynaklarıyla ilgilidir. Su verimi performansı, geçirgen kaplama inşa etmek için %100 beton kullanıldığında en iyi olmuştur ve toplam su depolaması, geçirgen kaplama yapmak için %100 tuğla seçildiğinde en yüksek olmuştur.

Yadav & ark. (2024) gevşek kum üzerine yerleştirilen İYA üzerine yerleştirilen dairesel bir temelin yük taşıma kapasitesini artırmak için İYA'nın uygunluğunu incelemiştir. Rölatif sıkılık (Dr) (Dr = %30, %50 ve %70), İYA tabakasının kalınlığının dairesel temel çapına oranı (u/D) (u/D = 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2) ve İYA tane çapı gibi çeşitli parametrelerin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Gevşek kum üzerine İYA (5 mm) tabakasının eklenmesi, u/D = 1,2 ve Dr = %70 için, Dr = %30'daki gevşek kuma kıyasla yük taşıma kapasitesini 4,96 kat artırırken oturmayı 5,03 kat azaltır.

Sonuçlar

Mevcut çevre bilinci, tüm ülkeleri atık üretimini azaltmaya ve geri dönüştürülmüş malzemeleri verimli kullanmaya zorlamaktadır. Ayrıca, ülkeler farklı yapıların bakımı, yenilenmesi veya yıkımı sırasında oluşan inşaat ve yıkıntı atıklarının bertarafı için büyük bir depolama alanına ihtiyaç duymaktadır. Bir çok ülke bu atıkları azaltmak, yeniden kullanmak ve geri dönüştürmek için bir strateji oluşturmalıdır. İnşaat ve yıkıntı malzemelerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı doğal kaynakların korunmasını ve çevre kirliliğinin azaltılmasını sağlar. İnşaat atık malzemelerinin geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımı doğal kaynakların verimli kullanılmasına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına olumlu katkı sağlar.

Kaynakça

Alpyürür, M., & Şenol, A. (2016). Öğütülmüş Gazbetonun Killerin CBR Değerine Etkisi. 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 12 Ekim 2016, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 51–58.

Alpyürür, M., & Şenol, A. (2017). The Effect of Grinded Autoclaved Aerated Concrete Waste on the Shear Strength of Sand. In H. Bilsel (Ed.), 3rd International Conference on New Advances in Civil Engineering (pp. 11–16). Helsinki / Finland.

Alpyürür, M., & Şenol, A. (2018). Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(2), 168–178. https://doi.org/10.29048/makufebed.429021

Anita, A., & Divya, P. V. (2024). Construction and Demolition Waste as a Sustainable Backfill for Geosynthetic-Reinforced MSE Walls. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 10(3), 1–14. https://doi.org/10.1007/s40891-024-00539-1

Bagriacik, B. (2021). Utilization of alkali-activated construction demolition waste for sandy soil improvement with large-scale laboratory experiments. Construction and Building Materials, 302(July), 124173. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124173

Bagriacik, B. (2022). Large scale laboratory investigation in the improvement of subgrade characteristics of clay soil stabilized with construction demolition waste. Journal of Engineering

Research (Kuwait), 10(1B), 55–67. https://doi.org/10.36909/jer.10445

Bagriacik, B., & Mahmutluoglu, B. (2020). A new experimental approach to the improvement of sandy soils with construction demolition waste and cement. Arabian Journal of Geosciences, 13(13). https://doi.org/10.1007/s12517-020-05493-6

Cabalar, A. F., Abdulnafaa, M. D., & Isbuga, V. (2021). Plate Loading Tests on Clay with Construction and Demolition Materials. Arabian Journal for Science and Engineering, 46(5), 4307–4317. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04916-6

CDEGroup (13/10/2024 tarihinde https://www.cdegroup.com/applications/waste-recycling/c-d-waste-recycling adresinden ulaşılmıştır.)

European Commission (13/10/2024 tarihinde https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en adresinden ulaşılmıştır.)

Islam, S., & Islam, J. (2022). Improving the Geotechnical Behavoir of Clay Soil Using Improving the Geotechnical Behavoir of Clay Soil Using Construction and Demolition Waste. 6th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2022), (December), 21–23.

Kalantar Hormozi, M. J., Jorkesh, Z., Ajalloeian, R., & Mortazavi Gelsefidi, S. A. (2021). Feasibility of Using Recycled Combined Construction and Demolition Waste for Road Base and Subbase in Fooladshahr, Isfahan Province, Iran: A Case Study.

Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 147(2), 1–8. https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000267

Li, L., Shen, X., Liu, J., Li, W., Zhong, C., & Zhou, X. (2023). The Feasibility Analysis of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste for Permeable Pavement. KSCE Journal of Civil Engineering, 27(2), 535–550. https://doi.org/10.1007/s12205-022-0767-0

Lukiantchuki, J. A., de Oliveira, J. R. M. da S., de Almeida, M. de S. S., dos Reis, J. H. C., Silva, T. B., & Guideli, L. C. (2021). Geotechnical Behavior of Construction Waste (CW) as a Partial Replacement of a Lateritic Soil in Fiber-Reinforced Cement Mixtures. Geotechnical and Geological Engineering, 39(2), 919–942. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01533-w

Munoz Perez, S. P., Salazar Pretel, T. M., & Villena Zapata, L. I. (2023). Mechanical properties of a soil improved with recycled demolition concrete for the construction of shallow foundations. Materials Physics and Mechanics, 51(1), 168–178. https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_14

Ok, B., Sarici, T., Talaslioglu, T., & Yildiz, A. (2020). Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. Transportation Geotechnics, 24(June), 100380. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100380

Patil, P., Neman, M., Mhetre, S., & Sankhe, B. (2021). Use of Construction and Demolition Waste for Ground Improvement. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 9(3), 138–141. Retrieved from www.ijert.org

Prajapati, A., & Rangwala, H. (2022). Utilization of Recycled Construction and Demolition Waste in Backfill Soil. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 8(5), 1–7. https://doi.org/10.1007/s40891-022-00410-1

Saeed, S. B., & Rashed, K. A. (2020). Evaluating the Uses of Concrete Demolishing Waste in improving the Geotechnical Properties of Expansive Soil. Journal of Engineering, 26(7), 158–174. https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.07.11

Sangeetha, S. P., Chophi, Z. T., Venkatesh, P., & Fahad, M. (2022). Use of Recycled Construction and Demolition (C&D) Wastes in Soil Stabilization. Nature Environment and Pollution Technology, 21(2), 727–732. https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i02.034

Sharma, A., & Sharma, R. K. (2020). Strength and Drainage Characteristics of Poor Soils Stabilized with Construction Demolition Waste. Geotechnical and Geological Engineering, 38(5), 4753–4760. https://doi.org/10.1007/s10706-020-01324-3

Sharma, V., Kumar, A., & Kapoor, K. (2019). Sustainable deployment of crushed concrete debris and geotextile to improve the load carrying capacity of granular soil. Journal of Cleaner Production, 228, 124–134. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.306

Trthaber (13/10/2024 tarihinde https://www.trthaber.com/haber/turkiye/kahramanmarasta-gunde-45-bin-ton-enkaz-kaldiriliyor-749298.html adresinden ulaşılmıştır.)

U.S. Environmental Protection Agency - EPA (13/10/2024 tarihinde https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-materials adresinden ulaşılmıştır.)

Vieira, C. S. (2020). Valorization of Fine-Grain Construction and Demolition (C&D) Waste in Geosynthetic Reinforced Structures. Waste and Biomass Valorization, 11(4), 1615–1626. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0480-x

Vural, İ. (2019). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(1), 1–1. https://doi.org/10.21541/apjes.437288

Yadav, J. S., Saini, A., Hussain, S., & Sharma, V. (2024). Estimation of ultimate bearing capacity of circular footing resting on recycled construction and demolition waste overlaying on loose sand. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 9(1), 1–24. https://doi.org/10.1007/s41024-023-00378-z

Yılmaz, T., & Ercikdi, B. (2022). Effect of construction and demolition waste on the long-term geo-environmental behaviour of cemented paste backfill. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(5), 3701–3714. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03359-2

Zhang, G., Ding, Z., Zhang, R., Chen, C., Fu, G., Luo, X., … Zhang, C. (2022). Combined Utilization of Construction and Demolition Waste and Propylene Fiber in Cement-Stabilized Soil. Buildings, 12(3), 1–17. https://doi.org/10.3390/buildings12030350

BÖLÜM III

Bir Otoyol Köprüsünün Hasar Görebilirlik Analizi

Zeynep YILMAZ[1]
Murat Serdar KIRÇIL[2]

GİRİŞ

Türkiye, aktif fay hatları üzerinde yer alan ve geçmişte yıkıcı depremler yaşamış bir ülkedir. Bu durum özellikle ulaşım altyapılarının, gerektiği zaman herhangi bir aksaklık olmadan hizmet verebilmesi için dayanıklı ve güvenli bir şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Ülkemizde, ulaşım altyapıları; karayolları, deniz ve havayollarının bütününü içerir. En önemli sanat yapılarından birisi de köprülerdir. Ulaşım ağının kritik bir bileşeni olan köprüler, deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde hem yapısal performans hem de afet sonrası erişilebilirlik açısından stratejik bir rol oynamaktadır. 17 Ağustos Kocaeli ve 12 Kasım Düzce

[1] MSc Student, Yıldız Technical University, zeynep.yilmaz6@std.yildiz.edu.tr, Department of Civil Engineering, Orcid: https://orcid.org/0009-0009-5886-9132
[2] Doç.Dr., Yıldız Technical University, kircil@yildiz.edu.tr, Department of Civil Engineering, Orcıd: https://orcid.org/0000-0003-4447-9597

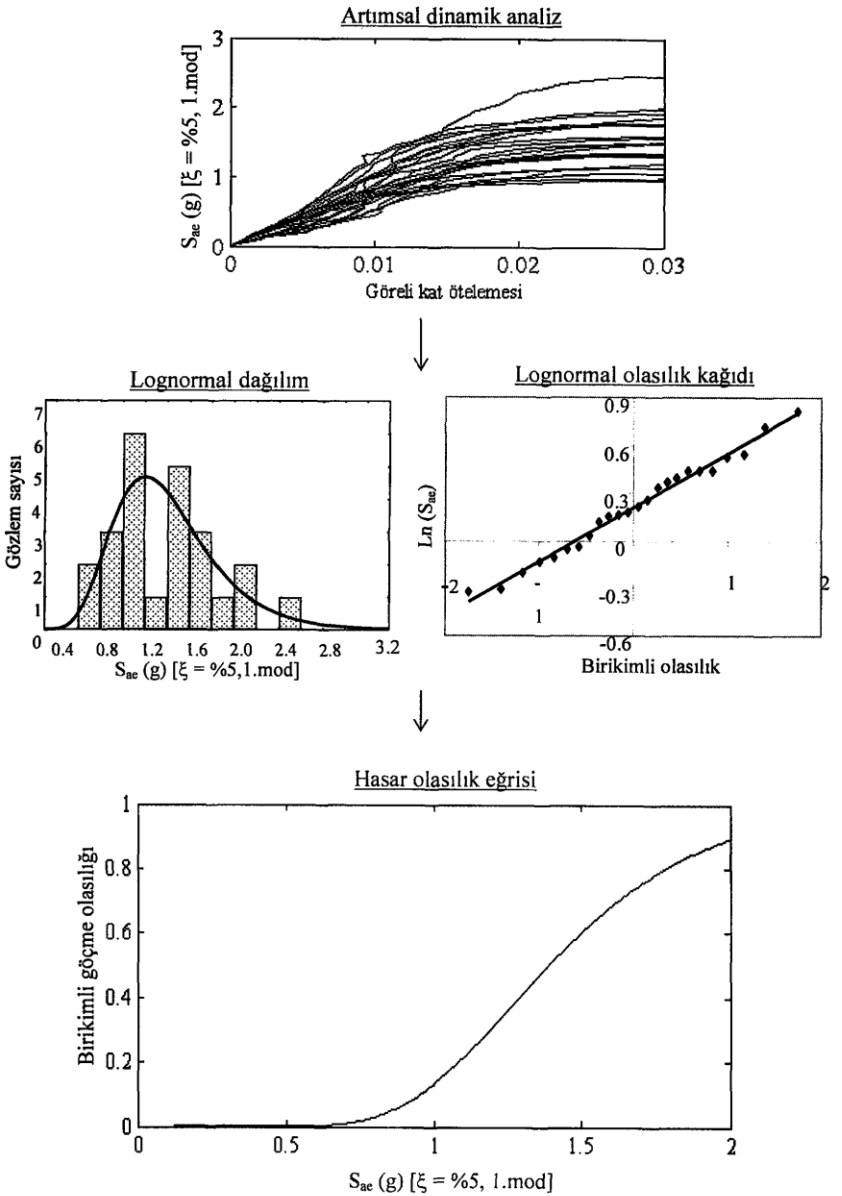
depremleri, 1999 yılında Anadolu Otoyolu ve çevresindeki köprüler ile viyadüklerde ciddi yapısal hasarlara yol açmıştır. Bu durum, köprüler ve viyadükler gibi kritik yapıların hem depreme dayanıklı bir şekilde inşa edilmelerinin, hem de afet sonrasında hasar görmeleri halinde onarılıp, güçlendirilmelerinin önemini ortaya koymaktadır.

Tüm bu sebeplerle, hasar tahmini de deprem öncesi hazırlıkların büyük bir bölümünü kapsar. Hasarın tahmin edilmesi ise, analitik olarak belirlenebilecek bir yapısal davranış parametresi ile ilişkilendirilmiş hasar seviyelerine ulaşılması veya bunların aşılması olasılığının belirlenmesi ile mümkün olabilir. Bu çalışmada, Kocaeli Gebze'de, mevcut betonarme bir karayolu köprüsünün hasar görebilirlik eğrileri elde edilmiştir; Türkiye Deprem Köprü Yönetmeliğince tanımlanan performans seviyelerine ilişkin göreli ötelenme sınırları artımsal dinamik analiz yöntemi ile belirlenmiş, belirlenen bu sınırlar esas alınarak da hasar görebilirlik eğrileri 10 farklı deprem kaydı kullanılarak elde edilmiştir.

YÖNTEM

Mevcut köprü projesi, CSI SAP2000 programında köprünün doğrusal olmayan davranışını temsil edecek şekilde modellenmiştir. Analizde, her iki yatay deprem doğrultusunu kapsayan 10 farklı sismik yer hareketi kaydı, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) veri tabanından temin edilmiştir. Bu kayıtlar, AFAD tarafından belirlenen yapı hedef spektrumuna uygun hale getirilmiştir. Bunun için, Seismomatch programı kullanılarak, yapının birinci titreşim moduna ait %5 sönüm oranı ile spektral eşleme yapılmıştır. Spektral eşleme işleminin ardından, artımsal dinamik analiz uygulanmıştır. Bu kapsamda, programa aktarılan

deprem kayıtları ölçeklendirilmiş ve böylece aynı frekans içeriğine sahip, ancak farklı ivme değerleri içeren birden fazla yer hareketi için analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kolon üst ucundaki göreli öteleme değerleri, akma, kesintisiz kullanım, kontrollü hasar ve göçmenin önlenmesi hasar seviyelerine karşılık gelecek şekilde kaydedilmiştir. Kolon üst uç göreli öteleme değerleri ile ölçeklenmiş spektral ivme değerleri bir arada değerlendirilerek artımsal dinamik analiz eğrisi elde edilmiştir. Belirlenen hasar seviyeleri için bulunan veriler kullanılarak, hasarın meydana gelme olasılığı ile spektral ivme arasındaki ilişki lognormal dağılım ile modellenmiştir. Bu modelleme sonucunda, belirli bir spektral ivme seviyesine karşılık gelen hasar seviyesinin gerçekleşme olasılığı hesaplanmış ve hasar görebilirlik eğrisi oluşturulmuştur. Yöntem, Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. *Yöntemin şematik gösterimi (Kırçıl ,2005)*

DEPREM KAYITLARI

Bu çalışmada, sistemin dinamik tepkisini daha gerçekçi bir şekilde yansıtmak amacıyla, seçilen deprem kayıtları yapının hedef spektrumuyla uyumlu hale getirilerek analizlerde kullanılmıştır. Bu işleme spektral eşleme denir. Analizde, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından sağlanan, iki farklı yatay bileşene sahip 10 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Kayıtlar, ZB sınıfı zemin koşullarına uygun olarak, kayma dalgası hızı (Vs) değerlerine göre seçilmiştir.

Her bir deprem kaydı için, Seismomatch programı kullanılarak %5 sönüm oranına sahip tepki spektrumları elde edilmiştir. Daha sonra bu spektrumlar, AFAD tarafından sağlanan ve 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan yapı hedef spektrumu ile eşleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan yer hareketlerinin listesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. *Yer hareketleri*

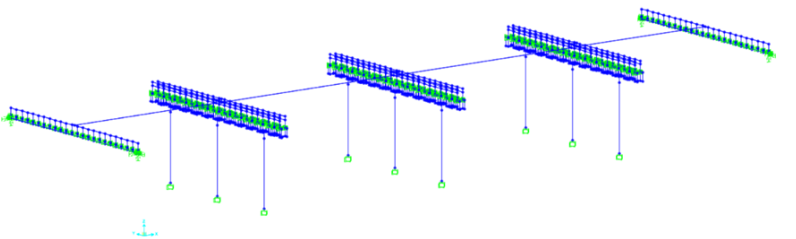
Deprem Kaydı	Yıl	Büyükl ük	Uzaklık (km)	PGA(g)	Rjb(k m)	Rrup(K m)	Zemin Sınıfı
San Fernando	197 1	6.61	89.72	0.015	89.37	89.72	B
Tabas, Iran	197 8	7.35	1.79	0.86	1.79	2.05	B
Morgan Hill	198 4	6.19	14.9	0.098	14.9	14.91	B
Landers	199 2	7.28	2.19	0.63	2.19	2.19	B
Northridge-01	199 4	6.69	23.1	0.13	23.1	23.64	B
Kocaeli, Turkey	199 9	7.51	7.57	0.14	7.57	10.92	B
Loma Prieta	198 9	6.93	3.22	0.3	3.22	5.02	B
Duzce, Turkey	199 9	7.14	4.21	0.74	4.21	4.21	B
Parkfield-02, CA	200 4	6	78.14	0.005 5	78.14	78.24	B
Kahramanm araş	202 3	7.7	8.6	0.44	20.54	20.54	B

ANALİTİK MODEL

Bağlantı Yolu-1 Köprüsü, 4 açıklıklı bir yapı olup açıklık uzunlukları sırasıyla 16.25 m, 20.0 m, 20.0 m ve 14.75 m'dir. Köprü genel görünüşü Şekil 2'te verilmiştir.

Şekil 2. *Köprü genel görünüşü*

Köprünün üstyapısında tüm açıklıklar için 90 cm yüksekliğinde öngermeli kirişler ve yerinde dökme tabliye bulunmaktadır. Kirişler, elastomer mesnetler üzerine oturtulmuş olup, her açıklıkta iç ve dış deprem takozları yer almaktadır. Köprünün platform genişliği 14 m olup trafik akışı tek yönlü ve üç şeritlidir. Tüm orta ayaklar her açıklıkta üçer adet olacak şekilde düzenlenmiştir ve ayakların yükseklikleri 6.25 m'dir. Yapının yapısal analizi, CSI SAP2000 programı kullanılarak sonlu çubuk elemanlar yöntemiyle modellenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. *Köprünün sonlu elemanlar ile modeli*

Köprü üstyapı elemanlarında elastik davranış dikkate alınmıştır. Bunun nedeni, kolonlar ve kenar ayaklar gibi diğer elemanların elastik olmayan deplasmanlar yapacak şekilde tasarlanmış olmasıdır. Üstyapının, kapasite tasarımı ilkeleri doğrultusunda korunarak elastik davranış sınırları içinde kalması hedeflenmiştir.

Köprüde toplam 192 adet çelik takviyeli elastomer mesnet bulunmaktadır. Bu mesnetler, köprü üstyapısına etki eden yatay kuvvetleri kayma davranışı ile ileterek bu kuvvetlerin köprünün diğer elemanlarına aktarılmasını sağlamaktadır. Her açıklıkta farklı düşey yüklerin bulunması, mesnetlerin kuvvet-şekil değiştirme ilişkisini etkileyerek doğrusal olmayan bir davranışa yol açmaktadır. Mangalathu (2017) tarafından önerilen modelde, elastomer mesnetlerin kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinin elasto-plastik olduğu varsayılmaktadır ve Denklem 1'de görüldüğü üzere; Fy: sürtünme kuvveti kapasitesi(kN), dinamik sürtünme katsayısı (μ) ve eksenel kuvvetin (N) çarpımı ile ifade edilmektedir ; dinamik sürtünme katsayısı μ=0.4 olarak alınmalıdır. (Aviram vd. 2008a). Yatay yöndeki rijitliği temsil eden k_h(kN/m) ise Denklem 2'de verilmiştir. Burada: G_{eff}: efektif kayma modülü, A : mesnet alanı, H: toplam elastomer kalınlığıdır. Modellemede elastomer mesnetler, X ve Y (yatay) yönlerinde doğrusal olmayan, Z (düşey) yönünde ise doğrusal davranış gösteren link elemanlar olarak tanımlanmıştır.

$$Fy = \mu . N \tag{1}$$

$$k_H = \frac{G_{eff}\ x\ A}{H} \tag{2}$$

Deprem takozları, köprünün deprem esnasındaki tepkisini büyük ölçüde etkiler. Bu elemanlar, üst yapıdan kenar ayaklara veya

orta ayaklara iletilen kesme kuvvetlerini enine yönde aktarır ve üst yapının yatay hareketini sınırlandırır. Modelde toplamda 148 adet deprem takozu bulunmaktadır. Modelde, Megally vd. (2002) tarafından belirlenen iç ve dış deprem takozu kapasitesi ve yer değiştirmesiyle ilgili formüller kullanılmıştır. Denklem 3'te iç deprem takozunun kapasitesi verilmiştir. Bu kapasite şu şekilde ifade edilir: Burada V_{max} **:** deprem takozundaki maksimum yük taşıma kapasitesini(kN), fc' : deprem takozunun beton mukavemetini, b: deprem takozu genişliği, d: deprem takozu uzunluğu ile ifade edilir. Dış deprem takozunun kapasitesi ise Denklem 4'te verilmiştir. Burada, F_u : dış deprem takozu kapasitesi(kN), A_{vf}, deprem takozunun kırılma düzlemindeki donatı çubuğunun kesit alanıdır. Statik sürtünme katsayısı μ olup, 1 olarak alınmıştır ve, f_y çeliğin akma dayanımıdır. Her iki deprem takozu sadece yatay yöndeki kuvvetleri karşıladıkları için, köprü enine yönde doğrusal olmayan özellikleri girilmiştir. Her iki deprem takozunun kapasitelerini yitirdiği maksimum deformasyon, Megally vd. (2002) tarafından yapılan deneylerle belirlenmiştir. Bu deneylerde, maksimum deformasyon ile deprem takozunun çarpışma elemanı arasındaki boşluğun farkının 8.89cm olduğu gözlemlenmiştir ve bu değer, kuvvet-deformasyon ilişkisi modelde kullanılmıştır.

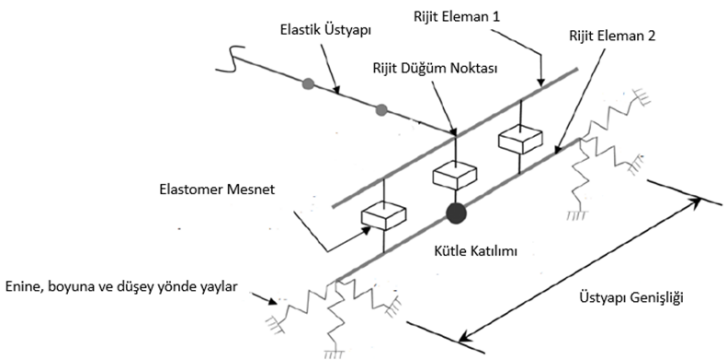
$$V_{max} = 11{,}3\sqrt{fc'}\mathrm{bd} \tag{3}$$

$$F_u = \mu\, A_{vf} f_y \tag{4}$$

Köprüde her bir eleman arasında bulunan boşluklar, deprem sırasında kapanmadan önce herhangi bir rijitlik göstermezken,

kapandıktan sonra ani bir rijitlik artışı meydana gelir. Bu rijitlik artışı, doğrudan temasa geçen yapılar arasında oluşur. Çalışmada, Aviram vd. (2008) tarafından önerilen modele göre, bu rijitliğin, bitişik eleman rijitliğinin 10 katı olması gerektiği öne sürülmüştür. Boşluk elemanları, bitişiğindeki elemanın rijitliğinin 10 katı olacak şekilde doğrusal olmayan link elemanları olarak modellenmiştir.

Kenar ayak modelinde, Mackie ve Stojadinović (2003) tarafından önerilen ve Şekil 4'te gösterilen model kullanılmıştır. Bu model, kenar ayağın enine, düşey ve boyuna yöndeki davranışlarını yaylarla dikkate alır. Kütle katılımı ise, kenar ayak arkasındaki toprak dolgusu ve kenar ayağın beton kütlelerinin toplamını içermektedir.



Şekil 4. *Kenar ayak köprü modeli*

Köprünün boyuna doğrultudaki davranışı, deprem sırasında köprü tabliyesinin kenar ayağa çarpması sonucu ortaya çıkan boşluğun kapanması ve geri toprak dolgusunun etkisi ile tanımlanır. Sistemde, bu boşluğu temsil etmek amacıyla sadece basınca çalışan boşluk elemanı (GAP) ve arka dolgudan kaynaklanan yer değiştirmeyi temsil eden doğrusal olmayan özelliklere sahip bir

eleman bulunmaktadır. Caltrans SDC 1.7 (2013)'e göre, boyuna yöndeki toprak dolgusunun pasif boylamsal tepkisi, elasto-plastik kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi ile modellenmiştir. Kenar ayağının hareketini engelleyen pasif basınç kuvveti ise denklem 5'te gösterilmiştir. Burada: K_{abut} : kenar ayak rijitliği(kN/m), K_i : toprak dolgusu başlangıç rijitliği, w : Üst yapı kesit genişliği, h_{bw} : arka duvar uzunluğu, A_e : arka duvar alanını, P_{bw} : pasif basınç kuvveti'ni temsil etmektedir(kNm).

$$K_{abut} = K_i \; x \; w \; x \; (\frac{h}{1.7m}) \qquad (5)$$

$$P_{bw} = A_e \; x \frac{239Kn}{m2} \; x \frac{h_{bw}}{1.7}$$

Köprünün enine yöndeki davranışı, boyuna yöndeki davranışa benzer şekilde, tabliye ile deprem takozu arasındaki boşluğun kapanması sonucu takozun gösterdiği rijitliğe dayanır. Sistemde, bu boşluğu temsil etmek için sadece basınca çalışan boşluk elemanı (GAP) ve dış deprem takozunun enine yöndeki kuvvet-şekil değiştirme ilişkisini temsil eden doğrusal olmayan elemanlar kullanılarak tanımlanmıştır. Köprünün düşey yöndeki tepkisi doğrusal sınırları aşmayacağı tahmin edildiğinden bu doğrultuda lineer yay elemanları ile sisteme dahil edilmiştir.

Kolonun doğrusal olmayan davranışını modellemek için yığılı plastik mafsal modeli kullanılmıştır. Kolon alt ve üst uçlarından belirli bir mesafede plastik mafsallar (Lp) yerleştirilmiştir. Türkiye Köprü Deprem Yönetmeliği'nde (TKDY, 2020) madde 5.2'de verilen formüle göre hesaplanmıştır. Kolonlarda etkin kesit rijitliği dikkate alınmıştır. Köprünün performans hedeflerine karşılık gelen

plastik mafsal dönme kapasiteleri ise yine Türkiye Köprü Deprem Yönetmeliği'nden alınmıştır.

ARTIMSAL DİNAMİK ANALİZİ

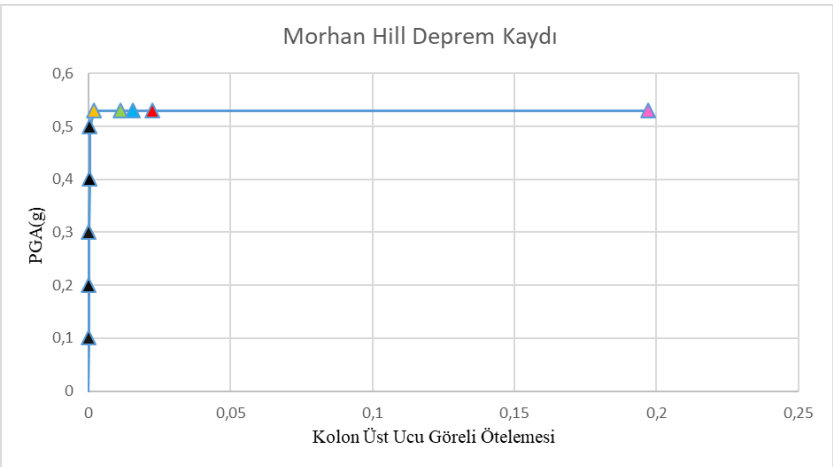
Artımsal dinamik analiz, yer hareketlerinin adım adım ölçeklenerek farklı şiddet seviyelerinde doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Bu yaklaşım, Vamvatsikos ve Cornell (2002) tarafından kullanılmıştır. Artımsal dinamik analizin yapılabilmesi için iki parametre bulunmaktadır. Bu çalışmada; depremi ifade eden parametre için spektral ivme değeri, yapının depreme tepkisini ifade eden parametre olarak da kolonların üst uç göreli ötelemesi dikkate alınmıştır. Türkiye Deprem Köprü Yönetmeliği (2020) tarafından tanımlanmış olan 3 performans seviyesi dikkate alınmıştır: kesintisiz kullanım, kontrollü hasar ve göçmenin önlenmesi. Ayrıca, ele alınan köprünün akma ve göçme noktaları da analitik olarak tespit edilmiştir.

Her analizde elde edilen en büyük kolon üst uç göreli ötelenmesi ve buna karşılık gelen spektral ivme kaydedilerek artımsal dinamik analiz eğrisi elde edilmiştir. Köprüde elastomer mesnet, deprem takozu ve kolonlardan hangisi kapasitesine önce ulaşırsa, onun hasar parametresi dikkate alınmıştır. Ancak köprüde her depremde, köprüdeki kolonların elastomer mesnette ve deprem takozlarında izin verilen maksimum yer değiştirmenin aşılmasından önce göçme durumuna geldiği görülmüştür. Bu nedenle, köprüde boyuna yönde herhangi bir hasar sınırına ulaşılmadığı için sadece enine yönde eğriler çizilmiştir.

Tipik bir artımsal dinamik eğrisinde spektral ivme-kat öteleme ilişkisi Şekil 5'teki gibi doğrusaldır ve Morgan Hill deprem yer

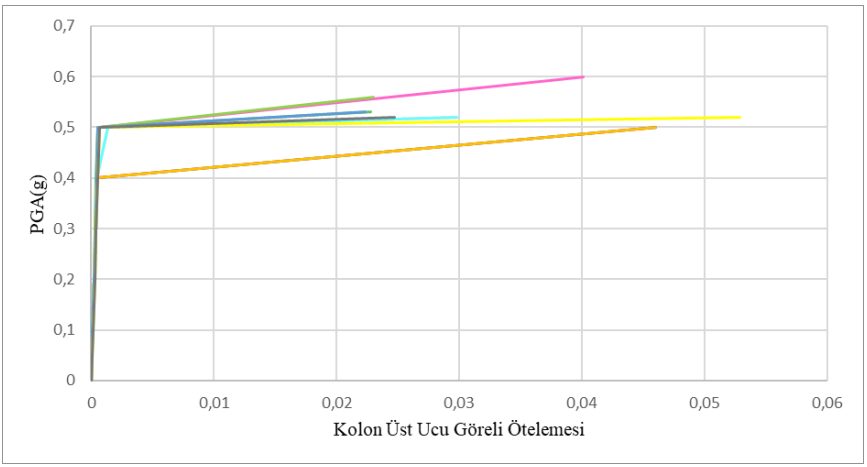
kaydı için elde edilen artımsal dinamik analiz eğrisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere spektral ivmenin 0.50 değerine kadar eğri doğrusaldır. Bir sonraki spektral ivme değerinde akma sınırına ulaşılmıştır. Bu andaki spektral ivme değeri 0.53g'dir. Kesintisiz kullanım, kontrollü hasar ve göçmenin önlenmesi kesit hasar seviyelerine de aynı analizin 0.53g ivmesinde ulaşılmaktadır.

Yatay eksen elde edilen maksimum yer değiştirmeye kadar gösterilmiştir (0.197m). Bu nokta elastomer mesnette ve deprem takozlarında izin verilen maksimum yer değiştirmesinin aşıldığı köprünün göçme durumuna geldiği görülmüştür.



Şekil 5. *Morgan Hill deprem kaydı artımsal dinamik analiz eğrisi*

Tüm deprem kaydından elde edilen ikili doğrusal hale getirilmiş artımsal dinamik analiz eğrileri Şekil 6'te gösterilmiştir. Her bir eğri, kolonlarda göçmenin önlenmesi hasar sınırına ulaşıldığı göreli kat ötelemesine kadar çizilmiştir.



Şekil 6. *Tüm depremlerin artımsal dinamik analiz eğrisi*

HASAR GÖREBİLİRLİK EĞRİSİ

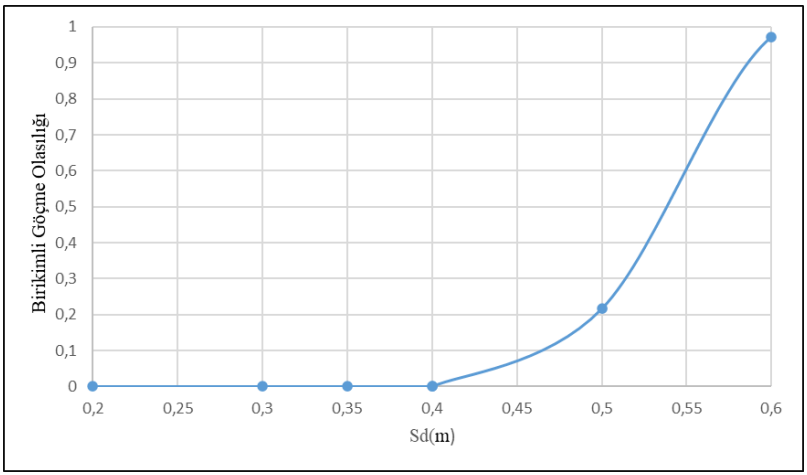
Hasar olasılık eğrileri, depremin yapılar üzerindeki etkisi ile meydana gelen hasar arasındaki ilişkiyi ortaya koyar ve belirli bir yer hareketi büyüklüğü için hasarın birikimli olasılığını belirler. Eğride kullanılan parametreler; maksimum yer ivmesi ve spektral yer değiştirmedir. Lognormal dağılım gösteren bir değişken olduğu kabul edilir (Shinozuka vd., 2000). Birikimli standart normal olasılığı denklem 6'daki gibi hesaplanabilir.

$$P = \phi[l_n(\frac{x/x_M}{\zeta})] \qquad (6)$$

Bu bağıntıda, x lognormal dağılan değişkeni, x_M orta değeri, ζ standart sapmayı, ϕ ise standart normal olasılığı ifade eder.

Artımsal dinamik analiz yöntemi kullanılarak belirlenen performans seviyelerine ait göreli ötelenme sınırları esas alınmış ve 10 farklı deprem kaydına bağlı olarak hasar görebilirlik eğrileri üretilmiştir. Tüm hasar sınırları (akma, kesintisiz kullanım, kontrollü

hasar ve göçmenin önlenmesi) aynı spektral ivme değerinde, ancak farklı saniyelerde meydana gelmiştir. Bu nedenle, her bir hasar değerine karşılık gelen hasar-görebilirlik eğrisi Şekil 6'daki gibi olacaktır.



Şekil 7. *Göçme olasılık eğrisi*

SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda, deprem riski yüksek olan Kocaeli-Gebze ilçesinde bulunan bir köprünün, hasar görebilirlik eğrileri elde edilmiştir. Analizde kullanılan 10 farklı deprem için spektral eşleme yapılmış olup, bu yöntemle deprem kayıtlarının hedef spektruma uyumlu hale getirilmiştir. Tüm yer hareketlerinde tüm kolonların elastomer mesnet ve deprem takozlarından önce hasar sınırlarına ulaştığı görülmüştür. Artımsal dinamik analiz yöntemiyle yapılan incelemelerde, spektral ivme-kolon üst uç göreli öteleme ilişkisi genellikle başlangıçta doğrusal bir davranış sergilemektedir. Yapının akma seviyesine ulaştığı spektral ivme değerinde aynı zamanda kesintisiz kullanım, kontrollü hasar ve göçmenin

önlenmesi hasar seviyelerine ulaşıldığı görülmüştür. Elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri, özellikle elastomer mesnetler ve deprem takozları gibi elemanlarda izin verilen sınırların aşılmasına neden olarak yapıların göçme durumuna geçmesine yol açmaktadır. Bu durum, tüm deprem kayıtlarında benzer bir şekilde gözlemlenmektedir.

KAYNAKÇA

Aviram, A., Mackie, K. R., & Stojadinović, B. (2008). *Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California (PEER Report 2008/03)*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

CALTRANS. (2013). *Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.7*. California: California Department of Transportation.

Mangalathu, S. (2017). *Performance-based grouping and fragility analysis of box-girder bridges in California* (Doctoral dissertation). Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

Megally, S., Silva, P. F., & Seible, F. (2001). *Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments*. University of California, San Diego.

SAP2000. (Version 14.2.4). Finite Element Methods Program. Berkeley, CA: Computers and Structures Inc.

Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Seismic performance evaluation of lifeline systems. In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–8). Auckland, New Zealand: International Association for Earthquake Engineering.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2020). *Türkiye Köprü Deprem Yönetmeliği, Ek-1: Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı için Esaslar*. Ankara, Türkiye.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. In *Proceedings of the 12th European Conference*

on Earthquake Engineering (Paper No. 479). London, UK: Elsevier Science Ltd.

BÖLÜM IV

Ulaştırma yapılarında kullanılacak Betonların Basınç Dayanımına Kimyasal ve Mineral Katkı Maddelerinin Etkisinin İstatistiksel Yöntemlerle Belirlenmesi

Üsame EKİCİ[1]

1.Giriş

Beton, modern yapıların temel taşı olan ve yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan önemli bir yapı malzemesidir. Yapısal bütünlüğünü sağlayan önemli bir özellik, betonun basınç dayanımıdır. Günümüzde, yapısal betonun mekanik özelliklerini artırmak ve özellikle dayanıklılığını artırmak için çeşitli kimyasal ve mineral katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Bu çalışma, kimyasal ve mineral katkı maddelerinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel beton karışımlarında kullanılan çimento miktarının

[1] Dr. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara, Türkiye, Orcid: 0000-0001-9741-5955, usameekici@gmail.com,

azaltılması ve katkı maddelerinin artırılması, sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır. Kimyasal katkı maddeleri, betonun erken mukavemetini artırabilirken, mineral katkı maddeleri betonun uzun vadeli dayanımını artırabilir. Bu katkı maddelerinin beton mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, yapısal performansı iyileştirmek için kritik öneme sahiptir.

Çalışmanın kapsamı, farklı kimyasal ve mineral katkı maddelerinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu katkı maddelerinin uygun kullanım koşullarını istatistiksel yöntemlerle belirlemektir. Bu amaçla, laboratuvar deneyleri ve literatür taraması yoluyla elde edilen veriler kullanılacaktır.

Bu çalışmanın bulguları, yapı endüstrisinde daha dayanıklı ve sürdürülebilir beton yapıların tasarımı ve üretimi için önemli bir katkı sağlayacaktır. Kimyasal ve mineral katkı maddelerinin etkili kullanımı, yapıların dayanıklılığını artırarak uzun vadeli yapısal bütünlüğünü güçlendirebilir ve yapıların bakım maliyetlerini azaltabilir.

Bu çalışmada, su azaltıcı katkılardan olan süper akışkanlaştırıcı ve hiper akışkanlaştırıcı ile mineral katkılar arasında yer alan silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak beton numuneleri hazırlanmış ve bu katkı maddelerinin beton basınç dayanımı üzerindeki etkileri ölçülerek analizler yapılmıştır.

2. Literatür Taraması

Beton, sudan sonra dünyada en çok kullanılan ikinci malzeme olarak modern inşaat mühendisliğinde baskın bir role sahiptir, sosyal ve ekonomik kalkınma için gerekli altyapının inşasında kritik bir

bileşen olarak hizmet eder, ancak aynı zamanda olumsuz bir çevresel etkiyi de beraberinde getirir. Birçok sahada mekanik performansı, uzun ömrü ve uygun maliyeti nedeniyle diğer malzemelerle ikame edilmesi zordur. Bununla birlikte, beton üretimi önemli miktarda enerji ve hammadde talebi ile karakterize edilir ve önemli miktarda sera gazı emisyonuna yol açarak çevre üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Günümüzde kum ve çimento, beton üretiminde sürdürülebilirlik açısından sorunlu olan iki bileşendir. Örneğin, Portland çimentosu üretimi, enerji ve ulaşım sektörlerinden sonra CO2 emisyonlarına en fazla katkıda bulunan üçüncü sektördür. Beş ülke - Çin (%58), Hindistan (%7), ABD (%2,1), Brezilya (%1,3) ve Türkiye (%2) - dünya çimentosunun %70'ini üretmektedir. Mevcut politikalar malzeme geri dönüşümünü, yenilenemeyen doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını ve atmosfere CO2 salınımının en aza indirilmesini desteklemektedir. Aynı zamanda çimento endüstrisi, enerji kaynaklarının maliyetindeki sürekli artış, CO2 emisyonlarını azaltma yükümlülükleri ve taahhütleri ve hem kalite hem de miktar olarak uygun hammadde ihtiyacı ile karşı karşıyadır. Portland çimentosunun puzolanlar veya tamamlayıcı çimentolu malzemeler olarak katı yan ürünlerle kısmi ikamesi, referans karışıma kıyasla biraz daha düşük erken yaş performansına rağmen, yapısal beton karışım tasarımı ve inşaatta pratik uygulama için makul bir öneme sahiptir (Maejier ve ark., 2020).

Kimyasal katkı maddeleri, “betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özeliklerini istenilen yönde değiştirmek için, malzemelerin karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine, çimento ağırlığının %5’ini geçmemek üzere, eklenen maddelerdir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).”

Kimyasal Katkı Maddelerinin ana fonksiyonları dört grup halinde, aşağıda verildiği şekilde özetlenebilir:

- Önemli miktarda su azaltılması,
- Prizin geciktirilmesi,
- Prizin hızlandırılması, ve
- Hava sürüklenmesi.

Cüruf, uçucu kül, silis dumanı vb. çimento gibi öğütülmüş tozlar halinde silolarda depolanan çeşitli maddelere "mineral katkı maddeleri" denir. Mineral katkılar tek başına çimentonun bağlayıcılık özelliklerine sahip değildir, fakat birlikte kullanılırlarsa çimentonun benzeri görev görürler ve dolaylı olarak çimentodan tasarruf sağlarlar. Mineral katkılar beton dayanımının iyileştirilmesinde özel olarak kullanılmaktadırlar.

Taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen beton için kimyasal katkılar, çağdaş beton karışımlarının vazgeçilmez unsurlarıdır. Hizmet ömrü boyunca beklenen taze özelliklerdeki iyileşme ve aynı zamanda sertleşmiş betonun mekanik ve dayanıklılık performansının desteklenmesi, kimyasal beton katkılarının kullanılmasıyla karşılanabilir. Birçok farklı amaç için kullanılan kimyasal katkıların betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini nasıl etkilediğinin mekanizmalarını anlamak, günümüzde teknolojik gelişmelerin bize sunduğu mikro ve makro inceleme tekniklerini kullanarak mümkün olmaktadır. Öte yandan bu teknolojik gelişmeler, bilim insanlarının atomik ölçekte malzeme araştırmasını, analiz etmesini ve üretmesini de sağlamıştır (Pekmezci ve Atahan, 2013).

2.1. Kimyasal ve Mineral Katkılı Betonlar Üzerine Literatürdeki Deneysel Çalışmalar

1999 Marmara depreminden sonra yapıların dayanıklılığında çok önemli gelişmeler olmuş, inşaat sektörünün temeli olan betonun performansını iki katına çıkarmak için artan bir çaba sarf edilmiştir. Betonun performansını iyileştirmek için çimento, agrega, mineraller ve kimyasal katkı maddeleri kullanılarak bazı araştırmalar yapılmaktadır.

Betonda süper akışkanlaştırıcıların kullanımı çok yaygındır. Bu katkılar 1960'lardan beri betonun vazgeçilmez bir bileşeni olmuştur. Akışkanlaştırıcılar, su çimento oranını düşürerek daha yüksek dayanım elde etmek, betonun hidratasyon ısısını düşürmek ve kolay yerleşmeyi sağlamak için çimento miktarını azaltmak amacıyla kullanılmıştır (Akman, 1987; Yıldırım ve ark., 1996). Akışkanlaştırıcılar, suda çözünerek suyun yüzey gerilimini azaltan ve beton içerisine hava sürükleyerek hava topaklanmasını önleyen organik maddelerdir (Topçu, 1996). Yazıcı (2003) süperakışkanlaştırıcı katkının işlenebilirliği artırdığını, karışım suyunun azaldığını ve basınç dayanımının katkı ile arttığını gözlemlemiştir. Erdoğdu (2005)'nun çalışmasında, silis dumanı ikameli betonların çökme kaybını incelemek için sülfonatlı naftalin esaslı bir süperakışkanlaştırıcı kullanılmış ve yarım saat sonra çökme kaybının %55 civarında olduğu bildirilmiştir. Alsadey (2012)'de ise melamin esaslı süperakışkanlaştırıcı içeren betonların çökme kaybının %40 civarında olduğu belirtilmiştir.

Süperakışkanlaştırıcı katkıların başlıca avantajları; çimento miktarında ve dayanımda bir azalmaya neden olmadan betonun kolay yerleştirilerek işlenebilirliğini artırmak, normal işlenebilirlikte

ancak daha az miktarda su kullanarak yüksek dayanımlı beton üretmek, düşük çimento ile işlenerek normal dayanımda beton üretmektir (Tuğrul-Tunç, 2019).

Dedeoğlu (2010) yüksek lisans tezinde normal, süper ve hiperakışkanlaştırıcılar betona maksimum oranlarda katılarak betonun dayanım, su emme oranları ve birbirleri arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Deneyler "şahit (katkısız) beton, normal akışkanlaştırıcılı beton, süper akışkanlaştırıcılı beton ve hiper akışkanlaştırıcılı beton" olmak üzere 4 farklı karışımla yapılmıştır. Betona akışkanlaştırıcılar katılarak kontrol betonuna nazaran daha az su oranı ve daha fazla dayanım gözlenmiştir. Öte yandan akışkanlaştırıcıların miktarı ve derecesi arttıkça betonun su emmesi azalır. Bu durum akışkanlaştırıcı kullanımının, yapılarda kullanılan betonun dayanımına, beton ve içindeki çeliğin iç ve dış etkilerden dayanımına olumlu etkiler yaptığını göstermektedir. Kimyasal akışkanlaştırıcılar, betonun dayanıklılığını arttırmakla birlikte daha düşük maliyetlerle betona sahip olabileceğimizi de bize göstermektedir. Kimyasal akışkanlaştırıcılar bu avantajları ile yapı sektörü ve kullanıcıları için daha güvenli ve ekonomik yapılar sunmaktadır (Dedeoğlu, 2010).

Teknojenik kökenli katkı maddelerinin en yaygın kullanılanları uçucu kül ve silis dumanının yanı sıra bunların kombine kullanımıdır (Lee ve ark., 2012, Rahul ve ark., 2019, Ji ve ark., 2022). Silis dumanı, silikon içeren alaşımların üretiminde fırınların gaz temizliği ile elde edilen ultra dispers aktif bir mineral katkı maddesidir, yani metalurji endüstrisinin bir atığıdır. Küresel partiküllerden oluşur, malzemenin ana bileşeni amorf silikon dioksittir. Çimentonun özgül yüzey alanından birkaç kat daha büyük

olan yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle, silis dumanı içeren betonlar daha yoğun ve daha kompakt bir yapıya sahiptir. Betonun sertleşmesi sırasında silis dumanı kalsiyum hidroksiti bağlayarak çimento taşının yapısını ilave hacimlerde kalsiyum hidrosilikat C-S-H ile sıkıştırır ve hidratasyon sürecini hızlandırır (Puzatova ve ark., 2023). Küçük miktarlarda silis dumanı ilavesinin, özgül yüzeyin yüksek değerlerinde parçacıkları arasında toplam itici kuvvetlerin oluşması nedeniyle karışıma plastikleştirici bir etki kazandırmaya katkıda bulunduğu bilinmektedir (Velichko ve Shumilina, 2020). Ayrıca, mikrosilika katkı maddelerinin betonlara eklenmesi, mukavemet özelliklerini, donma direncini, su direncini ve kimyasal direnci artırır ve ayrıca korozyonu ve malzeme yüzeyinde çiçeklenme oluşumunu azaltır.

Uçucu kül, 50 yılı aşkın bir süredir dünya çapında beton endüstrisinde, öncelikle Portland çimentolu betonda mineral katkı maddesi olarak ve ayrıca harmanlanmış çimentonun bir bileşeni olarak başarıyla kullanılmaktadır (Bouzoubaâ ve ark., 1999). İlk kullanımıyla ilgili olarak, uçucu kül Portland çimentosunu kısmen ikame edebilir ya da santralde hazır betona ilave olarak uygulanabilir (Siddique ve Khatib, 2010, Siddique 2011). Bununla birlikte, çimento tamamlayıcı malzemelerin kullanımının beton endüstrisinin sürdürülebilirliğini desteklediği genel olarak kabul edilmektedir.

Betonda çimento yerine uçucu kül kullanılması doğal kaynak tüketimini azaltmakta, çevre kirliliğini azaltmakta ve daha pahalı olan çimentonun uçucu kül ile ikame edilmesi sayesinde ekonomik olmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından yapılan son araştırmalar, uçucu kül gibi mineral katkı malzemelerinin betonda kullanımının

güvenilir ve aynı zamanda ekonomik olduğunu ortaya koymuştur (Rao ve Rao, 2020).

Begimgil (2002) çalışmasında silis dumanı ve uçucu küllü betonların basınç dayanımı, akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı ile birlikte incelenmiştir. Ayrıca bazılarının betonun mikroyapısı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. İki tip test serisi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde süperakışkanlaştırıcı katkılı %5 ila %10 oranında değişen silis dumanı ve %25 ila %55 oranında uçucu kül kullanılmıştır. 3., 7. ve 28. günlerinde basınç altında test edilen silindirik numuneler için tipik basma gerilme-deformasyon eğrileri ($\sigma - \varepsilon$) çizilmiş ve elastisite modülü belirlenmiştir. Silika dumanı ve uçucu külün basınç dayanımına, zamanla basınç dayanımı kazanımına ve elastisite modülüne etkileri araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Bazılarının mikro yapıları SEM/EDS sistemi ile incelenmiştir. Daha sonra mikroyapısal özellikler karşılaştırılmıştır. Silis dumanı ve uçucu külün beton performansını nasıl olumlu yönde etkilediği gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca optimum oranları belirlenmiştir (Begimgil, 2002).

Sümer ve Söyler (2002) ise yüksek dayanımlı beton kullanımının Dünya genelinde yaygınlaştığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda, yüksek dayanımlı betonun özelliklerini ve önemini araştırmışlar ve bu öneme binaen yüksek dayanımlı beton üretimi yapmışlardır. Ayrıca, ülkemizde bugüne kadar yaşanmış olan depremlerde betonarme yapıların hasar alması ve yıkılmasında başlıca nedenin beton basınç dayanımının projede öngörülenden düşük olduğu belirtilmiştir. “Yüksek dayanımlı beton üretiminde çimento ve beton katkı maddelerinin etkinliği” deneysel çalışma yoluyla incelenmiştir. Bu yöntemle, 7 günlük basınç dayanımı 80

Mpa'nın üzerinde olan beton numuneleri üretilmiştir. Yapılan bu çalışma BS60-80 dolaylarında beton sınıflarının ekonomik olarak üretilebileceğini göstermiştir (Sümer ve Söyler, 2002).

Anwar (2010) yüksek lisans tezinde yüksek dayanımlı beton üretimi için deneysel bir çalışma yapmıştır. Silis dumanı, uçucu kül ve akışkanlaştırıcı katkılar kullanılarak 9 set beton numunesi üretilmiştir. Her seri bir, üç, yedi, yirmi sekiz, elli altı ve doksanıncı günlerde test edilip bu serilerin basınç dayanımı kazanımları kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre, uçucu kül betonun işlenebilirliğine ve uzun vadede basınç dayanımına olumlu etkiler yaparken, silis dumanının taze betonun işlenebilirliğini negatif yönde etkilediği görülmüştür. Fakat silis dumanının beton basınç dayanımına kısa vadede oldukça iyi yönde etki ettiği gözlemlenmiştir (Anwar, 2010).

Topçu ve ark. (2006) ise Türkiye'de en popüler kimyasal katkı maddesinin akışkanlaştırıcılar olduğunu belirtmişlerdir. Basınç dayanımı 20 Mpa olan sınıftaki betonlarda orta akışkanlaştırıcı tercih edilmekteyken, C25 sınıfında ise süper akışkanlaştırıcı kullanılmaktadır. Kimyasal katkı kullanılan betonlarda işlenebilirlik artmakta, su/çimento oranı düşmekte ve pompalanabilirlik artmaktadır. Kimyasal katkılar, betonda 20% oranında daha düşük su kullanımına imkan vermektedir. Betonların sahaya ulaşımının gecikmesinde yaşanan kıvam kayıpları su eklenmesi yöntemi ile telafi edildiğinde beton dayanımında düşüş gerçekleşmektedir. Bunun yerine kıvam kayıplarının akışkanlaştırıcı katkılar ile iyileştirilmesi önerilmektedir (Topçu ve ark., 2006).

Titiksh ve Wanjari (2022) çalışmasında, yeni bir hiper-plastikleştiricinin mevcudiyetinde F Sınıfı uçucu külün beton kaplamalarda ince agrega olarak kullanılma olasılığını araştırmayı amaçlamıştır. M40 sınıfı beton kaplamalar için nehir kumu ve agregalarla 350 kg/m3 OPC53 çimentosu içeren ve su/çimento oranı 0,4 olan bir kontrol karışımı hazırlanmıştır. Uçucu kül ile ince agrega ikamesi %25, %50, %75 ve %100 oranlarında gerçekleştirilmiş ve gerekli işlenebilirlik derecesine ulaşıldıktan sonra betonun fizyo-mekanik özellikleri belirlenmiştir. Tasarım maruz kalma koşulları altında beton kaplamaların uzun vadeli davranışını belirlemek için dayanıklılık çalışmaları da yapılmıştır. Nehir kumunun tam ikamesi olarak uçucu kül içeren betonlar, kontrol karışımına kıyasla üstün performans sergilemiştir. 3 günlük basınç dayanımında %35.36, eğilme dayanımında %9.10 ve çekme dayanımında %13.85'lik önemli bir artış ve su emmede %53.2'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Uçucu kül içeren numunelerde gözlemlenen daha yoğun birbirine kenetlenme, aynı zamanda, beton kaplamalar için çok önemli olan artan bir aşınma direnci sağlamıştır (Titiksh ve Wanjari, 2022).

Ardahanlı ve ark. (2021) araştırma makalesinde su çimento oranı sabit tutularak farklı oranlarda uçucu kül ilavesi ile elde edilen kendiliğinden yerleşen betonlar için erken yaşta ön ısıtmanın, beton hidratasyonuna etkisini ölçmüşlerdir. Ön ısıtmasız numunelerde uçucu kül yüzdesi arttıkça birim ağırlık artarken, katkı yüzdesine bağlı olmaksızın su kürü etkisinde kalan numunelerin birim ağırlıkları ön ısıtmalılardan daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, ön ısıtmasız numunelerin basınç dayanımının ön ısıtmalılardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

2.2.Katkıların Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde İstatistiksel Anlamlılığının Test Edilmesi

Mevcut betonarme yapılarda betonun basınç dayanımının belirlenmesi özellikle bazı durumlarda önemlidir. Bu tür yapılarda basınç dayanımını belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız test yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan karot, mevcut betonarme yapılarda basınç dayanımının belirlenmesinde tahribatlı bir yöntem olarak en yaygın kullanılan yöntemdir. Ancak belirlenen basınç dayanımının karot yönüne göre değişimi konusunda çok sayıda çalışma yapılmış olsa da tartışmalar devam etmektedir. Erdoğdu ve ark. (2020) çalışmasında uçucu kül (FA) ve silis dumanı (SF) içeren beton bloklar ve farklı maksimum boyutlarda agregalar üretilmiştir. Karışımlarda çimento yerine sırasıyla %20, %40 ve %60 oranında uçucu kül ve %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı kullanılmıştır. Beton blokların üretiminde maksimum agrega boyutları 16 mm ve 31,5 mm olan iki agrega kullanılmıştır. Beton bloklar 28 gün aralıklı olarak nemlendirilmiş çuval bezi ile örtülerek laboratuvar ortamında bekletilmiş ve daha sonra 10 cm çapında karotlar alınarak 20 cm yüksekliğinde kesilerek basınç dayanımı tayini yapılmıştır. Karot delme, döküm yönüne paralel ve dik olarak gerçekleştirilmiş ve daha sonra basınç dayanımları belirlenmiştir. Betonun basınç dayanımını belirlemek ve buna göre karşılaştırmalar yapabilmek için 15 cm'lik küpler de hazırlanmış ve test edilmiştir. Tüm karışımlarda, döküm yönüne paralel alınan mineral katkılı karot numunelerinin basınç dayanımı, döküm yönüne dik alınan karot numunelerine göre daha yüksektir. Elde edilen sonuçlara uygulanan ANOVA testinde, belirli sıcaklıklarda uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak üretilen betonun basınç dayanımı açısından maksimum agrega boyutunun (Dmax) ve

döküm yönüne göre karot delme yönünün istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür (Erdoğdu ve ark., 2020).

Şengün (2021) çalışmasında mineral katkı içeren taze ve sertleşmiş harç özelliklerine değişik türdeki kimyasal katkıların etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında farklı oranlarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren harç karışımlarına asgari ve azami olmak üzere iki farklı dozajda ve beş farklı çeşitte kimyasal katkı eklenerek 55 karışım oluşturulmuştur. Bu karışımlarla oluşturulan numuneler üzerinde deneyler yapılarak taze ve sertleşmiş harç özellikleri belirlenmiş ve sonuçlar istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Yapılan ANOVA analizinin sonucunda bu katkıların harç özelliklerine etkisinin anlamlılığı incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır (Şengün, 2021).

Tanyıldızı ve Şahin (2015) tarafından yapılan çalışmada, polimer ile güçlendirilmiş betonun yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ve ultrasonik darbe hızı üzerindeki deneysel parametrelerin önemi istatistiksel olarak incelenmiştir. Deneylerin ana parametreleri polimerizasyon tipi, silis dumanı yüzdesi ve ısıtma derecesi olarak seçilmiş ve numuneler üzerinde basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Faktörlerin basınç dayanımını nasıl etkilediğini gösteren deneysel parametrelerin anlamlılık düzeyleri varyans (Anova) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, betonun maksimum ultrasonik darbe hızının ve basınç dayanımının, 200 ºC'ye maruz kalan %5 silis dumanı katkılı polimer ile güçlendirilmiş betondan elde edildiğini göstermiştir (Tanyildizi ve Şahin, 2015).

Ubi ve ark. (2020), tepkiyi karışım bileşenlerinin oranlarının bir fonksiyonu olarak ifade eden Osadebe'nin regresyon modelini kullanarak polistiren hafif betonun 7., 14., 21. ve 28. gün basınç dayanımını ve su emmesini tahmin etmek için yeni modeller geliştirmiştir. Modeller mevcut veriler kullanılarak formüle edilip F istatistikleri ve olasılık grafikleri kullanılarak doğrulanmıştır. Belirli bir karışıma verilen tepkileri ve istenen tepki değerini veren karışımları belirlemek için dört bileşen geliştirilmiştir. Polistirenin kaba agrega ile kısmen yer değiştirmesinin etkisi de incelenmiştir. Özellikler üzerinde en büyük etkiye çimento ve su sahiptir. Polistiren hafif betonun yapısal özelliklerinin, polistiren kısmen kaba agrega ile değiştirildiğinde azaldığı gözlemlenmiştir. Optimum değiştirme, betonun basınç dayanımındaki bir azalma ile gerçekleşmiştir (Ubi, ve diğerleri, 2020).

3. Materyal ve Yöntem

Yukarıda listelenen bulgulara bakıldığında ve deprem ülkesi olan Türkiye'de yüksek dayanımlı beton üretiminin önemi düşünüldüğünde, yüksek dayanımlı beton üretiminde daha efektif oranları yakalamak adına bu çalışmada, kimyasal ve mineral katkıların yüksek dayanımlı beton üretimindeki etkisini ölçmek üzere deneysel yöntem uygulanmış ve sonuçları istatistiksel analizler yoluyla değerlendirilmiştir.

3.1. Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler aşağıda listelenmiştir:

Çimento: CEM I PÇ 42,5 BAŞTAŞ Çimento

Agrega: Ankara Kutludüğün Kırmataşı

Su: Temiz içme suyu.

Kimyasal Katkılar:

Süper akışkanlaştırıcı: RH 737.

Hiper akışkanlaştırıcı: GLN C 303.

Mineral Katkılar:

Silis dumanı.

Uçucu kül.

Deneyde CEM I PÇ 42,5 BAŞTAŞ Çimento kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 3,13 gr/cm3 ve Priz başlangıcı ve sonu sırasıyla 136 ve 191 dakikadır. Çimentonun Blaine özgül yüzey değeri 3552 cm2/g olarak tespit edilmiştir. Silis dumanı Norveç'ten sağlanmış olup, özgül ağırlığı ve birim ağırlığı sırasıyla 2,2 g/cm3 ve 600 kg/m3'tür.

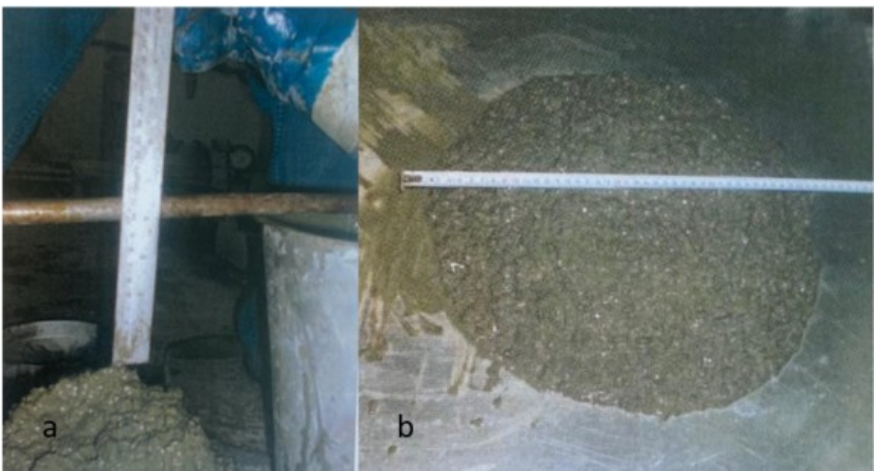
Uçucu kül, Çatalağzı'ndan sağlanmış olup özgül ağırlığı 2090 kg/m3'tür. Süper akışkanlaştırıcı olarak YKS marka RHEOBUILD 737 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hiper akışkanlaştırıcı olarak ise yine YKS marka Glenium C 303 hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agrega Ankara Kutludüğün Kırmataşıdır.

3.2. Numune Hazırlığı

Numuneler, belirli oranlarda çimento, agrega, su ve katkı maddeleri kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle kontrol numunesi olan D578 oluşturulmuş ve ardından süper akışkanlaştırıcı (RH 737) katkılı D579 ve hiper akışkanlaştırıcı (GLN C 303) katkılı D580 numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra silis dumanı ile ikameli

numuneler (D581, D582, D583) ve silis dumanı ile uçucu kül ile ikameli numune (D584) oluşturulmuştur.

Tüm numunelerde çökme (slump) miktarı 11-13 cm arasında tutulmuştur. Mineral katkısız Glenium C 303 hiper akışkanlaştırıcılı D580 betonunda çökme değil yayılma değeri ölçülmüştür. Silis dumanı ilave ettikçe bağlayıcılık arttığından dolayı diğeri hiper akışkanlaştırıcılı beton numunelerinde yayılma olmamıştır. Yine bu numunelerde çökme değeri belirlenen aralıkta sonuç vermiştir. Çökme ve yayılma değerlerinin okunmasına ilişkin görseller Şekil 1'de verilmektedir. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi, şişlenmesi, tokmaklanması ve etiketlendirilmesiyle ilgili görseller ise Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1 (a) Çökme değerinin ve (b) yayılma değerinin okunması

Şekil 2 (a) Birinci tabakanın doldurulması ve tokmaklanması (b) İkinci tabakanın doldurulması ve şişlenmesi (c) Doldurulmuş kalıpların mala ile perdahlanması (d) Etiketlendirilmiş beton numuneleri

3.3. Numune Etiketleme

Her bir numune, belirli bir katkı maddesi oranına sahip olduğu için etiketlenmiştir. Örneğin, D579 numunesi, süper akışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanmıştır ve bu nedenle "D579" olarak etiketlenmiştir.

Öncelikli olarak, hiçbir katkı maddesi olmayan sadece çimento, agrega ve sudan oluşan bir kontrol numunesi hazırlanmıştır. Bu betona fabrikadaki sıraya göre D578 ismi verilmiştir. Daha sonra çimento, agrega , su ve 1,70% oranında RH 737 isimli süper akışkanlaştırıcı katkılı D579 numunesi oluşturulmuştur. 3. numune ise çimento, agrega, su ve 1,40% oranında GLN C 303 isimli hiper akışkanlaştırıcı katkılı D580

betonu olmuştur. Daha sonra çimento, agrega, su, hiper akışkanlaştırıcı ve sırasıyla %6, %9, %12 silis dumanı ikameli D581, D582, D583 numuneleri hazırlanmıştır. Son olarak ise %6 silis dumanı ve 20% uçucu kül ikameli D584 betonu oluşturulmuştur. Bu beton numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Karışım oranları ve dayanım sonuçları Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Karışım oranları ve dayanım sonuçları

	İkame oranları (%)				Basınç dayanımları (MPa)			
Numune	süper akışkanlaştırıcı	hiper akışkanlaştırıcı	silis dumanı	uçucu kül	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
D578	0	0	0	0	31,8	37,7	50,4	54,3
D579	1,7	0	0	0	45,2	50,3	56,1	60,5
D580	0	1,4	0	0	53,4	59,9	60,0	73,3
D581	0	1,4	6	0	53,1	57,2	72,7	75,5
D582	0	1,4	9	0	51,8	59,4	70,3	79,2
D583	0	1,4	12	0	51,5	60,2	72,7	79,9
D584	0	1,4	12	20	58,6	58,0	75,4	80,9

3.4. Deney Yöntemi

Hazırlanan beton numuneleri, 3, 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Bu testler, ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için

belirli yaşlardaki basınç dayanımı değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

3, 7, 28 ve 90 günlük yaşlara erişmiş olan beton numuneleri kür havuzundan çıkartılıp yüzeylerindeki ıslaklık kuru bir havlu ile silindikten sonra tartılarak ağırlığı tespit edilip kırıma hazır hale getirilmiştir. Numuneler, beton pres makinesinin başlıklarına göre merkezi şekilde titizlikle yerleştirildi. Kırım sonlandığında maksimum yük ve dayanım değerleri bilgisayardan okundu. İlgili görseller Şekil 3'te görülmektedir. Basınç dayanımı (σ) aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\sigma=F/Ac$$

F: Deney presinde kırılma anında okunan maksimum yük (N veya kg)

Ac: Numune kesit alanı (mm2 veya cm2)

Şekil 3 (a) Kırıma hazır beton numuneleri, (b) Beton numunesinin tartılması, (c) Beton numunesinin pres makinesine yerleştirilmesi, (d) Kırımın gerçekleştiği yük ve dayanım değerlerinin okunması

3.5. Veri Analizi

Elde edilen veriler, istatistiksel analizler ve karşılaştırmalar için uygun yöntemlerle değerlendirilmiştir. Numuneler arasındaki basınç dayanımı farklarını belirlemek için uygun istatistiksel testler kullanılmıştır.

4.Bulgular ve Tartışma

4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 4'te sunulan verilere göre, farklı katkı maddelerinin beton numuneleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Kontrol numunesi (D578) ile karşılaştırıldığında, süper akışkanlaştırıcı (D579) ve hiper akışkanlaştırıcı (D580) katkıların basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, silis dumanı ve uçucu kül katkılı numunelerin (D581, D582, D583, D584) basınç dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür.

Şekil 4 ve Şekil 5'te yer alan grafik verilerini kullanarak, ikame oranlarına göre belirlenen katkı maddelerinin beton numunelerinin basınç dayanımlarını değerlendirebiliriz. İşte verilere dayalı olarak elde edilen sonuçlar:

Süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanıldığında:

Süper akışkanlaştırıcı katkılı D579 numunesinde katkısız betona göre (D578) 3 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanımı artmıştır.

Hiper akışkanlaştırıcı (HA) kullanıldığında:

Hiper akışkanlaştırıcı katkılı D580, D581, D582 ve D583 numunelerinde, süper akışkanlaştırıcı katkılı numuneye göre 3 günlük, 7 günlük, 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanımı artmıştır.

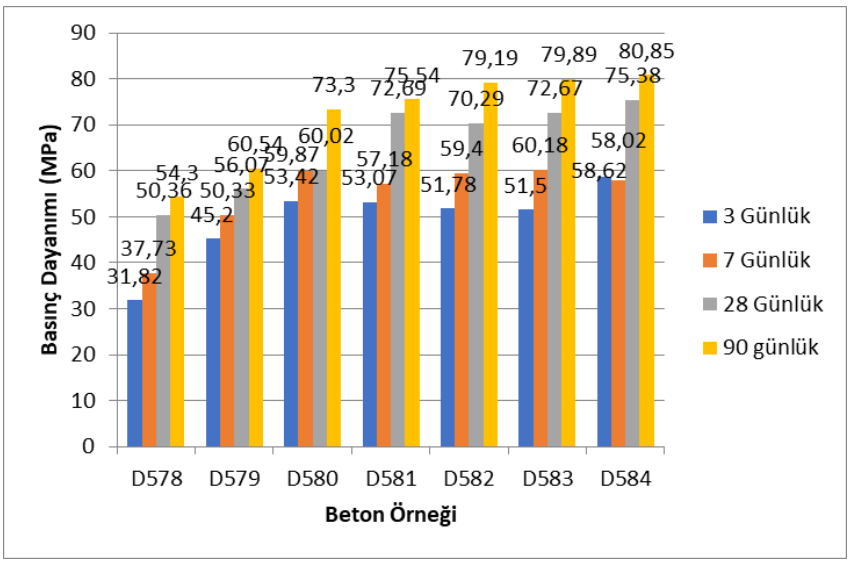
Silis dumanı (SD) kullanıldığında:

D581, D582, D583 numunelerinde, silis dumanı ikame oranı arttıkça 3 günlük basınç dayanımı düşmekte olup, 7 günlük, 90 günlük basınç dayanımlarında artış gözlenmektedir. 28 günlük basınç dayanımında ise dalgalanma mevcuttur.

Uçucu kül (UK) kullanıldığında:

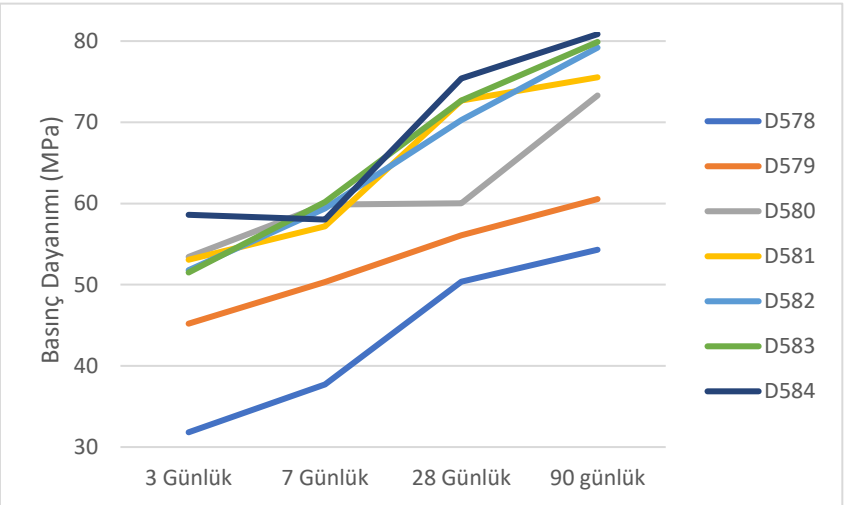
D584 numunesinde, aynı oranda hiper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı içeren D583 numunesine göre 3 günlük, 28 günlük ve 90 günlük basınç dayanımı artmıştır. Ancak 7 günlük basınç dayanımında bir düşüş gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 80,85 MPa değer ile D584 betonunun 90 günlük numunesine aittir.

Bu sonuçlar, farklı katkı maddelerinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Özellikle, süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin uygun oranlarda kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini artırabileceğini göstermektedir.

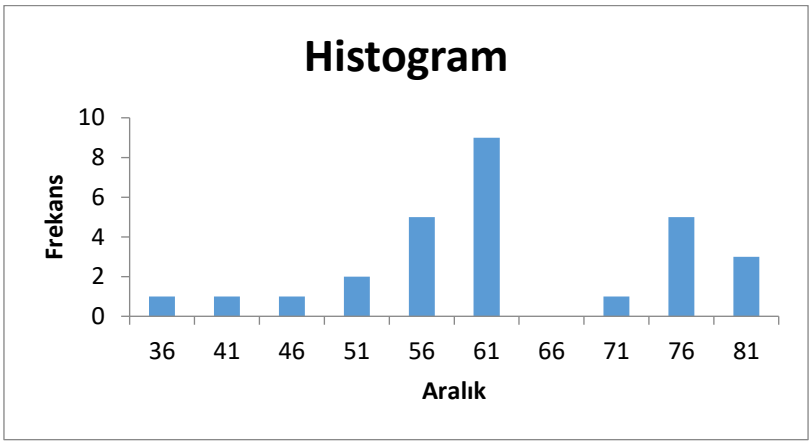


Şekil 4. 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları

Görüldüğü üzere, katkısız beton ve sadece süper akışkanlaştırıcı katkılı betonun basınç dayanımlarında zamana bağlı göreceli olarak daha lineer bir artış gözlemlenirken, hiper akışkanlaştırıcı katkılı beton numunelerinin 7 günden sonraki basınç dayanım artışları daha yüksek olmaktadır. Ayrıca görülmektedir ki silis dumanı oranı arttıkça uzun vadeli basınç dayanımı yüksek hale gelmektedir.



Şekil 5. 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı eğrileri



Şekil 6 Numune Basınç dayanımı sonuçları histogram grafiği

Deney sonuçlarına dayanarak yapılan histogram grafiği (Şekil 6), aralıklara göre frekansların dağılımını göstermektedir. Her bir aralık, belirli bir basınç dayanımı değerini temsil ederken, frekans ise o aralıkta bulunan gözlem sayısını ifade etmektedir.

Grafiği yorumlamak için şu noktalara dikkat edebiliriz:

En sık görülen değerler: Grafiğe bakıldığında, en yüksek frekansa sahip olan aralık 56-61 aralığıdır. Bu, veri setinde bu aralıktaki basınç dayanımı değerlerinin diğerlerine göre daha sık gözlemlendiğini gösterir.

Dağılımın genişliği: Veri setindeki basınç dayanımı değerleri, 36 ile 81 arasında değişmektedir. Bu dağılım oldukça geniştir ve farklı basınç dayanımı seviyelerini içerir.

Tekil ve tekrar eden değerler: Bazı basınç dayanımı değerleri yalnızca bir kez gözlenirken (tekil değerler), diğerleri ise daha sık tekrarlanır (tekrar eden değerler). Örneğin, 61-66 aralığında

herhangi bir değer gözlenmezken, 51-56 ve 71-76 aralığındaki değerler sırasıyla 5 ve 3 kez gözlenir.

Genel dağılım: Grafik genel olarak sola doğru çarpıktır, yani daha düşük basınç dayanımı değerlerinin daha sık gözlemlendiği görülür. Ancak, sağ tarafa doğru uzanan bir kuyruk da bulunmaktadır, yani daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin de mevcut olduğunu gösterir.

Sonuç olarak, histogram grafiği veri setindeki basınç dayanımı değerlerinin dağılımını ve frekanslarını görsel olarak temsil eder. Bu analiz, veri setinin özelliklerini ve dağılımını daha iyi anlamamıza yardımcı olur.

4.2. Katkı Maddelerinin Etkisi

Süper akışkanlaştırıcı ve hiper akışkanlaştırıcı gibi su azaltıcı katkı maddeleri, betonun iç yapısını iyileştirerek basınç dayanımını artırmaktadır. Bu katkı maddeleri, su-çimento oranını azaltarak suyun beton içerisindeki hareketliliğini sınırlar ve betonun dayanıklılığını artırır.

Silis dumanı ve uçucu kül gibi mineral katkılar ise hidratasyon sürecini iyileştirir ve betonun mekanik özelliklerini artırır. Bu katkılar, betonun iç yapısında ince gözenekler oluşturarak betonun sıkıştırılabilirliğini artırır ve bu da basınç dayanımını artırır.

4.3. İstatistiksel Analiz ile Katkı Maddelerinin Optimum Kullanımının Belirlenmesi

Elde edilen veriler, kullanılan katkı maddelerinin beton numunelerinin basınç dayanımı üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermektedir. İstatistiksel analizler, farklı katkı maddelerinin betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ve belirli

koşullar altında belirli katkı maddelerinin daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmanın sonuçları, farklı katkı maddelerinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini anlamak ve optimum kullanım koşullarını belirlemek için değerli bir kaynak sağlamaktadır. Süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve uçucu kül gibi katkı maddelerinin uygun konsantrasyonlarda kullanılması, yapısal betonun performansını artırabilir ve dayanıklılığını güçlendirebilir.

Karışımlar içerisinde yer alan katkı maddelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımına etkisi istatistiksel olarak incelendiğinde Tablo 2'de görüldüğü üzere oldukça yüksek R^2 değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu modelin anlamlı olduğuna işaret etmektedir. Bunun yanında, hem sabit değerin, hem de süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve uçucu kül etkilerinin anlamlı olduğu t ve sig. parametrelerine bakılarak anlaşılmaktadır. 3 günlük basınç dayanımında tüm katkı maddelerinin anlamlı şekilde basınç dayanımına etki ettiği görülmektedir. Anlamlılığı en az olan silis dumanı negatif değer almıştır. Yani silis dumanı eklendikçe 3 günlük basınç dayanımında ters etki meydana gelmektedir. 7 günlük basınç dayanımı modellerine bakıldığında ise silis dumanı ve uçucu külün istatistiksel olarak anlamlılığı düşüktür. 28 günlük dayanımlarda hiper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı etkileri anlamlı gözükmektedir. 90 günlük basınç dayanımında ise diğer tüm katkı maddelerinin anlamlılığı yüksek iken, uçucu külün anlamlılık değeri göreceli olarak düşüktür. Tüm bu modeller incelendiğinde, 90 günlük basınç dayanımının sabit değişken, süperakışkanlaştırıcı, hiperakışkanlaştırıcı ve silis dumanının bir denklemi olarak

yazılabildiği görülmektedir. Bu denklem aşağıdaki şekilde verilebilir:

90 günlük basınç dayanımı (Mpa): P90 = 54,3+3,647xSA+13,288xHA+0,623xSD

Diğer modellere ilişkin veriler detaylı şekilde Tablo 9'da verilmektedir. Burada SEE: Standard error of the estimate (tahmini değerin standart hatası), R^2: regresyon katsayısı, ANOVA sum of squares: toplam kareler toplamı, F ve sig değerleri ise anlamlılık katsayılarını göstermektedir. Yukarıdaki formulde ise SA: süper akışkanlaştırıcı, HA: hiper akışkanlaştırıcı, SD: silis dumanını ifade etmektedir. Uçucu kül ise UK ile gösterilebilir.

Tablo 2. Basınç dayanımlarına ilişkin istatistiksel modeller

Modeller	*Model3-1*		*Model3-2*		*Model7-1*		*Model7-2*	
SEE	*0,44*		*0,94*		*1,65*		*1,29*	
R2	*0,999*		*0,994*		*0,987*		*0,984*	
ANOVA sum of squares	*451,877*		*451,877*		*404,874*		*404,874*	
ANOVA F	*583,536*		*169,520*		*36,646*		*120,097*	
Anova Sig	*0,002*		*<,001*		*0,027*		*<,001*	
Değişkenler	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*
Sabit	*31,800*	*0,000*	*31,800*	*0,000*	*37,700*	*0,002*	*37,700*	*0,000*
süperakışkanlaştırıcı	*7,882*	*0,002*	*7,882*	*0,002*	*7,412*	*0,033*	*7,412*	*0,002*
hiperakışkanlaştırıcı	*15,567*	*0,001*	*14,750*	*0,000*	*15,188*	*0,011*	*15,171*	*0,000*
silis dumanı	*-0,170*	*0,076*	*-*	*-*	*0,031*	*0,881*	*-*	*-*
uçucu kül	*0,352*	*0,006*	*0,308*	*0,010*	*-0,067*	*0,587*	*-*	*-*

Modeller	*Model28-1*		*Model28-2*		*Model90-1*		*Model90-2*	
SEE	*3,75*		*3,36*		*1,00*		*0,90*	
R2	*0,951*		*0,921*		*0,997*		*0,996*	
ANOVA sum of squares	*571,234*		*571,234*		*652,917*		*652,917*	
ANOVA F	*9,659*		*23,307*		*163,103*		*266,981*	
Anova Sig	*0,096*		*0,006*		*0,006*		*<,001*	
Değişkenler	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*	*Beta*	*Sig*
Sabit	*50,400*	*0,005*	*53,250*	*0,000*	*54,300*	*0,000*	*54,300*	*0,000*
süperakışkanlaştırıcı	*3,353*	*0,395*	*-*	*-*	*3,647*	*0,048*	*3,647*	*0,017*
hiperakışkanlaştırıcı	*8,314*	*0,149*	*6,179*	*0,087*	*13,363*	*0,005*	*13,288*	*0,001*
silis dumanı	*1,020*	*0,137*	*1,067*	*0,033*	*0,588*	*0,035*	*0,623*	*0,006*
uçucu kül	*0,056*	*0,835*	*-*	*-*	*0,042*	*0,575*	*-*	*-*

4.5. Uygulama ve Gelecek Araştırmalar

Bu çalışma, beton endüstrisinde katkı maddelerinin etkin kullanımını desteklemektedir. Gelecekteki araştırmalar, farklı katkı maddelerinin etkileşimlerini ve karmaşık beton karışımlarının performansını daha detaylı bir şekilde incelemeyi hedeflemelidir.

5. Sonuçlar

Geleneksel bileşenlerle yapılan beton karışımları ile önemli yapısal uygulamalarda ihtiyaç duyulan performans düzeyine ulaşmak imkansızdır. Son yıllarda yapılan birçok çalışmada çeşitli kimyasal ve mineral katkı maddelerinin problemin çözümünde rahatlıkla kullanılabileceği yönünde öneriler bulunmaktadır. Bu maddeler özellikle zararlı çevre koşullarının hüküm sürdüğü ortamlarda ve Türkiye gibi deprem kuşağı olan bir ülkede bu anlamda önemli faydalar sağlamaktadır. Kimyasal ve mineral katkıların yardımıyla betonun fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilip güçlendirilmekte ve bir bakıma yeterli performans garanti edilmektedir.

Çalışmada elde edilen dayanımların, katkısız betona göre çok yüksek olduğu görülmüştür. Fakat hangi katkının hangi diğer katkılarla, hangi oranda kullanıldığı da dayanımda çok etkili rol almaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle katkısız şahit beton hazırlanmış olup daha sonraki karışımlarda sırasıyla %1,70 oranında süper akışkanlaştırıcı, %1,40 oranında hiper akışkanlaştırıcı ve hiper akışkanlaştırıcı oranı sabit olmak kaydıyla %6, %9 ve %12 oranlarında silis dumanı içeren ve son olarak da %6 silis dumanı ve 20% uçucu kül ikameli örnek betonlar oluşturulmuştur. Hem akışkanlaştırıcı katkıların hem de silis dumanı ve uçucu külün beton basınç dayanımını olumlu etkilediği not edilmiştir. Bu sayede 90 günlük basınç dayanımı 80 MPa üzerine çıkan beton üretilebilmiştir.

İstatistiksel olarak değerlendirildiğinde, her katkı maddesinin etkisinin farklı yaşlardaki beton numuneleri üzerinde anlamlılığı değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, uçucu külün 90 günlük basınç dayanımı üzerine etkisinin anlamlılığı görece düşük iken 3

günlük basınç dayanımı üzerindeki etkisinin anlamlılığı yüksek görünmektedir. Tüm bu istatistiksel analizler incelendiğinde, 90 günlük basınç dayanımının; sabit değişken, süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı ve silis dumanının bir denklemi olarak yazılabildiği görülmektedir.

Analiz sonuçlarına göre, sabit değişkenin, süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı, silis dumanı ve uçucu kül etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. 3 günlük basınç dayanımında tüm katkı maddelerinin etkisinin anlamlı olduğu, ancak silis dumanının negatif etkisinin olduğu belirtilmiştir. Bu, silis dumanının 3 günlük basınç dayanımını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

7 günlük basınç dayanımı modellerine bakıldığında silis dumanı ve uçucu külün istatistiksel olarak anlamlılığının düşük olduğu belirtilmiştir. Bu durum, bu katkı maddelerinin 7 günlük basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını gösterebilir.

28 günlük basınç dayanımında ise hiper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı etkilerinin anlamlı olduğu belirtilmiştir. Bu, bu katkı maddelerinin beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımını olumlu yönde etkileyebileceğini gösterir.

Son olarak, 90 günlük basınç dayanımında diğer tüm katkı maddelerinin anlamlılığı yüksekken, uçucu külün anlamlılık değerinin göreceli olarak düşük olduğu belirtilmiştir. Bu, uçucu külün diğer katkı maddelerine göre 90 günlük basınç dayanımı üzerinde daha az etkili olduğunu gösterebilir.

Tüm bu bulgulara dayanarak, 90 günlük basınç dayanımının sabit değişken, süper akışkanlaştırıcı, hiper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı arasındaki bir denklemle ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu denklem, beton numunelerinin 90 günlük basınç dayanımını tahmin etmek için kullanılabilir ve yapı endüstrisinde uygulama açısından önemli bir bilgi sağlayabilir.

Sonuç olarak, katkı maddeleri, kötü tasarım yapılmadığı sürece beton performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir ve elde edilen etkinlik, beton üreticisinin teknik bilgi ve deneyimi ile orantılıdır. Makul ve doğru bir çözüm bulmak burada çok önemlidir.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

Akman, M. S. (1987). Beton Katkı Maddelerinin Ana İşlevleri ve Yan Etkileri. İTÜ. İnşaat Fakültesi, Malzeme Seminerleri, İstanbul.

Anwar, I. I. (2010). Katkıların Beton Performansına Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 99s.

Ardahanlı, M., Oltulu, M., Alameri, I. (2021). Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri Üzerine Ön Isıtmanın Etkisi. Black Sea Journal of Engineering and Science, 4(3), 81-88.

Begimgil, M. (2002). Silica Fume, Fly Ash in High Performance Concrete and their Microstructural Overview. In: Innovations and Developments In Concrete Materials And Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002 (pp. 879-888). Thomas Telford Publishing.

Bouzoubaa, N., Min-Hong, Z., Malhotra, V. M., & Golden, D. M. (1999). Blended fly ash cements-A review. ACI Materials Journal, 96(6), 641-650.

De Maeijer, P. K., Craeye, B., Snellings, R., Kazemi-Kamyab, H., Loots, M., Janssens, K., & Nuyts, G. (2020). Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. Construction and Building Materials, 263, 120493.

Dedeoğlu, R. Ş. (2010). Akışkanlaştırıcı Katkı Maddelerinin Beton Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 65s.

Erdoğdu, Ş. (2005). Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing. Cement and Concrete Research, 35(5), 907-912. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.020

Erdoğan, S. T., Erdoğan, T. Y. (2007). Kimyasal katkı maddeleri ve tarihi geçmişleri. II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 23-34.

Erdoğdu, Ş., Nayir, S., Kandil, U., Kurbetci, Ş., Nas, M. (2020). Evaluation of the Dependency of the Compressive Strength of Concrete on The Core Drilling Direction Through Anova Test. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38(4), 1879-1895.

Ji, G., Xiao, J., Zhi, P., Wu, Y. C., & Han, N. (2022). Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates. Construction and Building Materials, 325, 126740.

Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and structures, 45, 1221-1232.

Pekmezci, B. Y., Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkılar: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. Hazır Beton Dergisi, Mayıs-Haziran, 69, 82.

Puzatova, A., Kogai, A., & Dmitrieva, M. (2023). Influence of mineral additives on the rheological and strength properties of fine-

grained concrete. In E3S Web of Conferences (Vol. 410, p. 01005). EDP Sciences.

Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019). Mechanical characterization of 3D printable concrete. Construction and Building Materials, 227, 116710.

Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. Materials & Design, 32(3), 1501-1507.

Siddique, R., & Khatib, J. M. (2010). Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete. Materials and Structures, 43, 709-718.

Sümer, M., & Söyler, B. (2002). Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Çimento ve Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(3), 15-20.

ŞENGÜN, E. (2023). Farklı kimyasal katkıların mineral katkılı taze ve sertleşmiş harç özelliklerine etkisi. Politeknik Dergisi, 1-1.

Tanyildizi, H., Şahin, M. (2015). Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. Construction and Building Materials, 79, 97-103.

Titiksh, A., Wanjari, S. P. (2022). Hyper-plasticizer dosed concrete pavers containing fly ash in lieu of fine aggregates - A step towards sustainable construction. Case Studies in Construction Materials, 17(e01338).

Topçu, İ. B. (1996). Akışkanlaştırıcı ve Dona Dayanım Katkılarının Beton Özelliklerine Etkisi, TMMOB, İMO, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 45-54.

Topçu, İ. B., Canbaz, M., Karakurt, C. (2006). Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı. Politeknik Dergisi, 9(1), 59-63.

Topçu, İ. B., Işıkdağ, B., Tatar, Ö. (2006). Eskişehir'de Hazır Beton Üretiminde Kullanılan Katkı Maddelerinin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkileri. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(1), 21-26.

Tuğrul Tunç, E. (2019). Kimyasal Katkılı Betonların Dayanım Özelliklerine Dayalı Bir Çalışma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (17), 901-908.

Ubi, S. E., Okafor, F. O., R.B, A., Akeke, G. A., Egbe, J. G., Nkra, P. O. (2020). Prediction of Comprehensive Strength and Water Absorption of Polystyrene Lightweight Concrete Using Osadebe's Regression Model. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 17(5), 58-71.

Velichko, E. G., & SHumilina, Y. U. (2020). S. K probleme formirovaniya dispersnogo sostava i svojstv vysokoprochnogo betona. Vestnik MGSU, 15(2), 235-243.

Venkateswara Rao, A., & Srinivasa Rao, K. (2020). Effect of fly ash on strength of concrete. Circular economy and fly ash management, 125-134.

Yazıcı, Ş. (2003). Süper Akışkanlaştırıcıların Betondaki Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkileri, DEÜ Mühendislik

Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt:5 Sayı: 1. http://acikerisim.deu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.12397/2605/13-10.pdf?sequence=1

Yıldırım, H., Yorulmazel, V. and Ardaç, E. (1996). Süper ve Normal Akışkanlaştırıcı Katkıların Çimento ile Uyuşumu, İMO, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 25-33.

BÖLÜM V

Mars Yapılarında Özel Tasarım Yükleri

Saffet KILIÇER[1]

Giriş

İnsanlık, Mars gibi bilinmeyen ve heyecan verici yeni gezegenler keşfetme ve kolonileştirme isteği, son yıllarda, Mars gezegeni araştırmaların odağı haline getirdi ve bu gezegene yönelik çalışmalar yoğunlaştı. Kızıl Gezegen, sadece bilimsel keşifler için değil, aynı zamanda insan yerleşimi için de büyük potansiyellere sahip. Ancak, Mars'ta sürdürülebilir ve güvenli yaşam alanları inşa etmek, Dünya'daki inşaatlarda karşılaşılan tasarım ve mühendislik zorluklarından çok daha farklı ve daha karmaşık bir dizi sorun sunuyor. Mars'taki yapı tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken geleneksel yüklerin yanı sıra, Mars'ın kendine özgü benzersiz atmosferik, doğal ve meteorolojik olayları da

[1] Araş.Gör.Dr., Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Merkez/Artvin, Orcid: 0000-0002-5445-0352, kilicer@artvin.edu.tr

bulunmaktadır. Gezegendeki bu koşullar, yapıların tasarımında özel yüklerin dikkate alınmasını gerektirir. Mars'taki yapıların tasarımında göz önünde bulundurulması gereken özel yükler arasında iç basınç, buz yükü, astroid ve mikrometeor çarpmaları ile toz birikimi ön plana çıkmaktadı.

Mars'ın oldukça ince atmosferi ve düşük yer çekimi, Mars yapılarının Dünya'dakilerden farklı şekillendirilmesi ve projelendirilmesi gerekliliğini hatırlatmaktadır. Örneğin, Mars'ın atmosferi neredeyse tamamen karbondioksitten oluşur ve atmosferik basınç Dünya'nınkinden çok daha düşüktür (UZAY, 2024). Bu durum, Mars yapılarının yapısal bütünlüğünü korumak ve yaşanabilir bir ortam sağlamak için iç basınç tasarımını oldukça kritik bir mesele haline getirir.

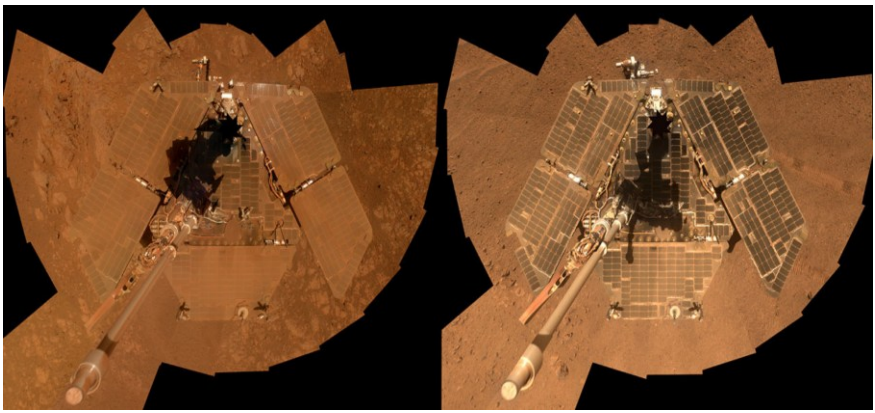
Bir diğer dikkat edilmesi gereken özel yük ise buz yüküdür. Halen büyük bir belirsizlik içeren ve günümüzde NASA ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından merak uyandırıcı keşifler ile ortaya çıkarılan buz depolarının varlığı her geçen gün artmaktadır. Yeraltı ve yerüstü buz depoları keşif araçları ve yörünge uyduları ile radar taramaları ile belirlenebilmektedir. Özellikle keşif araçlarının donanımsal ve malzemesel eksiklikleri nedeniyle henüz kutup bölgelerinde yeterince keşif yapamadığı bilinmektedir. Bu enlemlerde kurulacak ilk yapılar için buz yükü araştırmacılar tarafından merak uyandırmaktadır.

Astroid ve Meteor çarpmaları, Marsın ince atmosferi nedeniyle Mars yüzeyinde sürekli bir tehdit oluşturur. Bu küçük ve kontrolsüz ancak yüksek hızlı parçacıklar, bina malzemelerini zamanla aşındırabilir ve gittikçe yapısal zayıflamaya neden olabilir.

Ayrıca, Astroid ve Meteroidler atmosferi geçtikten sonra sadece Mars yapılarına isabet ettiğinde değil Mars yüzeyine düştüğünde toz fırtınasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, Mars yapılarının tasarımı, bu tür toz taneciklerine karşı dirençli malzemeler kullanılmasını ve etkili koruma stratejilerini içermelidir.

Son olarak, Mars'taki toz birikimi ciddi bir sorundur ve mekanik sistemlerin işlevselliğini bozabilir, enerji toplama sistemleri olan güneş panellerinin verimliliğini azaltabilir (Şekil 1).

Ayrıca rüzgâr tarafından taşınabilir ve yapılar üzerinde birikebilir ve katmanlar haline gelebilir. Bu nedenle, Mars yapılarının tasarımı toz birikimini en aza indirmeli ve kolay temizlenebilir olmalıdır. Ayrıca biriken tozun neden olabileceği yapısal yükleri idare edecek şekilde uygun bir şekilde tasarlanmalıdır. Bu durumda yapı tasarımda Mars tozunun dikkate alınması gereken bir parameter olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle Mars tozunun birikmesi ve katmanlaşması ile yapıların bazı bölgelerinde yük yığılmaları olacağı ve gerilme dağılımının bu duruma parallel değişeceği açıktır. Yapıların mimari tasarımlarıda toz birikiminin önüne geçebilecek şekilde olması gerekmektedir.



Şekil 1. 2008 yılında Mars'ta meydana gelen bir toz fırtınası sonrası NASA'nın Mars Keşif Aracı Spirit'in güneş panellerinin görünüşü (NASA/JPL Caltech/Cornell/Arizona State)

Şekil 1' de NASA's Mars Exploration Rover Spirit üzerinde toz birikimi öncesi ve sonrası görülmektedir. Mars gezegeni boyunca yaşanan toz fırtınaları keşif araçlarının çalışması için gerekli güneş panelleri için büyük sorun olmuştur. Belirli zamanlarda yaşanan toz fırtınaları ile asteroid ve meteor düşmeleri Mars yüzeyindeki kızıl tozları havaya kaldırarak düşük yer çekimi etkisiyle de havada tutunma süresinin artırarak keşif araçların üzerinde birikmektedir. Biriken bu tür malzemeler keşif araçlarının çalışmasını sekteye uğratma ve milyonlarca dolarlık projeler sonlandırılmak zorunda kalınmaktadır. Tüm bu durumlar Mars gezegeninde inşaa edilecek/kurulacak Mars yapıları ve tesisleri üzerinde birikerek benzer sorunlar yaratacaktır.

İnsanoğlu yukarıda bahsedilen tüm zorluklarla yeni bir gezegende başa çıkmak zorundadır. Yaşamın sürdürülebilmesi için gerekli barınma yerleri ve kurulacak tesisler yeni şartlar ile farklı

durumlar altında incelenmesi gereklidir. Yeni gezegene uyum ve insan kolonisinin Dünya'ya göre farklı atmosfer ve basınç koşulları altında hayatta kalabilmesi uzay inşaat mühendisliği içinde yeni zorluklar içerir. Gerek Mars hakkında kısıtlı bilgi gerekse de keşif aracı gönderme maliyetleri yıllarca uzay araştırmalarının gecikmesine neden olmuştur. Bu makalede, Mars'ta güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etme konusunda karşılaşılan geleneksel yüklerin yanı sıra özel tasarım zorluklarını da aşmak için ön hesaplamalarda kullanılacak yük formülasyonlarının literatürden derlenmesi ve yorumlanması gereklidir. Özellikle, uzay mühendislik biliminin gereği olarak, neredeyse her koşula uyum sağlayabilen, dayanıklı ve uzun ömürlü yapılar tasarlamak, Mars gezegeni şartlarında büyük zorunluluktur. İlerleyen başlıklarda her bir özel tasarım yükü ayrı ayrı açıklanmıştır.

Materyaller ve Methotlar

Araştırmacılar, Mars gezegeni ile ilgili yeni keşifleri ortaya çıkarmak için yüzey keşif araçları ve yörünge araçlarından faydalanmaktadılar. Yüzey keşif araçlarının üzerindeki çeşitli ve farklı araştırma materyalleri sayesinde sıcaklık, rüzgâr, atmosfer gözlemi, numune alımı ve sondaj gibi gözlemleri ve manevraları yapabilmektedirler. Bu kitap bölümünde de özellikle yüzey keşif araçları olan Sojourner (NASA, 1997), Spirit (NASA, 2004), Opportunity (NASA, 2004), Curiosity (NASA, 2012), Perseverance (NASA, 2021), Zhurong (CNSA, 2021) üzerindeki materyallerden ve çeşitli donanımlardan elde edilen çeşitli veriler kullanılmıştır. Yörünge araçlarında ise özellikle Mars Express (ESA, 2003)'in buz depoları ile ilgili verilerinden faydalanılmıştır. Yine yörünge araçlarından Mars Global Surveyor (NASA, 1996) ve Mars

Reconnaissance Orbiter (NASA, 2005) önemli bilgiler elde etmişlerdir.

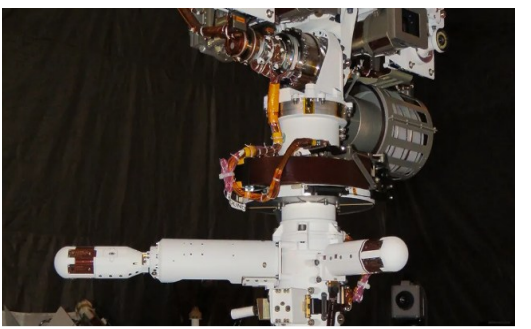
2021 yılında göreve başlayan Perseverance yörünge keşif aracının üzerinde bulunan enstrümanlar aşağıdaki gibidir;

• *Kameralar;* Mastcam-Z, Supercam.

• *Spektrometreler;* Sherloc, Gezegen X-Işını Litokimya Aracı (PIXL).

• *Çevresel Sensörler;* Mars Çevresel Dinamik Analizörü (MEDA), Mars Oksijen Yerinde Kaynak Kullanım Deneyi (MOXIE), Mars Yüzey Altı Radar Görüntüleme Deneyi (RIMFAX).

Yukarıda görüldüğü gibi her bir yörünge aracı üzerinde araştırma alanlarına göre çeşitli enstrumenler yer almaktadır. Bu enstrümenlar sayesinde veri toplanarak Dünya'ya iletilir. İletilen veriler araştırmacılar tarafından belirli yöntemler ile sayısallaştırılarak anlamlı hale getirilir. Bu duruma örnek bir keşif aracı olan Perseverance yörünge keşif aracında bulunan MEDA Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Mars Çevresel Dinamik Analizörü (MEDA)'nün görünüşü (NASA/JPL-Caltech)

Şekil 2'de Perseverance yörünge keşif aracı üzerinde bulunan MEDA enstrümanı görülmektedir. Bu keşif aracının ana amacı, Mars yüzeyinden hava durumunu ölçmek ve tozları sensörlerle izlemektir. Böylece Mars gezegeninde toz verileri ve atmosferik durumlar gün yüzüne çıkabilmektedirler. Diğer keşif ve yörünge araçlarından temin edilen veriler ile Mars gezegenine ait buz varlığı tespitleri oldukça önem arz etmektedir. ESA tarafından yapılan yer üstü ve yer altı keşiflerin buz depoları açısından ne denli önemli olduğunu ortaya koymuştur. Uzaktan yapılan gözlemler ile de meteor ve asteroid düşmeleri ya da hareketleri ile izledikleri yollar gözlemlenebilmektedir.

Aşağıdaki bölümlerde Mars yapıları için dikkate alınacak her bir özel yük ayrı ayrı irdelenmiştir. İlerleyen yıllarda teknolojinin daha fazla gelişmesi ve keşif araçların üzerindeki enstrumanların sayısı ve kalite artışı ile de yeni veriler araştırmacalara ulaşacaktır.

Bulgular ve Tartışma

Mars'taki yapılar için düşey ve yatay yüklerin yanı sıra gezegene özgü bazı yüklerin de dikkate alınması gerektiği yukarıda belirtilmişti. Bunlar: Basınç Etkisi, Toz Birikimi, Buz Yükü, Termal Gerilim, Asteroit ve Meteor Çarpmasıdır (Soureshjani vd., 2023). Aşağıda, Mars gezegenine özgü tüm bu yüklerle ilgili bulgular ve tartışmalar yer almaktadır.

Basınç Etkisi

İnsanoğlunun bedeni binlerce yıldır gezegenimizdeki belirli aralıklarla değişen atmosfer basıncına uyumlu olarak hayatta kalmayı başarmıştır. Deniz seviyesinde 1013,25 milibar olan atmosfer basıncı her 100 metrede yaklaşık 12 milibar düşmektedir.

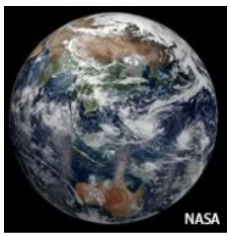
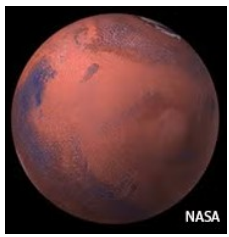
Everest dağı gibi zirvelerde atmosfer basıncı 300 milibarında altına düşmektedir. Mars gezegeninde atmosfer basıncı Dünya'dakinin % 0,1'i kadardır. Her gün Dünya'nın atmosferine ilişkin çok sayıda yer tabanlı, havadan ve uydu gözlemi yapılıyor ve örneğin hava tahminleri için Genel Sirkülason Modeli (GCM) başlangıç koşullarını sağlamak ve ayrıca kullanılan modelleme tekniklerini doğrulamak için kullanılıyor. Dünya dışındaki birçok gezegen için, kapsamlı bir GCM için gerekli olan ayrıntılı fiziksel modellemenin gerekçelendirilmesi şu anda zor olabilir (Lewis, 2003). Ancak Leovy ve Mintz (1969)'den sonra Zurek vd. (1992), Murphy vd. (1995) ve Haberle vd. (2003), MGCM'nin geliştirilmesi, o zamandan beri NASA Ames Araştırma Merkezi'nde devam etmektedir ve Mars havası ve iklimi hakkında birçok içgörü sağlamıştır. Tüm araştırmalar ve simülasyonlar neticesinde Mars gezegeninde de Dünya'ya benzer olarak yüksek kesimlerde atmosfer basıncının azaldığı düzlük alanlarda ise gezegenin en fazla atmosfer basıncına ulaşıldığı anlaşılmaktadır Ancak gezegenin heryerinde atmosfer basıncını ölçmek şu an için büyük zorluklar içermektedir. İnsansız keşif araçları ile yapılan ölçümler bu araçların gidebildiği yerler ile sınırlı alanları kapsamaktadır.

Mars gezegeninde bulunan Olimpos dağı, Güneş sisteminde bilinen en yüksek dağıdır (NASA, 2024). Bu dağ, Dünyanın en yüksek noktası Everestin zirvesinden yaklaşık 3 kat daha yüksektir. Bu durumda dağ eteklerinde ve yüksek kesimlerde atmosfer basıncının çok düşük olacağını göstermektedir. Hâlihazırda Mars gezegeni düzlük arazilerinde dahi ince atmosfer nedeniyle su kararlı hale geçememektedir. Bu nedenle Mars gezegeninde uzun zaman

geçirecek insanlar bu atmosfer basınca ve çevre koşullarına uyum sağlayabilmesi için koruyucu kıyafetler giymek zorundadır.

Mars gezegeni ile Dünya atmosferinin içerisinde bulunan çeşitli gazlarının yüzdesel miktarının karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Dünya ve Mars atmosferlerindeki gazların bir karşılaştırması (UCAR, 2024)

		
Atmosfer Gazları	**Dünya**	**Mars**
Karbon Dioksit (CO_2)	0.03%	95%
Nitrojen (N_2)	78%	2.7%
Oksijen (O_2)	21%	0.13%
Argon (Ar)	0.9%	1.6%
Methan (CH_4)	0.002%	0

Genel olarak, her iki atmosfer de benzer gazları içermesine rağmen, miktarları önemli ölçüde farklılık gösterir ve bu da Dünya ve Mars'taki çevresel koşulların büyük ölçüde farklı olmasına neden olur. Karbondioksit her ne kadar her iki gezegenin atmosferinde bulunsada Dünya'da karbondioksit miktarı artması sera etkisi yarattığı için insan yaşam süreci ve iklim değişimiyle ilgili olumsuz

yönde sonuçları vardır. Mars'da ise bu durum gezegenin genel koşullarını belirliyen bir etmendir.

Azot miktarı gezegenler arasında farklılık gösterse de Dünya'da azot yaşamın sürdürülebilmesi için kritik öneme sahiptir. Mars gezegeninde ise azotun etkileri daha sınırlıdır (Avice vd. 2018; Hu ve Thomas, 2022; Manning vd. 2009). Sonuç olarak, yukarıdaki tüm durumlar düşünüldüğünde Mars'ın ince atmosferi, yapı tasarımı ve inşasında önemli mühendislik zorlukları ortaya koymaktadır ve bu zorlukların üstesinden gelmek için yenilikçi mühendislik çözümlerine her aşamada ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı yapı tasarımları öne sürülmüştür. Bunlardan bazıları ön plana çıkmıştır. Tummalapalli vd. (2020), Eşitlik 1, 2 ve 3'de sırasıyla şişirebilir yapılar için gerilimi formülasyonlarını önermişlerdir.

Yarı silindirik yapı için çevresel gerilim (hoop stress);

$$\sigma\theta = \frac{P \times r}{t} \tag{1}$$

Yarı silindirik yapı için boyuna gerilim (longitudinal stress);

$$\sigma L = \frac{P \times \pi \times r}{2t \times (2+\pi)} \tag{2}$$

Yarım küresel kubbe için membran gerilimi (membrane stress);

$$\sigma m = \frac{P \times \pi \times r}{2t \times (2+\pi)} \tag{3}$$

Yarı silindirik yapı için çevresel gerilim, $\sigma\theta$, Yarı silindirik yapı için boyuna gerilim, σL, Yarım küresel kubbe için membran gerilimi, σm, Yarım kürenin iç basıncı, P, Yarım kürenin yarıçapı, r, duvar kalınlığı, t.

Toz Birikimi

Mars yüzeyinde toz tanışımı ve birikimi ile havada asılı kalma süresindeki artış Dünya'ya nazaran çok sık rastlanan doğa olayıdır. Mars tozunun davranışını ve yer değiştiriş şeklini anlamak ileride yapılarda ya da her türlü sabit/hareketli nesnelerin güneş ışığına ulaşım süresini artırmada etkili olacaktır. Yapılarda ise toz yığılmalarına ve gereksiz yük oluşumunun önüne geçilecektir. Yingst vd. (2020), Mars'ta toz birikimi ve tozun birikme desenlerini tartışmaktadır. Bu bilgiler, Mars'taki habitatların tasarımı için kritik öneme sahip olabilir. Ozawa vd. (2012), yapılan araştırmaya göre uzay araçlarının yüzeyleriyle etkileşime giren toz detaylarını içeren simülasyonları içermektedir. Bu çalışma, Mars tozunun yapay yapılarla nasıl etkileşime gireceğini anlamak için önemlidir. Reznichenko vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, Mars iyonosferindeki tozun özelliklerini araştırıyor. Bu durum, Mars'ta iletişim ve diğer teknolojiler için sonuçlar doğurabilir. Afshar-Mohajer vd. (2015) tarafından yapılan bu geniş kapsamlı inceleme, Mars'taki habitatların tozun etkisini en aza indirmek için uygulanabilecek toz yönetim teknolojilerini ele almaktadır. Landis (1996), Pathfinder 30 günlük ve iki yıllık görevlerinde toz birikimi nedeniyle güneş panellerinin toplam kapanma yüzdeleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Güneş panellerinin toplam kapanma yüzdeleri

Durum	30 gün	2 yıl
Ortalama	6.6%	77%
En iyi ihtimal	0.5%	22%
En kötü ihtimal	52.2%	89%

Tablodan da görüldüğü üzere uzay araçları 1 ay gibi kısa sürede tozdan etkilenmeye başlamaktadırlar. Enerji temininde

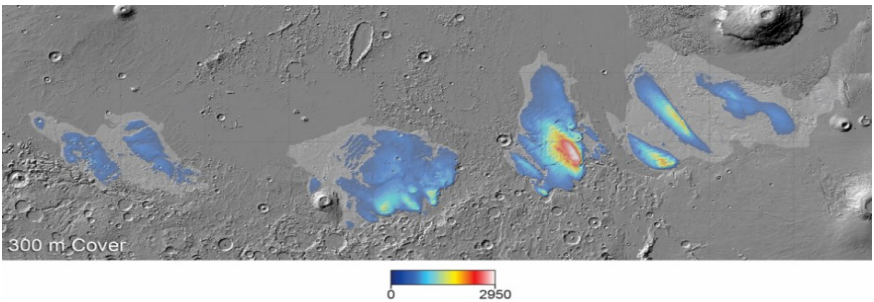
ilerleyen günlerde azalma olacağı açıktır. Güneş enerjisi, keşif araçları için olmazsa olmaz bir ihtiyaçtır. Enerji verimliliğinde azalma hareket kabiliyetin kısıtlayacağı gibi pil ömrünüde düşürmektedir. Literatürde birçok Mars gezegeni toz taşınımı, birikimi ve davranışını üzerine araştırma olsa da genellikle çalışmalar simüle etme ve tahmin üzerine dayanmaktadır. Halen bilinmeyen ve gözlenemeyen bir çok parameter olduğuna inanılmaktadır. Örneğin; Rüzgar izleri Mars'ta birkaç yerde görülür, ancak en belirgin ve en iyi bilinenleri Syrtis Major Planum'da bulunur. Bu izler, rüzgar ve tozun sertleşmiş, dirençli yüzey şekilleriyle, örneğin tepeler ve özellikle yükselmiş krater kenarları ile etkileşime girmesiyle oluşur (ASU, 2024). Bu malzeme, yakın kızılötesi bölgede en güçlü spektral özelliğini 2.6 ile 3.6 μm arasında göstermekte olup, gezegenin her yerinde yaygın olarak gözlemlenmiştir (Jouglet vd., 2007; Milliken vd., 2007). Soureshjani vd (2023), iç basınç ve toz ağırlığının zıt yönlerde olduğunu ve toz ağırlığının nötralize edileceğini belirtmiştir. Tüm bu nedenlerle toz birikmesinin günümüzdeki imkan ve keşiflerle sıfır ya da sıfıra yakın hesaplara katılabilir.

Buz Yükü

Buz yükü, ülkemizde yapısal yük olarak dikkate alınmamaktadır. Sadece yüksek gerilim hatlarında buz varlığı kablo üzerideki şerit yük olarak hesaplanabilmektedir. Rusya, Kanada gibi kuzey ülkeleri yönetmeliklerinde buz yükünün yapılarda nasıl hesaplanacağı ile ilgili bazı kısıtlamalar ve eşitlikler vermişlerdir. Ancak yük kombinasyonlarında buz yükü efektif olarak ön plana çıkmamaktadır. Mars gezegeninde ise halen insanoğlu için birçok parameter bilinmemektedir. Ancak belirsizlikleri ortadan kaldırmak

için, Amerikan NASA Jet Propulsion Laboratory tarafından üretilen gezgin araçlar, genellikle Mars gezegeninin yüzeyinde farklı noktalara başarılı inişler yaparak çalışmalarını genellikle uzun yıllar boyunca başarıyla sürdürmektedir.

NASA ve ESA yaptıkları radar taramalarında düşük enlemlerde ve ekvator çevresinden zemin altında büyük hacimlerde buz depoları keşfetmişlerdir (Min, 2024). Ancak bu buz deposu varlığı yeraltında bulunduğu için mars yapıları için dikkate alınmamaktadır. ESA tarafından belirlenen yer altı buz depolarının potansiyel buz kalınlığı Şekil 3‘de verilmektedir.



Şekil 3. Potential Ice Thickness (m)

Kutup bölgelerinde ise durum tam tersidir. Yüzeyde buz varlığı yörüngeden dahi görünmektedir. Özellikle güney kutup bölgesinde buz kararlı haldeyken kuzey kutup bölgesinde mevsimlere bağlı buz varlığında yer değiştirmeler göze çarpmaktadır. Kılıçer (2024), ekvator ve düşük enlemlerde yapı üzerinde birikmesi muhtemel kar yükünü sıfır önermiştir. Kutup bölgelerinde ise keşif araçlarlarının hava şartları nedeniyle günümüz teknolojisiyle araştırma yapamayacağını vugulamıştır. Kılıçer (2024)’in önerdiği buz yükü Eşitlik 8 ve 9 ‘daki gibidir.

$$L_{Ekvator} \approx 0 \quad (4)$$

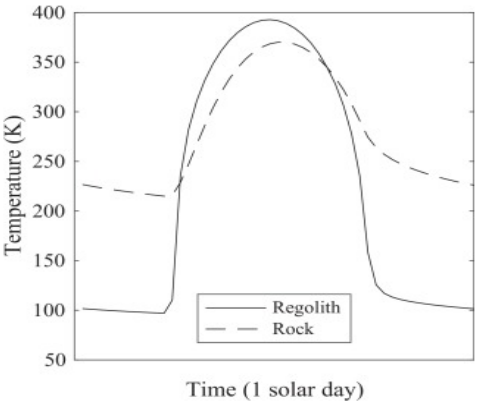
$$L_{Düşük\ enlemler} \approx 0 \quad (5)$$

Where *L*, ice load

Termal Gerilim

Mars gezegeninin atmosferinin çok ince olduğu ve bol miktarda karbondioksit bulunduğu bilinmektedir. Atmosferin ince olması gezegenin sıcaklığını koruyamamasına ve üzerinde gece-gündüz sıcaklık farklarının büyümesine yol açmaktadır. Bu durum yapı inşaatında/kurulumunda kullanılacak malzemelere ek gerilimler ve şekil değiştirmeler getirmektedir. Viles vd. (2010), Mars ve Dünya'da bazaltın termal döngülerle nasıl ayrıştığını simüle etmişlerdir. Eppes vd. (2015), Mars'taki kayaçlardaki çatlakların, güneş kaynaklı termal gerilimin neden olduğu kırılmalar olduğunu göstermektedirler. Levy vd. (2009), Mars'taki termal büzülme çatlak poligonlarının sınıflandırılması, dağılımı ve iklimsel etkilerini incelemişlerdir. El Maarry vd. (2010), Mars'taki eski göllerin kuruma desenlerini ve bu desenlerin termal stresle ilişkisini incelemişlerdir. Molaro vd. (2017), Havasız cisimlerin yüzeylerindeki kayalarda sıcaklık farklarının neden olduğu gerilimler ve kayaçların parçalanma süreçleri üzerine odaklanmışlardır. Tüm çalışmalar Mars gezegenindeki sıcaklık farkı nedeniyle oluşana termal gerilmelere odaklanmıştır.

Mars gezegeninde regolit ve kayada 1 solar günde meydana gelen sıcaklık farkını ortaya koyan grafik Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Regolit ve bazaltın ortalama yüzey sıcaklığı profilleri (Molaro vd. 2017)

Şekilde görüldüğü üzere regolit ve kaya malzemelerinde sıcaklık değişimi oldukça fazladır. Mars gezegeninde inşa edilmesi/kurulması düşünülen yapılarda kullanılacak malzemelerin ekonimik olması açısından Mars gezegeninde bulunan yerel malzemelerin kullanılması düşünülmektedir. Ancak görüldüğü gibi gezegende bulunan malzemeler sıcaklık farkı nedeniyle çatlamakta ve kırılmaktadır. Bu nedenle Mars yapılarında kullanılacak malzemelerin türüne göre termal gerilime maruz kalacağı açıktır ve termal gerilimlerin hesaplanması gereklidir. Ancak henüz günümüzde Mars yapılarında kullanılacak yapı malzemeleri henüz bilinmemektedir. Mars betonu ile ilgili çalışmalar yapılmışsa da atmosferdeki yüksek karbondioksit oranı ve atmosferin ince olması karbonatlaşmayı ve bozulmaları artıracaktır. Molaro vd. (2017), malzemenin tek başına termal gerilmesi olmasa da termal transferi aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabileceğini öne sürmüştür;

$$Q = \frac{k_{eff}}{\delta} \Delta T \tag{6}$$

burada δ, sınır tabakanın kalınlığı. k_{eff} etkin ısıl iletkenlik olarak ifade edilir.

$$k_{eff} = \frac{2k_R k_B}{(k_R + k_B)} \tag{7}$$

burada k_R ve k_B sırasıyla regoliti ve bazaltın ısıl iletkenlikleridir.

Asteroit ve Meteor Çarpması

Mars, Dünya'dan daha ince bir atmosfere sahiptir ve kaçış hızının yaklaşık yarısı kadardır (5.030 m/s'ye karşı 1.180 m/s). Bu, asteroitlerin parçalanmadan veya erimeden gezegen yüzeyine ulaşma ihtimalinin yüksek olduğu anlamına geliyor (Soureshjani vd. (2023). Hartmann & Neukum (2001), Mars yüzeyinde görülen kraterlerin sayımı ve dağılımı kullanılarak, çarpma oranlarının tahminlerini yapılmışlardır. Çalışma, Mars yüzeyine yılda yaklaşık 100-200 astreoid ve meteorların çarptığını göstermektedir. Williams vd. (2014), Mars'taki küçük çaplı çarpma kraterlerinin üretimini modellemişlerdir. Çalışmada, Mars'ta meteorların yavaşlatılmasının ve parçalanmasının etkileri dikkate alınarak çarpma oranları incelenmişlerdir. JeongAhn ve Malhotra (2015), Mars'taki mevcut çarpma akışını ve mevsimsel değişimlerini ele almaktadırlar. Mars yörüngesindeki zaman değişikliklerine duyarlı çarpma oranları incelemişlerdir. Teanby (2015), InSight misyonunun SEIS-SP enstrümanı ile Mars'taki meteor çarpmalarının tespit oranlarını tahmin etmektedir. Çalışmada, Mars'ta yıllık olarak tespit edilebilecek çarpma olaylarının sayısı incelenmiştir. Teanby ve Wookey (2011), Mars'taki meteor çarpmalarının sismik tespiti üzerine odaklanmaktadır. Mars'taki çarpma olaylarının sismik izleri incelenmiş ve bu çarpma olaylarının sayısı hesaplanmıştır.

Bowell vd. (1989) ve Harris & Lagerros (2002), asteroit çapını hesaplamak için aşağıdaki formülü önermişleridir;

$$D = \sqrt{\frac{1329 \times 10^{-H/5}}{P}} \tag{8}$$

D, Asteroit veya meteor çapı, *H*, Mutlak Büyüklük, *P*, Albedo, bir cismin yüzeyinin yansıtma yeteneğini ifade eder. 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bu formül, asteroitlerin ve meteorların boyutlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılır ve astronomi alanında önemli bir araçtır.

Melosh (1989) and Shoemaker (1962), astreodin çarpma hızını hesaplamak için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir;

$$\vartheta_{impact} = \sqrt{\vartheta_{esc}^2 + \vartheta_{\infty}^2} \tag{9}$$

ϑ_{impact}, çarpma hızı, ϑ_{esc}, kaçış hızı, ϑ_{∞}, asteroitin veya meteorun Mars'a yaklaşırken sahip olduğu hızdır. Formül, bir asteroitin veya meteorun Mars'a çarpma anındaki hızını belirlemek için kullanılabilir. Bu hız, cismin Mars'ın yerçekimi etkisi altında ne kadar hızlandığını hesaplar. Ayrıca, Bu formül ve bileşenler, asteroit ve meteor çarpışmalarının dinamiklerini anlamak ve bu tür çarpışmaların Mars yüzeyinde yaratacağı etkileri değerlendirmek için de önemlidir.

Sonuçlar ve Öneriler

Günümüzde Mars gezegenine ait bilgiye erişim sınırlı olsa da keşif ve yörünge araçları sayesinde zamanla yeni bilgi ve keşifler gün yüzüne çıkmaktadır. İlerleyen yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte Mars gezeninden bilgi akışı hızlanacaktır. Günümüz imkanlarında Mars yapılarının tasarımında dikkate alınması gerekli

özel yüklere ait sonuç ve öneriler aşağıda ayrı ayrı olarak sunulmuştur.

Basınç Etkisi: Mars'ın atmosfer basıncının Dünya'nınkinden %0.1 oranında olduğu bilinmektedir. Yapı içerindeki basınç ile dış basınç arasında büyük fark olacağı aşikardır. Bu durum, Mars yapılarının iç basınca dayanıklı olacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılar. Tummalapalli vd. (2020) Mars gezegeninde kurulacak şişirilebilir yapılar için gerilim formülleri önermiştir. Yenilikçi mühendislik çözümleri gerekmekte olup, şişirilebilir yapıların kullanımı üzerine yapılan formülasyonlar umut vaat etmektedir.

Toz Birikimi: Mars yüzeyinde sıkça meydana gelen toz fırtınaları ve toz birikimi, yapıların ve güneş panellerinin verimliliğini olumsuz etkileyebilir (Akkuş, 2023). Yingst vd. (2020), Mars'ta toz birikimi ve tozun birikme desenlerini tartışmaktadır. Toz yönetim teknolojilerinin geliştirilmesi ve toz birikimini minimize edecek tasarımlar yapılması gerekmektedir. Rüzgar izleri Mars'ta birkaç yerde görülür, en iyi bilinenleri Syrtis Major Planum'da bulunur. Bu bölgelerde ve krater çevrelerinde toz birikiminin fazla olduğu bilinmektedir. Kurulacak/inşa edilecek yapılarda iç basınç ve toz ağırlığının zıt yönlerde olduğunu ve toz ağırlığının nötralize edileceğini belirtilmişti. Tüm bu nedenlerle toz birikmesinin günümüzdeki imkan ve keşiflerle sıfır ya da sıfıra yakın hesaplara katılabilir. Ancak Rüzgar izi bölgelerinde toz yüklerine karşı daha detaylı çalışmalar yapılmalıdır.

Buz Yükü: Mars'ın kutup bölgelerinde ve düşük enlemlerinde yer alan buz depoları yapı tasarımlarında dikkate alınmalıdır. ESA'nın radar taramalarına göre, kutup bölgelerinde yüzeyde büyük

hacimlerde buz depoları tespit edilmiştir. Özellikle güney kutup dairesi içersinde buz kütleleri görülebilmektedir. Kuzey ve güney kutup bölgelerinde yapılacak yapılar için buz yükünün hesaplanması ve buna göre malzeme seçimi yapılması gerekmektedir. Kılıçer (2024), düşük enlemlerde buz yükünün sıfır, kutup bölgelerinde ise daha fazla araştırma yapılmasını önermiştir.

Termal Gerilim: Mars'taki büyük sıcaklık dalgalanmaları yapı malzemelerinde termal gerilimlere yol açmaktadır (Molaro vd., 2017). Molaro vd. (2017) çalışmasına göre, Mars'taki sıcaklık farkı nedeniyle regolit ve kaya malzemelerinde ciddi çatlaklar ve kırılmalar meydana gelmektedir. Mars'ta kullanılacak malzemelerin yerel kaynaklardan temin edilmesi önerilmekle birlikte, bu malzemelerin termal dayanıklılığı dikkatle değerlendirilmelidir. Termal gerilimlerin hesaplanması ve uygun malzeme seçimi, yapıların hizmet ömrünü de uzatacaktır. Yukarıdaki bölümlerde bahsedilen ve Molaro vd. (2017) tarafından önerilen ısıl transfer formülleri kullanılabilir.

Asteroit ve Meteoro Çarpması: Mars'ın ince atmosferi nedeniyle uzay boşluğundan savrulan asteroit ve meteor Mars gezegenine çarpmaları önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Mars yüzeyine yılda yaklaşık 180-260 asteroit ve meteor çarptığını bilinmektedir (Cooper, 2024). Bu irili ufaklı ancak yüksek hızlı parçacıklar bina malzemelerini aşındırabilir, hasar bırakabilir ve zamanla yapısal zayıflamaya neden olarak hizmet dışı kalmasına sebep olabilir. Yapıların bu tür çarpmalara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve koruyucu malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, çarpma olaylarının sıklığı ve şiddeti dikkate alınarak yapı tasarımlarının optimize edilmesi önerilmektedir.

Bowell vd. (1989) ve Harris & Lagerros, (2002) ile Melosh (1989) ve Shoemaker (1962), sırasıyla asteroid çapı ve hızı ile ilgili formüller önermişlerdir.

Bu sonuçlar ve öneriler doğrultusunda, Mars'ta güvenli ve sürdürülebilir yapılar inşa etmek için çok bilinmeyenli ve karmaşık mühendislik problemleri için yeni çözümlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Her geçen yıl Mars gezegeni hakkında bilinmezlikler ortadan kalkmakta daha gerçekçi ve doğru önermelere yeni teknolojilerle birlikte ulaşılacağı düşünülmektedir. Böylece, ilerleyen araştırmalarda, daha gelişmiş teknolojiyle, diğer ülkelerinde uzay araştırmalarına katılmalarıyla ve finansal destekleriyle keşif araçları ve enstrümanlar geliştirilerek elde edilecek verilerle bu çözümlerin daha da iyileştirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynakça

Afshar-Mohajer, N., Wu, C. Y., Curtis, J. S., & Gaier, J. R. (2015). Review of dust transport and mitigation technologies in lunar and Martian atmospheres. *Advances in Space Research*, 56(6), 1222-1241.

Akkuş, F. (2023). Mars'ta Yenilenebilir Enerji. https://yeserenerji.com/marsta-yenilenebilir-enerji/ 10 Aralık 2024.

ASU. (2024). School of Earth & Space Exploration- Mars Education at Arizona State University. Arizona State University. https://marsed.asu.edu/mep/wind/wind-streaks#:~:text=Wind%20streaks%20occur%20in%20several,and%20especially%20raised%20crater%20rims. 17.05.2024

Avice, G., Bekaert, D. V., Chennaoui Aoudjehane, H., & Marty, B. (2018). Noble gases and nitrogen in Tissint reveal the composition of the Mars atmosphere. *Geochemical Perspectives Letters*, 6, 11-16. doi: 10.7185/geochemlet.1802

Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J., & Harris, A. W. (1989). Asteroid magnitudes and albedos. In R. P. Binzel, T. Gehrels, & M. S. Matthews (Eds.), Asteroids II (pp. 524-556). University of Arizona Press.

Cooper, K. (2024). Mars is an asteroid punching bag, NASA data reveals. https://www.space.com/mars-asteroid-impacts-nasa-insight-data 05 Aralık 2024

El Maarry, M. R., & Markiewicz, W. J. (2010). Crater floor polygons: Desiccation patterns of ancient lakes on Mars? *Journal of*

Geophysical Research, 115(E10). https://doi.org/10.1029/2010JE003609

Eppes, M. C., Willis, A., Molaro, J., & Abernathy, S. (2015). Cracks in Martian boulders exhibit preferred orientations that point to solar-induced thermal stress. *Nature Communications*, 6, 6712.

ESA. (1975). European Space Agency (ESA). Paris, France.

Haberle, R. M., Murphy, J. R., & Schaeffer, J. (2003). Orbital change experiments with a Mars general circulation model. *Icarus*, 161(1), 66-89. https://doi.org/10.1016/S0019-1035(02)00017-9

Hartmann, W. K., & Neukum, G. (2001). Cratering Chronology and the Evolution of Mars. *Space Science Reviews*, 96(1), 165-194.

Harris, A. W., & Lagerros, J. S. V. (2002). Asteroids in the Thermal Infrared. In Asteroids III (pp. 205-218). University of Arizona Press.

Hu, R., & Thomas, T. B. (2022). A nitrogen-rich atmosphere on ancient Mars consistent with isotopic evolution models. *Nature Geoscience*, 15, 106–111.

JeongAhn, Y., & Malhotra, R. (2015). The current impact flux on Mars and its seasonal variation. *Icarus*, 262, 140-153.

Jouglet, D., Poulet, F., Milliken, R. E., Mustard, J. F., Bibring, J. P., Langevin, Y., Gondet, B., & Gomez, C. (2007). Hydration state of the Martian surface as seen by Mars Express OMEGA: 1. Analysis of the 3 μm hydration feature. *Journal of Geophysical Research Planets*, 112(E8), E08S06. https://doi.org/10.1029/2006JE002846

Kılıçer. (2024). Structural load example for Mars structures: Ice load. *3rd International Paris Congress on Applied Sciences*, February 17-19, 2024. Paris, France. ISBN: 978-625-367-659-9

Landis, G. A. (1996). Dust obscuration of Mars solar arrays. *Acta Astronautica*, 38(11), 885-891.

Leovy, C., & Mintz, Y. (1969). Numerical simulation of the atmospheric circulation and climate of Mars. *Journal of Atmospheric Sciences*, 26(6), 1167-1190. doi: 10.1175/1520-0469(1969)026<1167:NSOTAC>2.0.CO;2

Levy, J., Head, J., & Marchant, D. (2009). Thermal contraction crack polygons on Mars: Classification, distribution, and climate implications from HiRISE observations. *Journal of Geophysical Research*, 114(E1). https://doi.org/10.1029/2008JE003273

Lewis, S. R. (2003). Modelling the Martian atmosphere. *Astronomy & Geophysics*, 44(4), 4.6–4.14. https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2003.44406.x

Manning, C. V., Zahnle, K. J., & McKay, C. P. (2009). Impact processing of nitrogen on early Mars. *Icarus*, 199(2), 273-285. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.10.015

Melosh, H. J. (1989). Impact Cratering: A Geologic Process. New York, NY: Oxford University Press.

Milliken, R. E., Mustard, J. F., Poulet, F., Jouglet, D., Bibring, J. P., Gondet, B., & Langevin, Y. (2007). Hydration state of the Martian surface as seen by Mars Express OMEGA: 2. H2O content of the surface. *Journal of Geophysical Research Planets*, 112(E08), E08S07. doi: 10.1029/2006JE002853

Min, R. (2024). Avrupa Uzay Ajansı'nın yörünge aracı, Mars ekvatorunda buzlu su yatakları keşfetmiş olabilir. https://tr.euronews.com/next/2024/01/20/avrupa-uzay-ajansinin-yorunge-araci-mars-ekvatorunda-buzlu-su-yataklari-kesfetmis-olabilir 13 Aralık 2024

Molaro, J. L., Byrne, S., & Le, J. L. (2017). Thermally induced stresses in boulders on airless body surfaces, and implications for rock breakdown. *Icarus*, 294, 247-261.

Murphy, J. R., Pollack, B. J., Haberle, M. R., Leovy, C. B., Toon, O. B., & Schaeffer, J. (1995). Three-dimensional numerical simulation of Martian global dust storms. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 100(E12), 26357-26376. https://doi.org/10.1029/95JE02984

NASA. (1958). National Aeronautics and Space Administration (NASA). Washington, DC, USA.

NASA Jet Propulsion Laboratory. (2024). National Aeronautics and Space Administration (NASA). California Institute of Technology, USA.

NASA. (2024). Mars Atlas/ Olympus Mons. NASA's Mars Exploration Program. https://mars.nasa.gov/gallery/atlas/olympusmons.html#:~:text=Olympus%20Mons%20is%20a%20shield,on%20Earth%20is%20Mauna%20Loa. 13.05.2024

NASA/JPL Caltech/Cornell/Arizona State. (2024). Built to last 90 days, Mars rover Opportunity ends mission after 15 years. Retrieved from https://news.cornell.edu/stories/2019/02/built-last-

90-days-mars-rover-opportunity-ends-mission-after-15-years 07.05.2024

NASA/JPL-Caltech. (2024). NASA Science Instruments. Retrieved from https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/science-instruments/ 23.05.2024

Ozawa, T., Suzuki, T., Takayanagki, H., & Fujita, K. (2012). Investigation of Martian-Dust Drag and Heat Transfer for Mars Sample Return Mission. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 25(3). https://doi.org/10.2514/1.50714

Reznichenko, Y. S., Dubinskii, A. Y., & Popel, S. I. (2023). Plasma–Dust System in the Martian Ionosphere. *Plasma Physics Reports*, 49(1), 79–88. Pleiades Publishing, Ltd. ISSN 1063-780X

Shoemaker, E. M. (1962). Interpretation of Lunar Craters. In Physics and Astronomy of the Moon (pp. 283-359). *Academic Press*.

Soureshjani, O. K., Massumi, A., & Nouri, G. (2023). Martian Buildings: Design loading. *Advances Space in Research*, 71, 2186-2205.

Teanby, N. A., & Wookey, J. (2011). Seismic Detection of Meteorite Impacts on Mars. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 186(1-2), 70-80.

Teanby, N. A. (2015). Predicted Detection Rates of Regional-Scale Meteorite Impacts on Mars with the InSight Short-Period Seismometer. *Icarus*, 256, 49-62.

Tummalapalli, P., Vishwanath, V., Pattnaik, A., Pawar, A. H., Siddhartha, D. V. S., Dhondiyal, J., Kripasree, S., Bhale, K. V., &

Adnan, M. M. (2020). Conceptual Design of Self-Sustainable Inflatable Martian Habitat. *ECLSS-IH Team, SSERD*, nestOne, 1-47.

UCAR. (2024). Comparing Planetary Gases. https://scied.ucar.edu/activity/planetary-gases

UZAY. (2024). Mars: Kızıl Gezegen Hakkında Bilmeniz Gereken Her Şey. https://uzay.org/mars-kizil-gezegen-hakkinda-bilmeniz-gereken-her-sey/ 13 Aralık 2024

Viles, H., Ehlmann, B., & Wilson, C. F. (2010). Simulating weathering of basalt on Mars and Earth by thermal cycling. *Geophysical Research Letters*, 37(18), L18201. https://doi.org/10.1029/2010GL043522

Williams, J. P., Pathare, A. V., & Aharonson, O. (2014). The Production of Small Primary Craters on Mars and the Moon. *Icarus*, 235, 23-36.

Yingst, R. A., Bray, S., Herkenhoff, K., Lemmon, M., Minitti, M. E., Schmidt, M. E., Edgett, K. S., Fey, D. M., & Kah, L. C. (2020). Dust cover on Curiosity's Mars Hand Lens Imager (MAHLI) calibration target: Implications for deposition and removal mechanisms. *Icarus*, 351, 113872. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113872

Zurek, R. W., Barnes, J. R., Haberle, R. M., Pollack, J. B., Tillman, J. E., & Leovy, C. B. (1992). Dynamics of the atmosphere of Mars. *In University of Arizona Press* (pp. 835-933).

BÖLÜM VI

Atık Lastiklerin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı

Mehmet ALPYÜRÜR[1]

Giriş

Geri dönüşüm ve çevresel sorumluluk taahhütlerine rağmen, lastik atığı sorunu giderek artmaktadır (Şekil 1). Küresel olarak yılda tahminen bir milyar ömrünü tamamlamış atık lastik atılmakta ve bu atık akışı dinamik bir şekilde büyümektedir.

Lastik pazarının genişlemesini incelediğimizde, yeni otomobil üretiminin artmasına ve bunun sonucunda lastik talebinin yükselmesine katkıda bulunan iki temel etken ortaya çıkmaktadır.

Otomobil üretiminin 2025 yılına kadar yılda 98,9 milyona ulaşacağı düşünüldüğünde, lastik atıklarının yarattığı zorluk daha da

[1] Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ALPYÜRÜR, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur/Türkiye, Orcid: 0000-0002-6878-5874, malpyurur@mehmetakif.edu.tr

netleşiyor. 2020 yılında Avrupa Birliği'nde (AB) 294 milyon binek otomobil ve 41 milyon kamyon vardı. 2040 yılına kadar dünyada 2 milyar otomobil ve 790 milyon kamyon olması bekleniyor. Bu da bu araçlar için daha fazla lastik üretileceği ve sorunun ortadan kalkmayacağı anlamına geliyor.

Her yıl milyonlarca yeni araç yollara çıkıyor. 2022'de yaklaşık 65 milyon otomobil satıldı ve 2021'de satılan 68 milyona kıyasla hafif bir büyüme kaydedildi. Hindistan ve Çin kilit pazarlar olup, Hindistan'da 2040 yılına kadar her bin kişiye 150 araç düşeceği tahmin edilmektedir.

Şekil 1: Ömrünü tamamlamış lastikler
(*https://www.forbes.com/sites/heatherfarmbrough/2020/07/02/hitting-the-road-again-how-a-norwegian-company-is-/)*

Yeni araçlara yönelik artan talep, dünya genelinde daha fazla lastik üretilmesini sağlamıştır. AB, 2020 yılında 4,2 milyon ton

lastik üretimi ile lastik üretimindeki bu artışın en önemli örneğidir. Bu güçlü üretim, bölgeye dağılmış 93 lastik üretim merkezi tarafından desteklenmektedir (https://contec.tech/tire-waste-statistics-need-to-know/).

Tipik olarak lastikler %14 doğal kauçuk, %27 sentetik kauçuk, %14 yüksek karbonlu çelik tel, %28 karbon siyahı ve %16 kumaş, dolgu maddeleri ve diğerleri içerir. Bu malzemeler, Şekil 2'de gösterildiği gibi birçok farklı biçimde geri dönüştürülebilir ve inşaat sektörlerinde yeniden kullanılabilir. Ömrünü tamamlamış lastikler düz kauçuk ve kauçuk parçacıklarına (örn. kauçuk yongaları, lastik kırıntıları ve kauçuk tozu) dönüştürülebilirken, çelik ve naylon teller de çıkarılabilir (Ferdous et al., 2021).

Şekil 2: Ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen malzemeler (Ferdous et al., 2021).

Atık malzemeler birçok çevresel soruna neden olmakta ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunları en aza indirmek için, biriken büyük atıkların çevreye ve ekonomiye verdiği zararları azaltmanın güvenli yollarını bulmak gerekmektedir.

Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi raporuna göre (https://docs.wbcsd.org/2018/02/ELT_Fact_Sheet.pdf) değerlendirme yapılan 51 ülke arasında lastikler, cam, alüminyum, karton ve kâğıdı geride bırakarak yaklaşık %67 oranında geri kazanılmaktadır. Bölgesel bazda geri kazanım oranları ise Avrupa için %91, Japonya için %85, Amerika Birleşik Devletleri için %87 ve Güney Kore için %95 seviyelerindedir. Her yıl, geri kazanılan lastikler yeni malzemelere, yakıtlara ve geri kazanılmış kauçuğa dönüştürülmekte ve tüm bunlar lastik endüstrisinin döngüsel bir ekonomi oluşturma çabalarına katkıda bulunmaktadır. Geri dönüşüm sonrası, atık lastikler en yaygın olarak aşağıdakiler için kullanılmaktadır:

- Malzeme Geri Kazanımı (%47)
- Enerji Geri Kazanımı (%20)
- İnşaat Mühendisliği ve Dolgu (%2)

Lastik atıkları, endüstriyel bağlamlarda istenmeyen bir fazlalık oluşturmakta ve küresel ölçekte sürekli bir yıllık artış göstermektedir. Sonuç olarak, lastik atıklarının alternatif yaklaşımlarla azaltılması dünya çapında farklı disiplinlerden araştırmacıların ilgisini daha fazla çekmektedir. Geoteknik mühendisliği de bu disiplinlerden biridir. Geri dönüştürülmüş lastikler, zemin iyileştirme, toprak erozyonu ve şev stabilitesi gibi birçok geoteknik mühendisliği projesinde kullanılmıştır ve yeni kullanım alanlarına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Atık Lastiklerin Zemin İyileştirmesinde Kullanımı

Zeminin mühendislik davranışını iyileştirmek için katkı maddelerinin kullanılması popüler bir zemin iyileştirme tekniğidir.

Bunlardan birisi olan lastik atıkları zeminin iyileştirmesinde kullanılan endüstriyel atıklardandır.

Son yıllarda, lastik parçaları, lastik yongaları, lastik kırıntıları ve lastik tozu gibi işlenmiş kullanılmış lastikler, zemin karışımlarının mekanik ve dinamik özelliklerini iyileştirmek için uygulanmaktadır.

Attom, (2006) makaledesinde parçalanmış lastiklerin bazı kumların fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi üzerine bir laboratuvar çalışması sunulmaktadır. Parçalanmış atık lastikler farklı gradasyonlara sahip üç farklı kum türüyle karıştırılmıştır. Her bir kum türü kuru ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere dört farklı oranda parçalanmış lastik ile karıştırılmıştır. Parçalanmış atık lastiklerin eklenmesi kumların hem içsel sürtünme açısını hem de kayma mukavemetini artırmıştır. Ayrıca, kum-öğütülmüş atık lastik karışımının ilk kuru yoğunluğundaki artış kumun kayma mukavemetini arttırmıştır.

Edinçliler, Baykal, & Saygili (2010), yaptıkları çalışmada kullanılmış lastik-kum karışımlarının kayma mukavemetinde gözlenen artış, kullanılmış lastiklerin fiber takviye elemanı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Verilen kullanılmış lastikler ve test koşulları için, işlenmiş kullanılmış lastiklerin ağırlıkça %10 gibi düşük katkılarında bile, karışımın deformasyon davranışı önemli ölçüde değişmektedir. Çalışmadaki laboratuvar testlerinden, kuma lastik kırıntısı ilavesinin tüm lastik kırıntısı yüzdeleri için kayma mukavemetlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Roustaei, Ghazavi, & Aliaghaei (2016), lastik kırıntılarının donma-çözülme döngülerine maruz kalan killi bir zeminin mekanik

özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Zemin 1, 3, 6 ve 9 döngü donma-çözülmeye maruz bırakıldıktan sonra farklı sınırlama basınçları altında üç eksenli basınç testleri gerçekleştirmişler ve lastik kırıntılarının eklenmesinin donma-çözülme döngüleri sırasında zeminin mukavemetindeki azalmayı önemli ölçüde etkilemediğini, ancak zeminin kohezyon ve esneklik modülündeki değişiklikleri etkili bir şekilde azaltabileceğini belirlemişlerdir.

Reddy, Kumar, & Krishna (2016), boşluk oranı ve kayma mukavemeti özelliklerine dayalı geoteknik uygulamaları için kum-lastik yongaları karışımının optimum karışım oranı hakkında bazı perspektifler sunmuştur. Yerel olarak temin edilebilen kum ve 20×10 mm boyutunda lastik yongaları kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarına göre, seçilen boyuttaki lastik yongalarının optimum yüzdesi ağırlıkça %30-40 aralığındadır ve bu da hacimce %50-60'a eşdeğerdir.

Rahgozar & Saberian (2016), parçalanmış lastik yongası eklemenin turba toprağının stabilitesi ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Turba örnekleri, 400 kg m^{-3} sabit dozajda kum ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20) parçalanmış lastik yongaları ile karıştırılmıştır. Sonuçlar, parçalanmış lastik yongalarının eklenmesinin turba zeminin geoteknik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. %10 parçalanmış lastik yongası içeren karışım en yüksek serbest basınç dayanımını göstermiş; %15 lastik yongası içeren karışım en yüksek sünekliği sergilemiş; %20 parçalanmış lastik yongası eklenmesi ise iç sürtünme açısı, kohezyon ve geçirgenlik katsayısı için en yüksek değerleri sağlamıştır.

Saberian & ark. (2018), stabilize edilmiş turbanın bazı geoteknik özellikleri üzerinde sabit miktarda kumun yanı sıra farklı ağırlık yüzdelerinde parçalanmış lastik yongası eklemenin etkilerini araştırmak için lastik yongası, kum ve turba karışımları üzerinde serbest basınç ve kesme kutusu testleri gerçekleştirmiştir. Test sonuçlarına göre, lastik yongalarının artmasıyla C ve φ parametrelerinde bir artış eğilimi görülmüştür. Ayrıca, turbaya lastik yonga eklenmesi sünek davranışı arttırmıştır.

Terzi & ark. (2018), lastik yongalarının killi zeminlerin büzülme ve çatlama özellikleri üzerindeki etkilerini rapor etmiştir. Sıkıştırılmış kilin çatlama önleyici özelliklerini iyileştirmek için katkı malzemesi olarak lastik monofilamentleri kullanmaya çalışmışlardır. Katkı maddesi ile karıştırıldığında kil malzemenin çatlama özelliklerinde önemli bir iyileşme olduğunu bulmuşlardır.

Priyadarshee & ark. (2018), sıkışma ve mukavemet davranışlarını değerlendirmek için lastik atığı ve uçucu kül ile karıştırılmış kaolin kili üzerinde modifiye Proktor ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testleri gerçekleştirmiştir. Uçucu kül ve lastik kırıntılarının dahil edilmesiyle maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını, optimum nem içeriğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca CBR değerlerinde de iyileşme gözlenmiştir.

Al-Neami (2018), atık lastik yongaları kullanarak kum zemini iyileştirmeye çalışmıştır. Kuma lastik yongası eklemek kumun kayma mukavemetini artırmıştır. Ayrıca, lastik yongası ile stabilize edilen kum, saf kuma kıyasla yaklaşık 1,6 kat daha fazla CBR vermiştir.

Ahmed & Naggar (2018), bassanit-lastik karışımı ile stabilize edilmiş kumun basınç dayanımı üzerinde döngüsel yüklemenin etkisini araştırmak için döngüsel üç eksenli testler kullanarak çalışmalar yürütmüştür. Farklı oranlarda ve boyutlarda atık lastik parçacıkları kullanmışlar ve parçalanmış atık lastiğin işlenmiş kumun çekme mukavemetini artırdığını bulmuşlardır.

Soltani & ark. (2022), atık lastikten türetilmiş agrega (TDA) malzemelerinin ve hidratlı kirecin Güney Avustralya'dan yüksek oranda şişen bir zeminin sıkışabilirliği, basınç dayanımı ve şişme potansiyeli üzerindeki birleşik etkinliğini araştırmıştır. Serbest basınç dayanımı, %5 TDA içeriğinde zirve yapan ve daha sonra daha yüksek TDA katkıları için (monotonik olarak) azalan bir 'yükselme-düşme' davranışı sergilemiştir. TDA ortalama partikül boyutunun artırılması da (1,67'den 3,34 mm'ye) serbest basınç dayanımı gelişimine olumlu katkıda bulunmuştur. Zemin/zemin-kireç karışımlarına TDA ilavesi şişme potansiyelinde kayda değer azalmalar meydana getirmiştir. Deneysel sonuçlar ışığında, TDA'nın zemin-kireç kütlesine oranının %10'a kadar çıktığı zemin-kireç karışımları uygun seçenekler olarak kabul edilebilir ve şişme potansiyelini yeterince azaltırken aynı zamanda serbest basınç dayanımını artırabilir.

Pattanawanidchai & ark. (2023), atık lastik kırıntılarının zemin sıkışma derecesini azaltmak için kullanılabileceğini belirtmiştir.

Jarushi & Talibullah (2023), granül atık lastiğin killi zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir. Araştırma sonuçları, lastiğin fiziksel bir katkı maddesi olarak yeniden kullanımının mühendislik

uygulamalarında düşük plastisiteli killi zeminlerin özelliklerini iyileştirebileceğini göstermektedir. Kil-lastik karışımının test sonuçlarına göre, likit limit ve plastik limit, granül atık lastiklerin artmasıyla azalmaktadır. İstinat duvarlarında yanal gerilmenin azaltılması veya düşük birim ağırlığı nedeniyle dolgu inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda %20 oranında granül atık lastik kullanılmasını önermişlerdir.

Gücek & ark. (2024) standart Proktor testi, serbest basınç dayanımı testi, CBR testi ve döngüsel üç eksenli testler dahil olmak üzere çeşitli laboratuvar testlerini kullanarak hibrit atık malzemelerle zemin özelliklerinin iyileştirilmesini değerlendirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, atık cam tozu ve kauçuk lastiklerin kombinasyonu için en etkili karışımın, zeminin kuru ağırlığına bağlı olarak %20 cam tozu ve %3 kauçuk lastik içerdiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara dayanarak, atık araç lastiklerinin çelik lif içeriği nedeniyle kontrol numunesinin yük taşıma kapasitesi üzerinde olumlu bir etkisi olduğu varsayılmaktadır.

Atık Lastiklerin Zemin Dolgularında Kullanımı

Atık lastikler, plastikler ve taranmış topraklar gibi büyük miktarlarda üretilen atık malzemeler, potansiyel olarak inşaat projelerinde dolgu malzemesi olarak yeniden kullanılabilir (Şekil 3). Bu hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayacaktır. Mevcut literatür incelendiğinde elde edilen sonuçlar, dolgu inşaatında atık lastikten türetilmiş agregaların kullanılmasının sadece bu sorunlu atığın etkili bir şekilde kullanılmasının iyi bir yolu olmadığını, aynı zamanda böyle bir yapının davranışını da iyileştirebileceğini kanıtlamaktadır.

Xin & ark. (2015), çimentolu zemin-lastik yongası karışımının zemin dolgularında kullanılma potansiyelini araştırmak için bir laboratuvar çalışması yürütmüştür. Karışımları hazırlamak için değişen oranlarda zemin, atık lastik yongası, Portland çimentosu ve su kullanmışlardır. Sonuçlar, malzemeye lastik yongası ve çimento eklenmesinin drenajsız mukavemette bir iyileşmeye yol açtığını ve malzemenin liman veya ulaşım inşaatlarında rıhtım duvarı dolgusu gibi çeşitli zemin dolgusu uygulamaları için uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Tafreshi & Norouzi (2015), yol dolgusunun oturmasını azaltmak için atık lastik uygulamasını rapor etmiştir. Makalelerinde, yol dolgusunun zemin yüzeyindeki oturmayı azaltmada zemin-lastik kırıntısı karışımının faydalarını göstermek için araç geçişlerini simüle eden 150 mm çaplı bir plaka üzerinde bir dizi tekrarlanan yük testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, lastik takviyesinin verimliliğinin önemli ölçüde lastik içeriğinin, lastik-zemin karışımının kalınlığının ve karışım üzerindeki tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Bulgular, yeniden kullanılamayan atık lastiklerden elde edilen lastik parçalarının yol dolgusu çalışmalarında uygulanabilir bir malzeme olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Meles & ark. (2016) lastik türevi agrega (TDA) için düşey gerilmenin bir fonksiyonu olarak değişen bir elastik modül ile doğrusal olmayan elastik malzeme modelleri geliştirmiştir. Modeli, inşaat sırasında tam ölçekli test dolgusunun oturmasını tahmin etmek için bir geoteknik yazılımda kullandılar. TDA'nın üzerine örtü yerleştirilmesi sırasında uygulanan bir yük altında ani sıkışmayı telafi etmek için TDA tabakasının üstünde gerekli olan üst yapıyı hesaplamak için tasarım çizelgeleri önermişlerdir.

Kowalska & Chmielewski (2017), kum-lastik karışımları üzerinde bir dizi kesme kutusu testi gerçekleştirmiştir. Sonuçları, yumuşak zemin üzerine inşa edilen bir yol dolgusunun sayısal FEM (sonlu elemanlar yöntemi) modeline uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, atık lastik kırıntılarının eklenmesinin dolgunun stabilite faktörünü ve taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, tabanı çok daha az oturma göstermiştir.

Şekil 3: Atık lastikler hafif dolgu yapımında kullanımına bir örnek (Eckstein, 2012)

Khabiri, Khishdari, & Gheibi (2017), lastik tozu penetrasyonunun yol dolgularının gerilimi ve stabilitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. PLAXIS yazılım analizi ile yapının aşırı gerilme ve yer değiştirmesindeki değişimi değerlendirmişlerdir. Lastik tozunun dolguya nüfuz etmesinin kaymaya karşı güvenlik faktörünü artırdığını bulmuşlardır.

T. Zhang, Cai, & Duan (2018), hafif dolgu olarak geri dönüştürülmüş kauçuk lastik-kum karışımlarının mukavemet ve mikroyapı özelliklerini rapor etmiştir.

Li & Li (2018), atık lastik kırıntıları-killi zemin karışımlarının laboratuvar testleri ile belirlenen mekanik özelliklerini değerlendirmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, karışımların basınç dayanımının ve konsolidasyon oturmasının atık lastik kırıntısı içeriği arttıkça azaldığını ve atık lastik kırıntılarının dolgu malzemesi olarak kullanılmaya uygun killi zemini iyileştirmek için kullanılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

H. Zhang & ark. (2024), lastikten türetilmiş agrega (TDA) ve ağ lastik şeritlerinin eklenmesinin dolguların taşıma kapasitelerini sırasıyla %25 ve %65 oranında artırdığını göstermiştir. TDA ve file lastik şeritlerden oluşan kompozit takviye, takviyesiz durumun 1,81 katı olan taşıma kapasitesini artırmada en önemli etkiye sahip olmuştur. Dolgu şevlerinin yer değiştirmelerinin, birleşik takviye koşulları altında daha küçük ve daha düzgün hale geldiği bulunmuştur. Sayısal simülasyon sonuçları, TDA dolgu ve lastik şerit takviyelerinin incelenen dolguların taşıma kapasitelerini büyük ölçüde artırdığını göstermiştir. Dolayısıyla, bu çalışmanın sonuçları lastik şerit ve TDA kompozit güçlendirme yöntemlerinin uygulanabilirliğini doğrulamıştır.

Atık Lastiklerin Diğer Geoteknik Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Daha büyük ebatlardaki atık lastikler istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi (Şekil 4) olarak, yol zemini stabilizasyonunda

(Şekil 5), çöplüklerin günlük örtüsü olarak ve malç olarak kullanılabilir.

Şekil 4: Atık lastiklerin istinat duvarlarında geri dolgu malzemesi olarak kullanımına bir örnek (https://nheri.ucsd.edu/projects/retaining-wall-shake-table-test-and-design-using-tire-derived-aggregates-backfill)

Baziene & Vaiškunaite (2016), lastik parçalarının düzenli depolama sahasında sürdürülebilir kullanımı üzerine bir rapor hazırlamıştır. Amaçları, tıkanmayı en aza indirmek için çöp sahası alt drenaj katmanında lastik parçalarının uygunluğunu belirlemekti. Elde ettikleri sonuçlar, moloz ve lastik parçalarından oluşan bir atık karışımı kullanmanın, düzenli depolama sahalarında drenaj tabakası oluşturmak için faydalı olduğunu ortaya koymuştur.

Ghazavi, Mohebi, & Namdari (2017) sığ temelleri destekleyen granüler hendekte rastgele karıştırılan lastik parçalarının optimum

hacmini araştırmıştır. Bu amaçla, temel genişliğinin 0,2, 0,3 ve 0,4 katı büyüklüğünde lastik parçaları kullanılmış ve çakıl ile karıştırılmıştır. Sonuçlar, granüler hendekte lastik parçalarının hacimce optimum yüzdesinin 10-15 olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, lastik parçalarının boyutu arttıkça, temel taşıma kapasitesi de artmaktadır. Ayrıca, granüler hendekte lastik parçacıklarıyla karıştırılmış bölgenin yüksekliğinin artmasıyla temel kapasitesi daha da iyileşmektedir sonucuna varmıştır.

Reddy & Krishna (2017), lastik yongalarını istinat duvarlarında kullanılabililiğini araştırmıştır. Test sonuçlarından, istinat duvarı modellerinin yatay yer değiştirme ve artan yanal toprak basıncı tepkilerinin, lastik yongalarının dahil edilmesiyle önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir.

Şekil 5: Atık lastikler yol tabanı dolgu yapımında kullanımına bir örnek (https://t2gr.com/josue/products-detail_shreds_tdf.php)

Yadav & Tiwari (2017), bir dizi basınç, CBR, tek boyutlu konsolidasyon ve şişme basıncı testleri ile çimentolu kil-lastik kırıntısı karışımının geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Karışımlardaki kırıntı lastik (0,8-2 mm boyutunda) ve çimento içeriği, numunelerin kuru ağırlığına göre sırasıyla %0, %2,5, %5, %7,5 ve %10 ve %0, %3 ve %6 idi. Deneysel araştırma sonuçları, çimentolu killi zemine kırıntı lastiğin dahil edilmesinin serbest basınç ve bölünmüş çekme dayanımını azalttığını, ancak çimentolu kilin sıkışma ve gerilmedeki kırılganlığının üstesinden gelebildiğini göstermiştir. %6 çimento içeren kompozitin CBR değerleri, hafif trafikli yol alt temeli olarak kullanımı için elverişli bulunmuştur. Ayrıca, kırıntı lastik karışımların şişme basıncını ve sıkışma indisini azaltmaya yardımcı olduğu, bu nedenle istinat duvarları ve dolgu inşaatının arkasındaki hafif dolgu malzemesi için iyi bir aday olduğu fark edilmiştir. Kırıntı lastiğin çimentosuz ve çimentolu killi zemine dahil edilmesi, güçlendirme maliyetini ve atık lastik bertarafının çevre üzerindeki bozucu etkisini potansiyel olarak azalttığı sonucuna varmışlardır.

Shariatmadari & ark. (2018), bir iyileştirme tekniği olarak taş kolonlarda parçalanmış atık lastik kullanımının etkisini rapor etmiştir. Parçalanmış atık lastikleri çakıl malzemelerinin yerine kullanmışlar ve taş kolonun davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Büyük ölçekli doğrudan kesme kutusu ve büyük oedometre testlerinin sonuçları, %20 lastik içeriği için taş kolonların yükleme kapasitesinde bir artış olduğunu, ancak %20'den daha büyük lastik karışım oranları için taş kolonun yükleme kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Çakıl lastiği parçacığı katkısının en iyi

performansının orta boyutlu lastik parçacıkları ile elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Bahadori & Farzalizadeh (2018), katkı maddelerinin güçlendirilmiş zeminin sıvılaşma potansiyeli, sönüm oranı ve kayma modülü gibi dinamik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için farklı yüzdelerde kum-lastik tozu ve kum-lastik kırıntısı karışımlarında bir dizi 1-g sarsma tablası modeli testi gerçekleştirmiştir. Lastik tozları ve lastik kırıntısının eklenmesinin sıvılaşmadan kaynaklanan boşluk suyu basıncını azalttığını ve ortalama sönüm oranını ve kayma modülünü artırdığını bulmuşlardır.

Okur & Umu (2018), granüle lastik kauçuğu ile modifiye edilmiş temiz kumun dinamik özellikleri üzerinde lastik kauçuğu miktarının, partikül boyutunun ve sınırlama gerilmelerinin etkilerini değerlendirmiştir.

Enquan & Qiong (2019), doymuş lastik-kum karışımlarının kayma mukavemetini ve sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. Çeşitli lastik içeriklerinde lastik-kum karışımları üzerinde doğrudan kesme testleri ve döngüsel üç eksenli testler gerçekleştirmişlerdir. Kuma lastik parçacıklarının eklenmesinin kayma gerilmesi-yatay yer değiştirme gelişimini değiştirdiği bulunmuştur. Kuma kauçuk parçacıklarının eklenmesi kayma mukavemetini biraz artırmış ve sıvılaşmaya karşı direnci önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Hazarika & ark. (2023), atık lastiklerle korunan bir dolgunun saha araştırması, laboratuvar testleri ve sayısal simülasyon sonuçlarını kapsayan bir vaka geçmişi sunmuştur. Araştırma, atık lastik türevi ürünün kayma deformasyonu, titreşim emilimi

(İzolasyon) ve süneklik özelliklerine özellikle dikkat etmiştir. Araştırmadan elde edilen önemli sonuçlardan bazıları şunlardır.

(1) 2011 Tohoku Depremi'nin Pasifik kıyısı açıklarında lastik istinat duvarının hasar görmesi, tek tek lastiklerin konik etkisi, lastikler arasındaki sürtünme, süneklik ve lastiklerin doğasında bulunan sönümleme sayesinde önlenebilmiştir.

(2) Dolgunun üst kısmındaki lastik katmanları daha fazla sismik enerji emebilir ve böylece deprem hareketini sönümleyebilir. Hareketin bu şekilde sönümlenmesi, alttaki lastik katmanlarının GSI görevi gördüğünü ve üstteki dolguyu deprem sırasında herhangi bir hasardan koruduğunu göstermektedir.

(3) Bir dolguda lastik kaplamanın varlığı, dolgunun kayma gerilmesini ve yatay yer değiştirmesini bastırır ve böylece bir deprem sırasında dolgunun stabilitesini sağlar.

(4) Lastikler bir deprem sırasında tepki ivmesini azaltabilir ve böylece duvara karşı sismik atalet kuvvetini azaltarak dolguyu koruyabilir.

Şekil 6’da atık lastikler ile inşa edilen bir istinat duvarı uygulaması gösterilmektedir.

Şekil 6: Atık lastikler ile inşa edilen bir istinat duvarı (https://pangeabiotecture.com/tire-retaining-walls/)

Kaynakça

Ahmed, A., & Naggar, M. H. El. (2018). Effect of cyclic loading on the compressive strength of soil stabilized with bassanite–tire mixture. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(1), 525–532. https://doi.org/10.1007/s10163-017-0617-1

Al-Neami, M. A. (2018). Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips. International Journal of GEOMATE, 15(48), 175–180. https://doi.org/10.21660/2018.48.180228

Attom, M. F. (2006). The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands. Environmental Geology, 49(4), 497–503. https://doi.org/10.1007/s00254-005-0003-5

Bahadori, H., & Farzalizadeh, R. (2018). Dynamic Properties of Saturated Sands Mixed with Tyre Powders and Tyre Shreds. International Journal of Civil Engineering, 16(4), 395–408. https://doi.org/10.1007/s40999-016-0136-9

Bali Reddy, S., Pradeep Kumar, D., & Murali Krishna, A. (2016). Evaluation of the optimum mixing ratio of a sand-tire chips mixture for geoengineering applications. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 6015007.

Baziene, K., & Vaiškunaite, R. (2016). Research of sustainable use of tire shreds in landfill. Sustainability (Switzerland), 8(8). https://doi.org/10.3390/su8080767

CONTEC (29/09/2024 tarihinde https://contec.tech/tire-waste-statistics-need-to-know/ adresinden ulaşılmıştır).

Eckstein, B. (2012). From your car to your patio: Using recycled tire products in building projects. Journal of Green Building, 7(3), 16–31. https://doi.org/10.3992/jgb.7.3.16

Edinçliler, A., Baykal, G., & Saygili, A. (2010). Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used

tires in embankment construction. Waste Management, 30(6), 1073–1080. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.031

Enquan, Z., & Qiong, W. (2019). Experimental Investigation on Shear Strength and Liquefaction Potential of Rubber-Sand Mixtures. Advances in Civil Engineering, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/5934961

Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., … Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. Resources, Conservation and Recycling, 173(May). https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745

Forbes (30/09/2024 tarihinde https://www.forbes.com/sites/heatherfarmbrough/2020/07/02/hitting-the-road-again-how-a-norwegian-company-is-/ adresinden ulaşılmıştır).

Ghazavi, M., Mohebi, A., & Namdari, M. (2017). Static Characteristics of Footings on Tire Shred-Reinforced Granular Trench. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(3), 1147–1154. https://doi.org/10.1007/s13369-016-2352-7

Gücek, S., Gürer, C., Žlender, B., Taciroğlu, M. V., Korkmaz, B. E., Gürkan, K., … Jelušič, P. (2024). Use of Lignin, Waste Tire Rubber, and Waste Glass for Soil Stabilization. Applied Sciences (Switzerland), 14(17). https://doi.org/10.3390/app14177532

Hazarika, H., Kuribayashi, K., Kuroda, S., & Hu, Y. (2023). Performance evaluation of waste tires in protecting embankment against earthquake loading. Bulletin of Earthquake Engineering, 21(8), 4019–4035. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01690-2

Jarushi, F. H., & Talibullah, A. (2023). The Effect of Granulate Waste Tires on the Geotechnical Properties of Clays. World Congress on Civil, Structural, and Environmental

Engineering, 1–10. https://doi.org/10.11159/icgre23.121

Khabiri, M. M., Khishdari, A., & Gheibi, E. (2017). Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments. Road Materials and Pavement Design, 18(4), 966–979. https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1194879

Kowalska, M., & Chmielewski, M. (2017). Mechanical Parameters of Rubber-Sand Mixtures for Numerical Analysis of a Road Embankment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245(5). https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052003

Li, S., & Li, D. (2018). Mechanical Properties of Scrap Tire Crumbs-Clayey Soil Mixtures Determined by Laboratory Tests. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/1742676

Meles, D., Chan, D., Yi, Y., & Bayat, A. (2016). Finite-element analysis of highway embankment made from tire-derived aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 4015100.

Okur, D. V., & Umu, S. U. (2018). Dynamic properties of clean sand modified with granulated rubber. Advances in Civil Engineering, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/5209494

Pangea Biotecture (05/10/2024 tarihinde https://pangeabiotecture.com/tire-retaining-walls/ adresinden ulaşılmıştır).

Pattanawanidchai, S., Sae-Oui, P., Na-Lumpang, T., Loykulnant, S., & Kuankhamnuan, T. (2023). Reduction in Soil Compaction by Utilization of Waste Tire Rubber. Sustainability (Switzerland), 15(16). https://doi.org/10.3390/su151612174

Priyadarshee, A., Kumar, A., Gupta, D., & Pushkarna, P. (2018). Compaction and strength behavior of tire crumbles–fly ash mixed with clay. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(4), 4018033.

Rahgozar, M. A., & Saberian, M. (2016). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips. Mires and Peat, 18, 1–12. https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.205

Reddy, S. B., & Krishna, A. M. (2017). Tyre chips as compressible inclusions in earth-retaining walls. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 170(3), 137–148.

Roustaei, M., Ghazavi, M., & Aliaghaei, E. (2016). Application of tire crumbs on mechanical properties of a clayey soil subjected to freeze-thaw cycles. Scientia Iranica, 23(1), 122–132. https://doi.org/10.24200/sci.2016.2103

Saberian, M., Mehrinejad Khotbehsara, M., Jahandari, S., Vali, R., & Li, J. (2018). Experimental and phenomenological study of the effects of adding shredded tire chips on geotechnical properties of peat. International Journal of Geotechnical Engineering, 12(4), 347–356. https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1277829

Shariatmadari, N., Zeinali, S. M., Mirzaeifar, H., & Keramati, M. (2018). Evaluating the effect of using shredded waste tire in the stone columns as an improvement technique. Construction and Building Materials, 176, 700–709. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.090

Soltani, A., Taheri, A., Deng, A., & O'Kelly, B. C. (2022). Stabilization of a highly expansive soil using waste-tire-derived aggregates and lime treatment. Case Studies in Construction Materials, 16(February), e01133. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01133

Tafreshi, S. N., & Norouzi, A. H. (2015). Application of waste rubber to reduce the settlement of road embankment. Geomechanics and Engineering, 9(2), 219–241.

Terzi, N. U., Özsoy, M. Ü., Yilmaztürk, F., Güllü, B., &

Erenson, C. (2018). Effects of tire chips on the Shrinkage and cracking characteristics of clayey soils. Materiali in Tehnologije, 52(2), 143–150. https://doi.org/10.17222/mit.2017.057

Tires to Green Recycling (30/09/2024 tarihinde https://t2gr.com/josue/products-detail_shreds_tdf.php adresinden ulaşılmıştır).

UC San Diego (30/09/2024 tarihinde https://nheri.ucsd.edu/projects/retaining-wall-shake-table-test-and-design-using-tire-derived-aggregates-backfill adresinden ulaşılmıştır).

World Business Council for Sustainable Development (30/09/2024 tarihinde https://docs.wbcsd.org/2018/02/ELT_Fact_Sheet.pdf adresinden ulaşılmıştır).

Xin, L., He, J., Liu, H., & Shen, Y. (2015). Potential of using cemented soil-tire chips mixture as construction fill: a laboratory study. Journal of Coastal Research, (73), 564–571.

Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2017). A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay. Journal of Building Engineering, 9(May 2016), 177–191. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.01.001

Zhang, H., Liu, Z., Wang, J., Sun, J., Yue, H., Yuan, X., & Song, X. (2024). A study of the bearing characteristics of slopes reinforced with waste tire strips based on TDA composite soil. Environment, Development and Sustainability, 26(9), 23839–23865. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03625-y

Zhang, T., Cai, G., & Duan, W. (2018). Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill. Environmental Science and Pollution Research, 25(4), 3872–3883. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0742-3

BÖLÜM VII

Kıyıboyu Kum Taşınımının Parametrik ve Derin Makine Öğrenimi bir Yöntemle İncelenmesi

Mehmet SANDALCI[1]

Giriş

Dalgaların taban ile etkileşimine girmesi ile dalga özelliklerinde bazı değişiklikler olur. Bu değişklikler kimi zaman dalganın kırılması kimi zaman dalganın köpürmesi kimi zaman dalganın dökülmesi şeklinde olabilir. Dalga özelliklerindeki değişmeler ise kıyıboyu akıntısı şeklinde kıyıya parelel ve kıyıya dik yönde bileşenlerden oluşan akıntılar oluştur. Kıyıya parelel olan akıntılar ise kumsal gibi oyulmaya müsait sahil şeritlerinde kum taşınımına neden olur.

Kıyıboyunca kum taşınımı kıyılarda kimi zaman oyulma kimi zaman yığılma başta olmak üzere denizin sığlaşması gibi olaylara da neden olmaktadır. Genel olarak kumsal gibi tabi kıyılarda oyulma ve yığılmaların zamanla dengeli olduğu görülmektedir. Kıyılardaki kum taşınımı bazı zaman sağdan sola

[1] Dr.Öğr.Üyesi., Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Sakarya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-5654-1493, sandalci@sakarya.edu.tr

doğru bazen soldan sağa doğru olduğu görülmektedir.

Kıyılarda kum taşınımı ile oluşan kıyı çizgisindeki değişimler daima dinamik olup değişime etki eden dalgaları oluşturan en önemli etken rüzgârdır. Elbette kıyı çizgisinin değişimine etki eden gel-git olayları gibi başka etkenlerde bulunmaktadır. Fakat esas etkenin rüzgâr dalgaları ile oluşan kıyıboyu kum taşınımı olduğu bilinmektedir.

Uzun kıyı çizgisine sahip bir ülke olan Türkiye'de kıyıboyu kum taşınımı özellikle Karadeniz sahillerinde sıkça görülür. Birçok liman, barınak ve kıyı boyunca uzanan karayolları, demiryolları gibi yapılar fonksiyonlarını yerine getirememekte, kısa sürede devre dışı kalmaktadır (Sandalcı, 1995).

Kıyıboyu kum taşınımı kıyı çizgisinin değişimine neden olmasından dolayı bir açıdan bakılırsa kıyı erozyonuna da neden olmaktadır. Bu değişiklikler kıyıda bulunan yerleşim bölgelerini olumsuz yönde etkilediği gibi liman, mendirek gibi kıyı yapılarının fonksiyonlarını da olumsuz yönde etkilemektedir. Öte yandan kıyı bölgesine yakın arazilerde sınır problemlerine neden olmaktadır. Bilhassa Sakarya ili Karasu ilçesinde ve benzeri yerlerde arazi anlaşmazlıkları vatandaşlar arasında huzursuzluk çıkartmaktadır. İlaveten kum taşınımı ile deniz tabanında hızlı değişiklikler görülmekte ve yüzme sezonlarında boğulma vakalarına sıkça raslanmaktadır. Bu çerçeveden bakıldığında kıyıboyu kum taşınımın bilinmesi son derece önemlidir. Dolayısıyla konu ile alakalı çalışmalar, araştırmalar, incelemeler ivmeli bir şekilde yürütülmekte ve araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Kıyıboyu kum taşınımı hakkında ilmi kabul edilen ilk araştırma Krumbein, 1944 yılında yapmış olduğu laboratuvar çalışmasıdır. Krumbein kıyıboyu kum taşınımı için labaratuvarda bir deney düzeneği kurarak kum taşınımını incelemiştir (Krumbein, 1944). Sonraları Pelnard-Considere 1956 yılında deneysel çalışmalarla matematik bir model geliştirmiştir (Pelnard-Considere, 1956). 1989 yılında Hanson tek çizgi modeli geliştirmiş ve analitik yöntemlerle yürütülen çalışmalarda bugün dahi çokça

kullanılmaktadır (Hanson,1989). İlaveten Shore Protection Manual (SPM) yöntemi deneysel olarak 1984 yılında Amerika Birleşik Devletleri kıyı araştırma merkezi tarafından geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır (U.S. Army, 1984). Öte yandan teknolojinin gelişmesi ile esnek modellemeler de son derece önem kazanmıştır. Son zamanlarda kıyı çizgisinin değişimi ile ilgili çalışmalar bu yöndedir. Esnek modellemeler sayesinde işlemler hem daha sade hale gelmekte hemde de zaman kaybını azaltmakta ve çözümü kolaylaştırmaktadır.

Dey ve arkadaşları 2021 yılında lineer regresyon oranı ve ağırlıklı lineer regresyon yöntemlerini kullanarak Gujarat-Hindistan'da Dahej kıyı çizgisindeki değişiklikleri tahmin etmiştir (Dey ve ark. 2021). Zhong ve El-Diraby Ontario gölünde kıyı çizgisinin değişimini makine öğrenimi tekniklerini kullanarak incelemiş ve hava fotoğrafları ile karşılaştırmıştır (Zhong & El-Diraby, 2022).

Xuanhao ve ark. 2024 yılında hem doğal hemde antropojenik tahmin yöntemleri geliştirerek uzun kısa süreli bellek anlamına gelen LSTM yöntemi ile Çin'deki Shenzhen sahillerinde kıyı erozyonunu incelemiştir (Xuanhao ve ark. 2024).

Yin ve ark. 2021 yılında Güney Vietnamda kıyı erozyonunu istatistik tahmin modellerini ve LSTM gibi makine öğrenimi yöntemleri kullanarak incelemiş kıyı çizgisinin fotoğraflarını çekerek karşılaştırmalar yapmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre istatistik ve LSTM yöntemlerinin iyi sonuç verdiğini belirlemiştir (Yin ve ark. 2021).

Iryanto ve ark., 2022 yılında Endonezya'nın Indramayu sahillerinde Eretan sahilindeki kıyı çizgisi incelemelerinde LSTM yöntemini kullanmıştır (Iryanto ve ark., 2022).

Wang ve arkadaşları ise 2023 yılında ABD'de su seviyeleri ve rüzgâr dalgaları ölçümlerinden yararlanarak LSTM yöntemi ile sığ sulardaki dalga enerjisi spektrumlarının tahmin etmişlerdir (Wang ve ark. 2023).

Li ve ark. 2020 yılında kıyı beslemesinin öneminden bahsetmişler ve kıyı beslemesinin morfolojisini oluşturmak için LSTM yöntemini kullanmışlardır. Geçmiş zaman serisi özelliklerini kullanarak elde edilen bilgiler LSTM de girdi olarak verilmiş ve çıktılar tahmin değerleri olarak elde edilmiştir. Bu sayede kıyının kum ile beslenmesinin morfolojisini modellemişlerdir (Li ve ark. 2020).

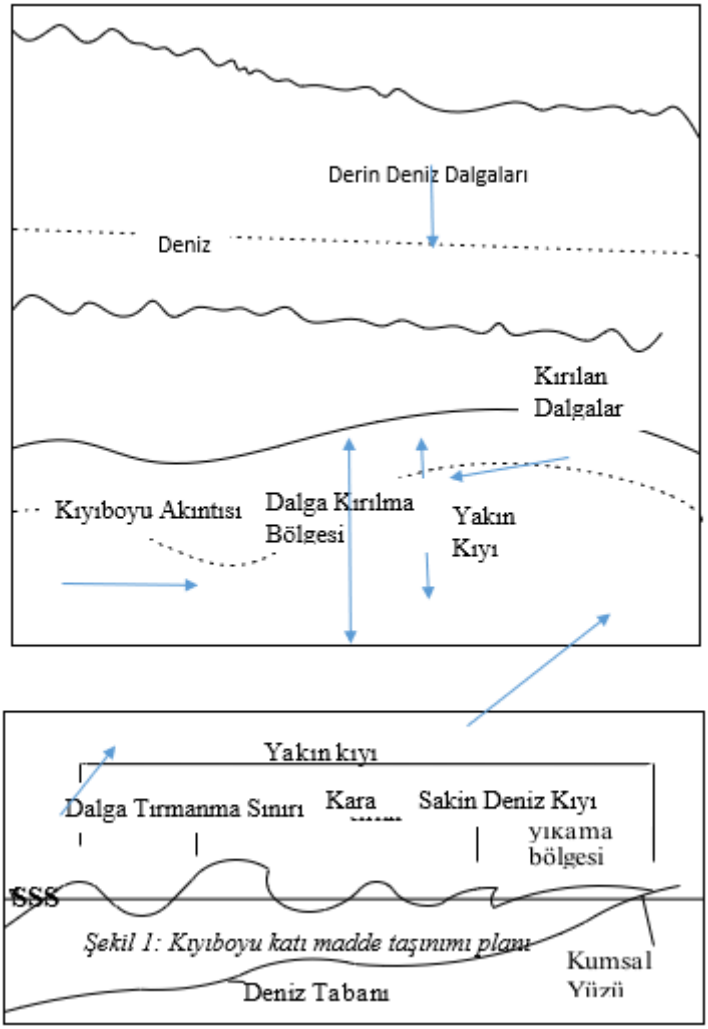
La Pena ve ark. 2023 yılında dalgaların yol açtığı kıyı şeridi değişimini tahmin etmek için derin öğrenme modeli kullanmış, yöntemin gözlemlenen zaman serilerinin yıllar arası değişkenliğini daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini belirlemiştir (Le Pena ve ark. 2023).

Kuriyama ve Banno 2016'da Niigata – Japonya'nın Batı kıyısı boyunca deniz seviyesi değişimi ve kıyı erozyonu nedeniyle kıyı şeridi değişikliğini bir kıyı şeridi tahmin modeli kullanılarak araştırmışlardır (Kuriyama & Banno, 2016).

Bu çalışmada öncelikle kıyıboyu kum hareketinin hareket denklemlerinden bahsedilecektir. Daha sonra sıkça kullanılan parametrik bir yöntem olan SPM yöntemi incelenecek ve son olarak bir derin makine öğrenimi yöntemi olan LSTM üzerinde durulacaktır. İlaveten MATLAB programında LSTM ile kıyı çizgisinin değişimi ile ilgili bilgisayar kodları verilecektir.

Kıyıboyu katı madde hareketi

Kıyıboyu katı madde hareketi, kıyıboyu akıntısı ile kum gibi kohezyonsuz malzemenin taşınması olup kimi zaman sediment transport olarak da adlandırılır. Kıyıboyu taşınımı ile ilgili plan, enkesiti ve kullanılan terimler Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir (Sandalcı,1995).



Şekil 2: Kıyıboyu kaı madde taşınımı enkesiti

Derin deniz dalgaları açık denizde rüzgarların etkisi ile oluşmaktatır. Açık denizde su derinliği fazla olduğundan dalga deniz tabanı ile etkileşime girmemektedir. Dolayısı ile dalganın

karekteristik özellikleri değişmemektedir. Şekil 1'de dar kesik çizgili hat dalgaların deniz tabanı ile etkileşime girdiği sınırı göstermektedir. Bu sınırdan karaya doğru dalgaların deniz tabanı ile etkileşimi girdiği ve bu yüzden özelliklerinin değiştiği görülmekte olup kırılan dalgalar olarak isimlendirilmektedir. Dalgaların deniz tabanı ile etkileşime girdiği sınır ile kıyı çizgisi arasındaki mesafe yakın kıyı olarak adlandırılmakta yakın kıyıdan denize doğru uzaklaşınca açık denizden bahsedilmekte ve bu bölge uzak kıyı olarak adlandırılmaktadır. Yakın kıyı bölgesinde dalgaların deniz tabanı ile etkileşime girmesiyle kıyıboyu kum taşınımına neden olan kıyıboyu akıntıları oluşmaktadır. Denizde dalganın olmadığı zaman aralığında denizen kara ile birleştiği noktaların geometric yeri kıyı çizgisi olarak bilinir. Bu durumda deniz seviyesi ise sakin su seviyesi olarak adlandırılır ve (SSS) ile gösterilir. Denizde dalga olması halinde denizen karaya doğru ulaşabileceği noktaların geometrik yeri ise dalga tırmanma sınırı olarak ifade edilir. Tabii ki bu sınırlar rölatif olup dalga yüksekliğine göre devamlı değişim içindedir.

Kıyı çizgisine parelel hareket eden katı maddenin Q debisi, kıyıboyu taşınım debisi olarak ifade edilir. Kıyıboyu taşınan katı madde kıyıda kimi zaman sagdan sola doğru kimi zaman soldan saga doğru taşınır. Bu olay rüzgar etkisi ile oluşan rüzgar dalgaları ortagonalının kıyı çizgisi ile yaptığı açıdan kaynaklanmaktadır. Kumsaldan denize doğru bakıldığında sağdan sola doğru olan kum hareketi (*lt*) indisi ile soldan saga doğru olan kum hareketi ise (*rt*) ile göserilir (sandalcı,1995). Bu durumda kıyıboyunca taşınan brüt taşınan katı madde (Q_g) miktarı aşağıda verilen Denklem 1 ile bulunur.

$$Q_g = Q_{rt} + Q_{lt} \tag{1}$$

Benzer şekilde net taşınan katı madde debisi (Q_n) Denklem 2 ile bulunur.

$$Q_n = Q_{rt} + Q_{lt} \quad (2)$$

Kıyıboyu kum aşınımının esas kaynağı akarsular ve kıyı erozynudur. Kütlenin korunumu prensipine göre kıyıda oluşturulan konrol hacmine giren ve çıkan katı madde miktarları arasındaki fark kıyıdaki oyulma ve yığılmalarla açıklanabilir.

Kıyıboyu kaı madde hareketine etki eden etkenler

Kıyıboyu katı madde hareketine etki eden etkenler denizde ve karada olanlar olarak ikiye ayrılır. Deniz suyunun fiziksel özellikleri, kıyı önündeki akımın özellikleri, deniz tabanının eğimi, taşınan kumun dane dağılımı kıyıboyu katı madde taşınımına etki eden deniz tarafındaki etkilerdir. Kara tarafında mendirek, mahmuz, kıyı koruma yapıları, kumsaldaki kumun dane dağılımı gibi özllikler katı madde taşınımına etki eden karadaki etkenlerdir.

Yakın kıyıda deniz tabanı ile etkileşime giren rüzgar dalgalarının bu etkileşim neticesinde kırılması, yansıması ve yön değiştirmesi kıyıboyu katı madde hareketinde önemli rol oynar. Öte yandan rüzgarın esme süresi, hızı da son derece önemli olup rüzgar dalgalarının özelliklerine doğru orantı ile etki eder. Bu yüzden baskın rüzgar yönünün ve belirgin dalga yüksekliğinin iyi tespit edilmesi gerekir.

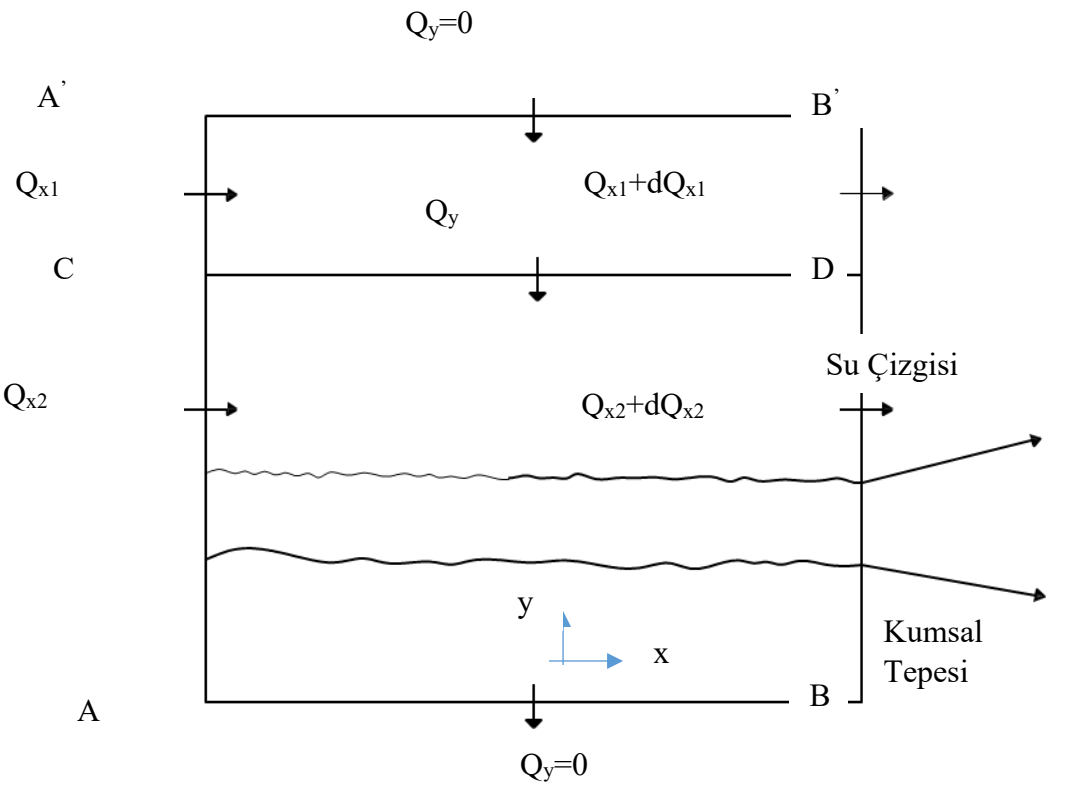
Kıyıboyu katı madde hareket denklemleri

Kıyı boyunca kum taşınımına neden olan katı madde denklemleri süreklilik ve hareket denklemlerine dayanır. Kıyıboyu kum taşınımı genellikle tek boyutlu olarak incelendiğinde bu çalışmada tek boyutlu akım denklemleri elde edilecektir (Sandalcı, 1995; Sandalcı ve ark.1992).

Katı madde süreklilik denklemi

Kıyıboyu kum taşınımı kütlenin korunumu ilkesinden yararlanılarak Denklem 3 gibi yazılabilir (O'Connar, 1994).

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + Q_y = 0 \qquad (3)$$

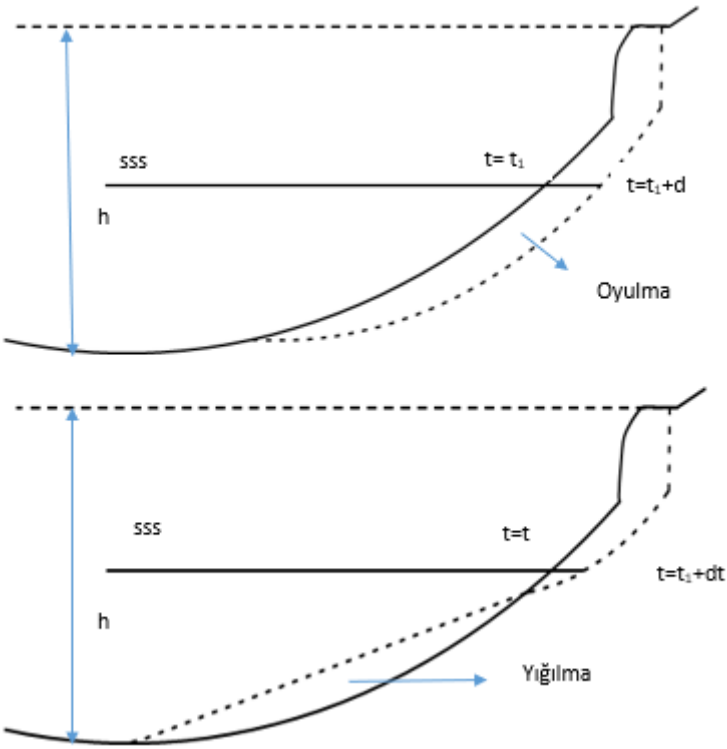


Şekil 3: Katı madde süreklilik denklemi için kontrol hacmi

Burada, (Q_x) x yönünde veya kıyıya parelel taşınan kum miktarı, (x) apsis ekseni, (A) yığılan veya oyulan kısmın alanı, (t) zaman, (Q_y) ise kıyıya dik taşınan kum miktarını ifade etmektedir. Şekil 3'de iki boyutlu katı madde süreklilik denklemi için kontrol

hacmi, Şekil 4'de kıyı erozyonunun zamana göre değişimi verilmiştir.

Şekil 3'de Başlangıçtta ABCD kontrol hacmine soldan sağa doğru giren kum gibi katı madde miktarı (Q_x) ile kontrol hacminden çıkan katı madde miktarı Q_x+dQ_x ile ifade edilmektedir. İlaveten taşınım rölatif olup burada soldan sağa doğru olduğu kabul edilmiştir. Süreklilik denklemine göre giren ve çıkan akım arasındaki fark kıyıda oyulmayı veya ığılmayı ifade etmektedir. A' ve B' noktaları kıyıda zamanla yığılma olduğunu ifade etmektedir. Şekil 3'den görüleceği üzere kıyıya dik katı madde taşınımı (Q_y) ile ifade edilip ihmal edilerek taşınımın sıfır olduğu kabulü yapılmıştır.



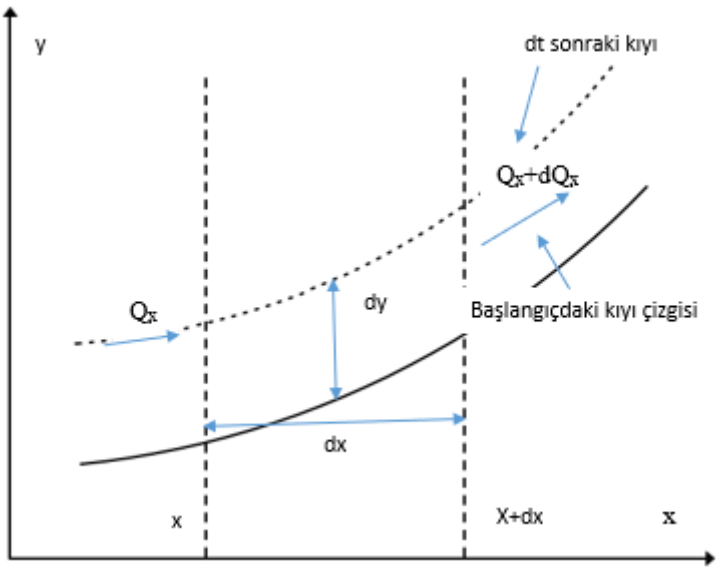
Şekil 4: Kıyı erozyonunun zamana göre değişimi

Şekil 4'de (h) su derinliğinde zamanla tabanda meydana gelen oyulma ve yığılmalar görülmektedir.

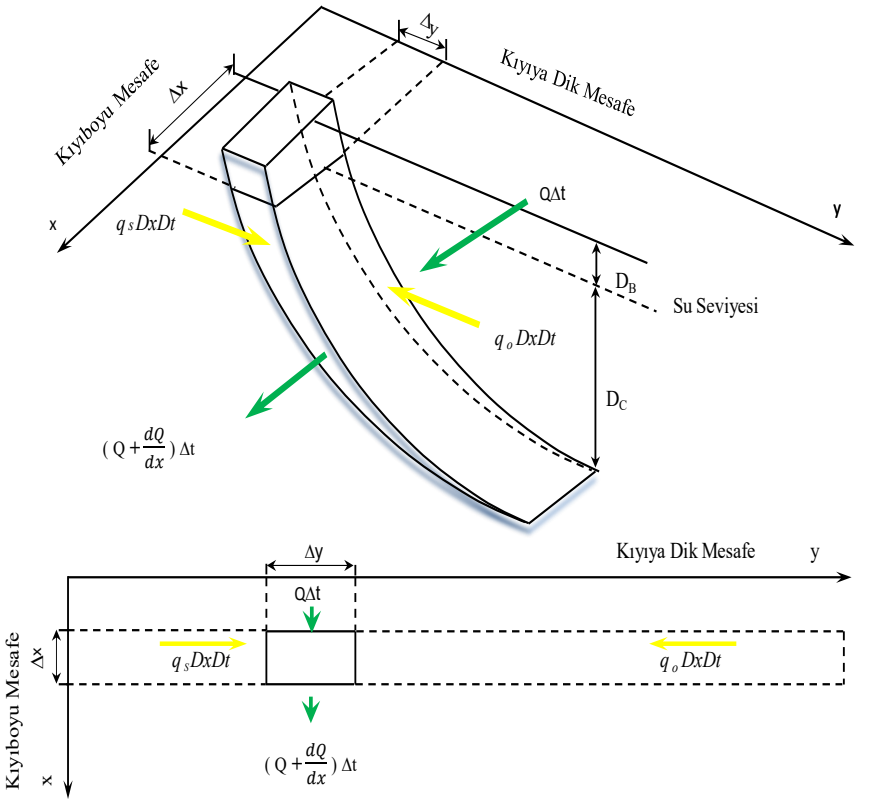
Sahilde kum hareketinin kartezyen koordinatlarda düzlemsel gösterimi Şekil 5'de, üç boyutlu görünüşü ise Şekil 6'de verilmiştir. Şekil 6'da yığılan veya oyulan kısmın tepeden topuğa kadar olan mesafesi (*D*) ile gösterilmiştir. Hanson & Kraus'a göre aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Hanson & Kraus, 1986).

$$D = 2.28 * H - 68.5 * \left(\frac{H}{T}\right)^2 \frac{1}{g} \qquad (4)$$

Burada; (*H*) dalga yüksekliği, (*T*) dalga periyou ve (*g*) yerçekimi ivmesidir.



Şekil 5: Bir boyutlu kum hareketi planı



Şekil 6: Üç boyutlu kıyıboyu kum taşınımı

Kıyıboyu taşınımı kıyıya dik taşınımdan daha çok etkili olduğundan Denklem 3 ile verilen iki boyutlu katı madde süreklilik denklemindeki kıyıya dik taşınan kum miktarı ihmal edilir. Bu durumda Denklem 5'de verildiği gibi tek boyutlu katı madde süreklilik denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial_x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \qquad (5)$$

Şekil 4'de kartezyen koordinatlarda *dxdy* alanı olan birim kalınlıktaki kontrol hacmine giren kum miktarı (Q_x) çıkan kum miktarı ise Q_x+dQ_x ile ifade edilmektedir.

Kütlenin korunumuna göre giren ve çıkan kum miktarlarının farkı pozitif ise kıyıda bir yığılma olduğunu negatif ise kıyıda bir oyulma olduğunu ifade eder. Bu durum Denklem 6 ile gösterilebilir.

$$Q_x dt - (Q_x + dQ_x)dt = dxdy * h \qquad (6)$$

Burada (h) su derinliğini ifade etmektedir. Denklem 6' de kısaltmalar yapılırsa Denklem 7 elde edilir.

$$-dQ_x dt = dxdy * h \qquad (7)$$

$dQ_x = \frac{\partial Q}{\partial x} dx$ ve $dy = \frac{\partial y}{\partial t}$ olduğu bilindiğine göre

Denklem 7 aşağıdaki Denklem 8 şeklini alır.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + h\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \qquad (8)$$

Sistemin fiziğinden dolayı su derinliği (h) oyulan veya yığılan kısmın derinliği yerine kullanılır ve (D) ile gösterilirse Denklem 9 elde edilir.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + D\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \qquad (9)$$

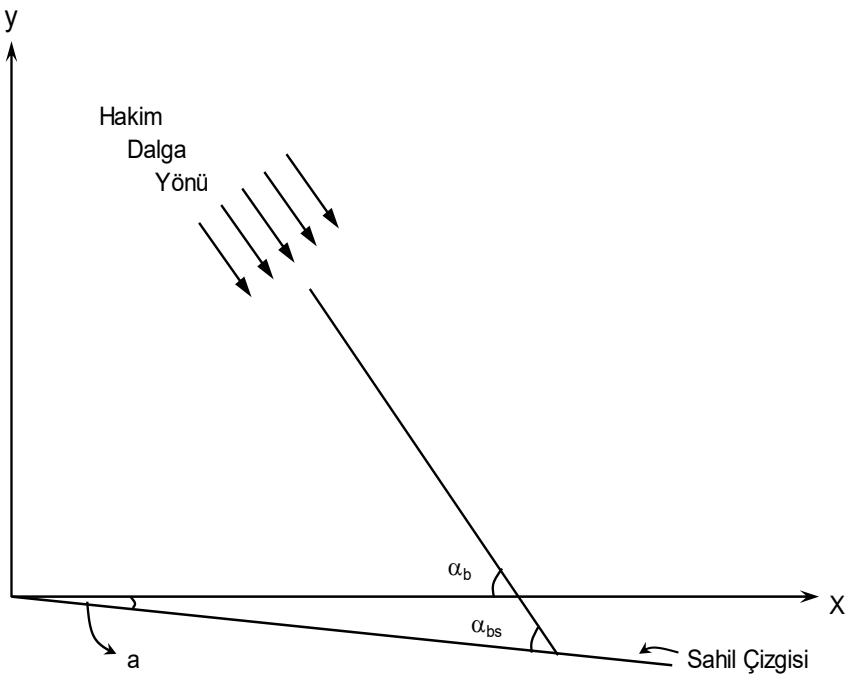
Denklem 9'da düzenleme yapılırsa Denklem 10 ile verilen katı madde süreklilik denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D}\frac{\partial Q_x}{\partial t} = 0 \qquad (10)$$

$A = h*\partial y = D * \partial y$ hatırlanırsa Denklem 9, Denklem 4 halini alır.

Katı madde hareket Denklemi

Seçilen bir *x-y* eksen takımına göre kırılan dalgaların (*x)* ekseni ile yaptığı açı (α_b) aşağıda Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'e göre $\partial Q_x/\partial x$ bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 7: Kırılan dalgaların x ekseni ve kıyı çizgisi ile yaptığı açı

$$\frac{\partial Q_x}{\partial \alpha_b} = -Q_x \tag{11}$$

$\partial Q_x/\partial x$ aşağıdaki Denklem 12 gibi yazılırsa;

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = \frac{\partial Q_x}{\partial \alpha_b}\frac{\partial \alpha_b}{\partial x} \tag{12}$$

$\alpha_b = - \partial y / \partial x$ ve ∂x_b terimleri küçük olduğundan ihmal edilirse Denklem 13 elde edilir.

$$\frac{\partial \alpha_b}{\partial x} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \tag{13}$$

Şekil 5'in geometrisinden iki iç açının toplamının kendisine komşu olmayan dış açının toplamına eşittir ilkesine göre aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\alpha_b = \alpha_{bs} + a \tag{14}$$

Denklem 14'de (a) açısı yerine türevi koyulursa;

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - arctg\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \tag{15}$$

Denklem 12'deki $\partial \alpha_b/\partial x$ yerine Denklem 13'deki değeri ve $\partial Q_x/\partial \alpha_b$ yerine $-Q_x$ yazılırsa;

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = -Q_x\left(-\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \tag{16}$$

Denklem 16, Denklem 8'de yerine yazılırsa;

$$Q_x\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + h\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{17}$$

Denklem 17'de Q_x/h yerine *(a)* dönüşümü yapılırsa Denklem 17 aşağıda Denklem 18 ile verilen katı madde hareket denklemi elde edilmiş olur.

$$a\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{18}$$

Denklem 18'de verilen diferansiyel denklem başlangıç ve sınır şartları kullanılarak çözülebilir. Ancak aşağıda verilen SPM yönemi kullanılarak çözüm daha sadelik teşkil ettiğinden sıkça tercih edilir.

SPM yöntemi

Amerika Birleşik Devletleri kıyı araştırma merkezi tarafından geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan SPM yöntemi aşağıda kısaca izah edilmiştir. Kıyı boyunca taşınan kum miktarı Denklem 19 ile bulunur (SPM,1984).

$$Q = K'\left(H^2 * C_g\right)_b * Sin2\alpha_{bs} \tag{19}$$

Denklem 19'deki K' terimi ise aşağıda verilen Denklem 20 ile bulunabilir.

$$K' = \frac{K}{16*(\gamma_S - 1)*a'} * \left(\frac{1}{r}\right)^{5/2} \quad (20)$$

Denklem 19 ve 20'de, (*K)* deneysel 0.4 civarında bir katsayı, (*H)* belirgin dalga yüksekliği, (*Cg*) dalga grup hızı, (*r)* $\sqrt{2}$ civarında bir katsayı, (γ_s) kumun özgül ağırlığının suyun özgül ağırlığına oranı olup boyutsuzdur, (a') taşınan kum hacminin toplam hacme oranı, (α_{bs}) kırılan dalgaların kıyı çizgisi ile yaptığı açıdır.

(α_{bs}) açısı ise Şekil 5'in geometrisinden yararlanarak Denklem 21 ile hesaplanır.

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - tg^{-1}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) \quad (21)$$

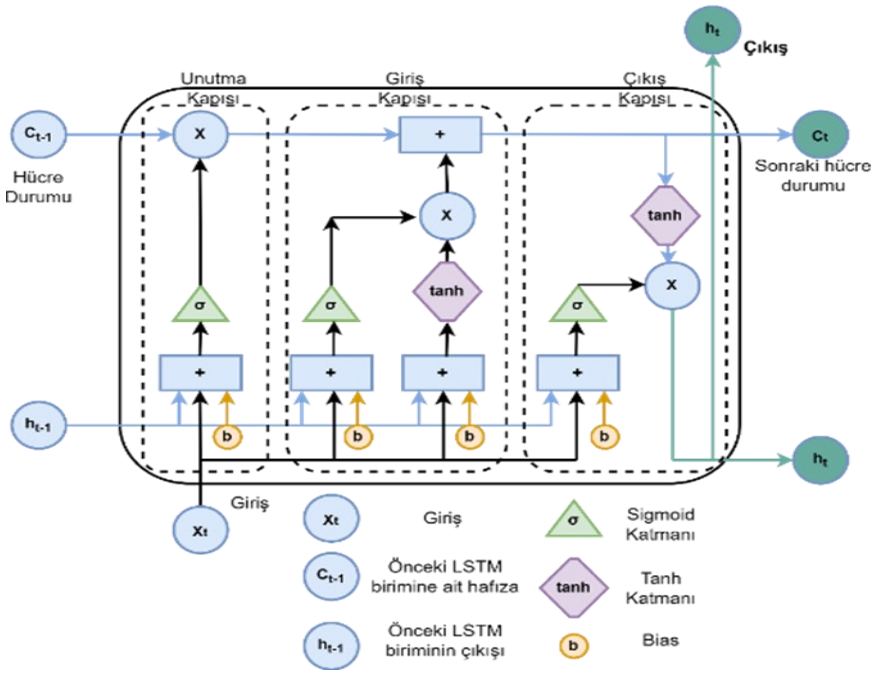
Kırılan dalgaların grup hızı ise Denklem 22 ile hesaplanabilir.

$$\left(C_g\right)_b = \left(\frac{H_b * g}{\delta}\right)^{1/2} \quad (22)$$

Burada, (α) kırılan dalgaları (x) ekseni ile yaptığı açı, (α_{bs}) kırılan dalgaların kıyı çizgisi ile yaptığı açı, (H_b) kırılan dalga yüksekliği, (g) yerçekimi ivmesi ve (**δ**) ise kırılma esnasında dalga yüksekliğinin derinliğe oranı olup 0.78 civarında bir katsayıdır.

LSTM yöntemi

İngilizce anlamı Long Short Term Memory'nin kısaltılmışı olan LSTM, Uzun-Kısa Süreli Bellek anlamına gelmektedir. İlk defa Hochreiter ve Schmidhuber tarafından ortaya atılmıştır (Hochreiter & Schmidhuber, 1996). Kısaca aşağıda genel olarak açıklanmıştır.



Şekil 8: LSTM mimarisi (Hochreiter,&Schmidhuber,1997)

LSTM yöntemi İngilizcesi Recurrent Neural Network (RNN) olan tekrarlayan sinir ağları türünün bir mimarisidir. Dört katmana sahip olup mimari yapısı Şekil 8'de verilmiştir (Hochreiter, & Schmidhuber, 1997). Şekil 8'den görüleceği üzere LSTM nin mimari yapısında unutma, giriş ve çıkış olmak üzere 3 kapıdan oluşmaktadır. Unutma kapısı saklanması gerekli olan bilgileri depolar. Unutulması gereken bilgileri ise gereksiz olduğuna karar vererek hafızadan siler. Unutma kapısının denklemi aşağıda Denklem 23 ile verilmiştir.

$$f_t = \sigma\left(W_f[h_{t-1}, x_t] + b\right) \tag{23}$$

Burada, (h_{t-1}) önceki gizli durumdan gelen bilgiler, (x_t) giren veriler, (σ) sigmoid fonksiyonu, (b) bias değeri, (W_f) ağırlık matrisini ifade etmektedir.

Giriş kapısında (x_t) gelen bilgileri saklanır. Sigmoid ve tanh katmanları bilgilerin güncellenmesini ve saklanmasını sağlar. Bu kapıda yapılan matematiksel işlemler Denklem 24, 25 ve 26 ile verilmektedir.

$$i_t = \sigma\left(W_f[h_{t-1}, x_t] + b_i\right) \tag{24}$$

$$N_t = tanh(W_n[h_{t-1}, x_t] + b_n) \tag{25}$$

$$C_t = C_{t-1}f_t + N_t i_{tt} \tag{26}$$

Çıkış kapısında yapılan işlemlerin matematiksel anlamları Denklem 27 ve 28 ile verilmiştir.

$$Q_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \tag{27}$$

$$h_t = O_t tanh(C_t) \tag{28}$$

Burada (W_o) çıkış kapısının matrisi (b_o) ise bias faktörüdür.

LSTM için MATLAB kodlaması

MATLAB programında LSTM ile çözüm yapabilmek için aşağıdaki kodlama geliştirilmiştir.

veri=xlsread('karasulstm.xlsx');%Veriler excelden çagırılmıştır.

input=veri(:,1);%gerekli sütun input olarak tanımlanmıştır.

```
input=input';%input transpozu alınmıştır.
data = input;
data = [data];

%Eğitim oranı belirlenmiştir.
numTimeStepsTrain = floor(0.80*numel(data));%Eğitim
oranı
dataTrain = data(1:numTimeStepsTrain+1);%Eğitim verileri
dataTest = data(numTimeStepsTrain+1:end);%Test verileri

Xmin=min(dataTrain)
Xmax=max(dataTrain)
dataTrainStandardized = (dataTrain-Xmin)/(Xmax-Xmin);

XTrain = dataTrainStandardized(1:end-1);
YTrain = dataTrainStandardized(2:end);

dataTestStandardized = (dataTest-Xmin)/(Xmax-Xmin);
XTest = dataTestStandardized(1:end-1);

numTimeStepsTest = numel(XTest);
for i = 2:numTimeStepsTest
    [net_1,YPred(:,i)] =
predictAndUpdateState(net_1,YPred(:,i-
1),'ExecutionEnvironment','cpu');
end
```

```
YPred=YPred*(Xmax-Xmin)+Xmin;

YTest = dataTest(2:end);
rmse = sqrt(mean((YPred-YTest).^2))

figure
plot(dataTrain(1:end-1))
hold on
idx =
numTimeStepsTrain:(numTimeStepsTrain+numTimeStepsTest);
plot(idx,[data(numTimeStepsTrain) YPred],'.-')

subplot(2,1,2)
stem(YPred - YTest)
xlabel("Ay")
ylabel("Hata")
title("RMSE = " + rmse)
net_1 = resetState(net_1);
net_1 = predictAndUpdateState(net_1,XTrain);

YPred = [];
numTimeStepsTest = numel(XTest);
for i = 1:numTimeStepsTest
   [net_1,YPred(:,i)] =
```

```
predictAndUpdateState(net_1,XTest(:,i),'ExecutionEnvironment','c
pu');
        end
        YPred=YPred*(Xmax-Xmin)+Xmin;
        rmse = sqrt(mean((YPred-YTest).^2))
        figure
        subplot(2,1,1)
        plot(YTest)
        hold on
        plot(YPred,'.-')
        hold off
        legend(["Gözlemlenen" "Tahmin"])
        ylabel("Yağış")
        title("Güncellenmiş Tahmin")
        subplot(2,1,2)
        stem(YPred - YTest)
        xlabel("Ay")
        ylabel("Hata")
        title("RMSE = " + rmse)
```

Kaynaklar

Dey, M., Sakthivel, P.S., Jena, B.K. (2021). A shoreline change detection (2012-2021) and forecasting using digital shoreline analysis system (DSAS) Tool: a case study of Dahej Coast, Gulf of Khambhat, Gujarat, India. *Indonesian Journal of Geography*. 53. https://doi.org/10.22146/ijg.56297.

Hanson, H. & Kraus, N.C. (1986). Coastal Engineering Research Center (U.S.), Waterways Experiment Station (U.S.), & United States. Seawall boundary condition in numerical models of shoreline evolution. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. https://doi.org/10.5962/bhl.title.48373.

Hanson, H., 1989. Genesis: A Generalized Shoreline Change Numerical Model. *Journal of Coastal Reseorch*. 5, 1–27. http://www.jstor.org/stable/4297483.

Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). LSTM can solve hard long time lag problems, In Advances: *Neural Information Processing Systems 9*, MIT Press Cambridge MA. Presented at NIPS 96.

Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9 (8), 1735-1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

Iryanto, Gunawan, P.H., Satrio, A., Baizal, Z.K.A., Ghozali, A.L., Ismantohadi, E. (2022). Shoreline Change Forecasting on Eretan Beach using Long Short Term Memory. *5th International Conference on Information and Communications Technology*

(ICOIACT).
https://doi.org/10.1109/ICOIACT55506.2022.9972113.

Krumbein, W.C. (1944). *Shore currents and sand movement on a model beach.* Technical Memorandum No.7, Beach Erosion Board Office of the Chief of Engineers, Washington, D.C.

Kuriyama, Y. & Banno, M. (2016). Shoreline change caused by the increase in wave transmission over a submerged breakwater due to sea level rise and land subsidence. *Coastal Engineering*, 112. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.02.003.

La Pena, E.G.D., Coco, G., Whittaker, C., Montano, J. (2023). A Convolutional Neural Network Model for Shoreline Change Prediction. In Coastal Sediments, The Proceedings of the Coastal Sediments. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0127.

Li, Y., Van Oosterom, P., Ge, Y., Zhang, X., Baartt, F. (2020). A CNN–LSTM Method for the Morphology Evolution Prediction of Beach Mega-Nourishment. *In: IEEE Access*, 8. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030119 .

O'Connar, B.A. (1994). Three-Dimensional Sediment Transport Model. Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book, Edited by M.B. Abbott and W.A., The Alden Press, Oxford.

Pelnard-Considère, R. (1957). Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. *Journées de L'hydraulique*, 4, 289-298.

Sandalcı, M., Ağıralioğlu, N., Savcı, M.E. (1992). Kıyı boyunca Katı madde Hareketi ve Yapı-Kıyı Etkileşimi, *İnşaat*

Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı III. Sempozyumu, İTÜ, Cilt II, Sayfa 404-418, İstanbul.

Sandalcı, M. (1995). Akarsuların, Denizlerdeki Kıyı Çizgisine ve Yapılarına Etkisinin bir Matematik Modelle İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

Shore Protection Manuel (SPM), 1984. Army corps of engineers, U.S. Government Printing Office Washington.

Wang, N., Chen, Q., Wang, H., Capurso, W.D., Niemoczynski, L. M., Zhu, L., Snedden, G.A. (2023). Field observations and long short-term memory modeling of spectral wave evolution at living shorelines in Chesapeake Bay, USA. *Applied Ocean Research*, 141. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103782.

Xuanhao, H., Yangfan, L., Xinwei, W. (2024). Integrating a multi-variable scenario with Attention-LSTM model to forecast long-term coastal beach erosion. *Science of The Total Environment*, 954. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176257.

Yin, C., Binh, L.t., Mai, S.T., Le, A., Nguyen, V.H., Nguyen, V.C., Tinh, N.X., Tanaka, H., Viet, N.T., Nguyen, L.D., Duong, T.Q. (2021). Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Nha Trang Shorelines. İn: IEEE Access, 9, 98132-98149. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3095339 .

Zhong, Y., El-Diraby, T. (2022). Shoreline Recognition Using Machine Learning Techniques. *IOP conference series earth and environmental science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022025.

BÖLÜM VIII

Karbon Elyaf Katkısının Bitümlü Bağlayıcılarda Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi

Muhammed Ertuğrul ÇELOĞLU[1]
Mustafa AKPOLAT[2]
Merve Gülfer BOZDEMİR[3]
Ayşe BURAL[4]

1. GİRİŞ

Esnek üstyapıların temel ve kaplama tabakalarında kullanılabilen bitümlü sıcak karışımların (BSK) ana bileşenleri bitümlü bağlayıcı ve agregadır. Bitümlü bağlayıcıların karışımdaki ana görevi BSK'ların kohezyonunu sağlamaktır. Agregalar ise karışımın

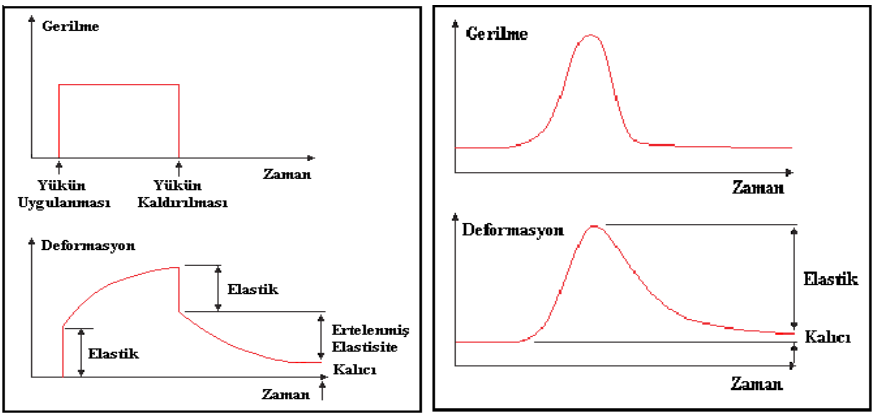
[1] Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0863-6436, meceloglu@bingol.edu.tr
[2] Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli/Türkiye, Orcid: 0000-0002-7070-3217, mustafaakpolat@munzur.edu.tr
[3] Dr. Öğr. Üyesi., Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5868-6613, merve.ozcan@erzurum.edu.tr
[4] Yüksek Lisans Öğrencisi, Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl/Türkiye, aysebaydas31@gmail.com

içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar ayrıca agrega tanelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler ile sürüş konforunu sağlamakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadır.

Reoloji, malzemelerin şekil değiştirme ve akış davranışını tanımlamak ve değerlendirmek için kullanılan bir bilim dalıdır. Bitüm, reolojik yapı olarak viskoelastik ve termoplastik özellik göstermektedir.

Bitümlü bağlayıcılar, reolojik özelliğinden dolayı yüksek taşıt hızlarında ve düşük sıcaklıklarda elastik katı, düşük taşıt hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda ise viskoz sıvı özelliği gös- termektedir (Airey, 2004). Bitümlü bağlayıcının bu özelliği karışıma da yansıdığından esnek üstyapı tabakaları da benzer davranış sergi- lemektedir.

Genel olarak, kaplama yapısında oluşan deformasyon miktarı, yükleme süresine ve sıcaklık değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 1.1 (a) ve (b) esnek kaplamalara uygula- nan yük sonucunda oluşan gerilme ve deformasyonların zamanla değişimini göstermektedir (Whiteoak, D., & Read, 2003).



Şekil 1.1: Bitümün statik (a) ve dinamik (b) yükler karşısındaki davranışı (Whiteoak, D., & Read, 2003)

Şekil 1.1 (a)'da görüldüğü gibi; yükün etki etmesiyle oluşan ani deformasyonu, yük kaldırılıncaya kadar dereceli olarak artan deformasyon takip etmektedir. Zamana bağlı olarak deformasyonda meydana gelen bu değişim malzemenin viskoelastik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Yükün kaldırılmasıyla elastik deformasyon ani olarak geri dönmekte ve zamanla 'ertelenmiş elastisite' adı verilen bir kısım geri dönüş daha meydana gelmektedir. Sonuçta, geri kazanılamayan ve doğrudan viskoz davranışın sebep olduğu bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelmektedir.

Şekil 1.1 (b)'de, bitümlü bağlayıcıların hareketli trafik yüklerine karşı davranışı görülmektedir. Deformasyon-zaman grafiğinde, her ne kadar yükün etkisinden önce ve sonra deformasyon değerleri aynı gibi görülse de çok küçük miktarlarda da olsa kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Sadece bir tekerlek yükü için tanımlanan küçük deformasyonlar, milyonlarca tekerlek

yükü tekerrürü sonucunda kaplama yapısında büyük bozulmalara sebep olmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımlarda trafik ve çevre koşulları nedeniyle tekerlek izi, nem hasarı, düşük ısı ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar meydana gelmektedir (Janoo, VC., & Korhonen, 1999). Bu kusurlar üstyapının beklenen servis ömründen önce bozulmasına sebep olmaktadır. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını arttırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla çok çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır (Roque, R., & ark., 2005).

2. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA KATKI KULLANIMI

Bitümlü sıcak karışımlarda trafik ve çevre koşulları nedeniyle tekerlek izi, nem hasarı, düşük ısı ve yorulma çatlakları gibi bozulmalar meydana gelmektedir (Janoo, VC., & Korhonen, 1999). Bu kusurlar üstyapının beklenen servis ömründen önce bozulmasına sebep olmaktadır. Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların ısıya ve trafik yüklerine karşı dayanımını ve performansını arttırarak üstyapının servis ömrünü uzatmak amacıyla çok çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır (Roque, R., & ark., 2005).

Kaplamaların farklı performans parametrelerine herhangi bir olumsuz etkide bulunmadan oluşabilecek bozulmaları engellemek yada geciktirerek kaplama servis ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Modifikasyon işlemi genel olarak katkı maddelerinin önceden bitüme katılması ile modifiye bitüm elde edilmesi veya asfalt

plentinde doğrudan doğruya karışıma katılması ile modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılabilmektedir.

Bitümün ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla mineral, organik, doğal ve endüstriyel kökenli katkılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Bardesi, A., & Brule, 1999). Bitüm ve bitümlü karışımların modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri ve etki ettikleri yapısal bozulma şekilleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Farklı tipteki katkı maddelerinin sağladıkları faydalar

Katkı türü	Sınıfı	Bozulma türlerine karşı faydaları				
		Kalıcı deformasyon	Yorulma çatlağı	Düşük ısı çatlağı	Nem hasarı	Yaşlanma
Fillerler	Karbon siyahı	X				X
	Mineral: *Hidrate kireç*	X				X
	Uçucu kül	X				
	Portlant çimentosu	X				
Genleştiriciler	Sülfür	X	X	X		
	Ağaç lignini				X	
Polimerler-Elastomerler	Stiren butadien di-blok SB	X		X	X	
	Stiren butadien tri-blok/radyalblok(SBS)	X	X	X		
	Stiren butadien kauçuk lateks SBR	X		X		
	Polikloropiren lateks	X	X			
	Doğal kauçuk	X				
Polimerler-Plastomerler	Etilen vinil asetat (EVA)	X	X			
	Etilen akrilat (EA)	X				
	Poliisobütilen	X				
	Polietilen (düşük ve yüksek yoğunluklu)	X		X		
	Polipropilen	X				
Öğütülmüş lastik	Farklı boyutlar, işlemler ve aşamalar	X	X	X		
Oksidanlar	Manganez bileşenleri	X				
Hidrokarbonlar	Aromatikler			X		
	Parafinikler/balmumu			X		
	Doğal Asfaltlar: *Trinidad*	X	X	X	X	
	Gilsonit	X			X	
Soyulma önleyiciler	Aminler: *Amidoaminler*				X	
	Poliaminler				X	
	Poliamidler				X	
	Hidrate kireç				X	
	Organo metalikler				X	
Fiberler	Polipropilen	X	X	X		
	Polyester	X		X		
	Fiberglas					
	Çelik	X	X	X		
	Güçlendirme	X	X	X		
	Doğal: *Seltiloz*	X				
	Mineral	X				
Antioksidanlar	Karbamatlar: *Kurşun*			X		X
	Çinko			X		X
	Karbon siyahı	X				X
	Kalsiyum tuzları					X
	Hidrate kireç				X	X
	Fenoller					X
	Aminler				X	X

(Bahia, & ark., 2001)

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve kaplamaya daha fazla mukavemet kazandırmak için birçok katkı malzemesi kullanılmaktadır (Ahmedzade, 2013). Bu nedenle yukarıda da anlatıldığı gibi birçok katkı malzemesi bu

amaçla üretim aşamalarında ve akademik çalışmalarda kullanılmaktadır.

3. KARBON ELYAF

Karbon elyaflar, poliakrilonitril (PAN) veya zift (pirolitik) öncülerinden üretilir. Bu öncüler, benzer şekillerde karbon liflerine işlenerek öncelikle sıvı formda elde edilir. Daha sonra lifler, karbonizasyon için gereken yüksek sıcaklıklarda (>700°C) yanmasını önlemek amacıyla oksitleyici bir atmosfere yerleştirilir. Bu aşamaya PAN lifleri için stabilizasyon ve zift bazlı lifler için infusibilizasyon denir. Karbonizasyon işlemi her iki öncü tür için de devam eder ve inert bir atmosferde gerçekleştirilir. Sonrasında tamamlanan lifler tekrar inert bir ortama yerleştirilir ve 2500°C'nin üzerinde bir sıcaklıkta grafitleştirilir, böylece nihai karbon lifi ürünü elde edilir. Genel olarak, karbon liflerinin özellikleri, farklı üretim süreçlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir (Chung, 1994).

Bitümlü bağlayıcılarda çeşitli sınıf ve tiplerdeki liflerin katkı malzemesi olarak kullanılması uygulama ve literatür çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bitümlü bağlayıcı ve karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanılan çok çeşitli tipteki liflerden karbon fiber lifleri ve türevleri sahip oldukları potansiyel açısından önem arz etmektedir. Karbon fiberlerin karbondan oluşması ve asfaltında bir hidrokarbon yapıda olması dolayısıyla doğal olarak uyumlu oldukları ve diğer liflere göre avantajlı oldukları düşünülmektedir. Günümüzde asfalt modifikasyonu için bir yöntem olarak liflerin kullanılması yönünde araştırmacılar çok sayıda çalışma yapmaktadır. Bu yönde yapılan çalışmaların artmasının sebebi bu katkı malzemelerinin bitümle uyumlulukları ve istisnai mekanik

özellikleridir. Karbon fiberler özellikle asfalt modifikasyonu için umut vaat etmektedir. Asfalt mastiğin karbon fiber ile modifiye edilmesinin rijitliği, karışımların yorulma özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra kalıcı deformasyonlara karşı direnci artırması yine bu yönde yapılan çalışmaların artmasının sebeplerindendir. Karbon fiber modifiyeli asfalt karışımlarının düşük sıcaklık performanslarını karbon fiberin yüksek çekme mukavemeti nedeniyle de arttırdığı yapılan çalışmalarda görülmüştür (Cleven, 2000).

Asfalta lif ilavesi, malzeme mukavemetini ve yorulma özelliklerini artırarak aynı zamanda sünekliği arttırmaktadır. Karbon fiberler, asfalt çimentosuyla uyumlu olmaları ve mükemmel mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle asfalt modifikasyonu için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Yeni üretim yöntemleriyle birlikte, karbon fiberle modifiye edilmiş bir asfalt bağlayıcının, maliyet açısından polimer modifiyeli bağlayıcılarla rekabet edebilecek düzeye gelmiştir. Diğer fiber modifiyeli kompozitlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, karbon fiberlerin asfalt karışımlarına eklenmesinin çekme mukavemetini artıracağı ve buna bağlı olarak düşük sıcaklıklardan kaynaklanan çatlama miktarında azalmaya neden olduğu ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini arttırdığı gözlemlenmiştir (Chung, 1994). Bu nedenle, birçok araştırmacı karbon fiber ekleyerek asfalt malzemesinin performansını çeşitli açılardan incelemiştir. Bu modifikasyon yöntemi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır.

Asfalt kaplamalar, trafik yükü ve çevresel etkiler nedeniyle zamanla bozulmaktadır. Bitümlü sıcak karışım tasarımında ve

üretiminde kaliteli malzemeler kullanılmazsa, asfalt kaplamaların hizmet ömrü kısalabilmektedir (Klinsky & ark., 2018). Son yıllarda, araştırmacılar asfalt karışımının performansını iyileştirmek için çeşitli katkı maddeleri kullanmaktadır. Bilim insanları ve mühendisler, asfalt karışımlarının stabilite ve dayanıklılık gibi özelliklerini kalıcı olarak iyileştirmek için bitüm veya asfalt karışımına yeni katkı maddeleri eklemektedirler (Frigio & ark., 2016) (Golestani C 2015). Çalışmalarda farklı lif türleri ile modifiye işlemi veya polimerlerin eklenmesi, bağlayıcıyı modifiye etmek için yaygın bir yöntemdir (Jahromi & Khodaii, 2009). Liflerin asfalt için çeşitli modifiye ediciler arasında çok dikkat çektiği, liflerin iyileştirici etkileri nedeniyle öne çıktığı belirtilmektedir (Wu & ark., 2008).

Özellikle boşluk oranı fazla olan poroz ve taş mastik karışımlarda asfaltın akmasını veya dağılmasını önlemek, çatlama ve tekerlek izine karşı direnci artırmak için lifler eklenmiştir (Mitchell & ark., 2009). Bağlayıcıya veya bitümlü karışımlara liflerin eklenmesi, bu karışımların stabilitesini ve mekanik mukavemetini artırmıştır (Xiong & ark., 2015). Bugüne kadar araştırılan lif türleri arasında polimerik lifler (polyester, polipropilen, poliakrilonitril), organik lifler (selüloz, lignin, hurma ağacı, palmiye yağı), mineral lifler (asbest, taş yünü), atık lifler (naylon, hurda lastik, tekstil) ve diğer lifler (cam, karbon, çelik) bulunmaktadır (Chen & ark., 2009). Lifler, asfalt karışımına daha yüksek dayanıklılık ve deformasyonlara karşı direnç kazandırarak daha sünek davranış göstermesini sağlamaktadır (Salari & ark., 2018). Doğal liflerin su emiciliğinin yüksek olması nedeniyle, yapay lifler genellikle tercih edilmektedir (Golestani & ark., 2015).

Bazı araştırmacılar, fiberin karışım tasarımında optimum bitüm içeriğini ve asfalt sızıntısını önlemesi nedeniyle asfaltın dayanıklılığını artırdığını (Hassan & ark., 2005), nem hassasiyetini iyileştirdiğini ve asfalt karışımların ve kaplamaların yansıma çatlak oluşumlarını azalttığını ortaya koymuşlardır (Tapkın, 2008).

Goh vd. (2011) nano-kil ve mikro-karbon fiberin asfalt karışımların nem hassasiyetine karşı dayanımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çekme mukavemeti oranı (TSR) deneyi uygulamış ve karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar nano-kil ve mikro-karbon fiber içeren tüm karışımların TSR değerlerinin, minimum değer olan 0,9 ile önerilen TSR değerinden daha yüksek olduğunu ve çeşitli kimyasallarla yapılan donma çözünme etkilerine karşı daha dirençli olduklarını göstermiştir (Goh & ark., 2011).

Hattak vd. (2012) karbon nano fiber modifikasyonunun asfalt bağlayıcıların ve karışımların performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma asfalt bağlayıcıda karbon nano fiber kullanımının viskozite, tekerlek izine karşı direnç ve yo rulma ömrü gibi asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca karbon nano fiber ile modifiye edilmiş karışımların, kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek dinamik modüle, rijitliğe ve yorulma ömrüne sahip olduklarını ortaya koymuştur (Khattak & ark., 2012) (Khattak & ark., 2013).

Tayh vd. (2020) karbon fiber ve selüloz hurma yağı liflerini üç farklı sınıf saf bitümde (B60/70, B80/100 ve PG-76) katkı maddesi olarak kullanmış ve elde edilen modifiye bitümlerin reolojik ve

fiziksel özelliklerinin karşılaştırmasını yapmışlardır. Asfalt ağırlığınca selüloz hurma yağı lifleri %0.15, %0.3, %0.45, %0.6 ve %0.75, karbon fiber lifleri ise %0.75, %1.25, %1.75, %2.25 ve %2.75 oranlarında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen modifiye bitümlerin saf bitümlere göre penetrasyon değerlerinin düştüğü, yumuşama ve viskozite değerlerinin yükseldiği, saf bitüm sınıflarına göre değişmekle birlikte genel olarak reolojik özelliklerinde iyileşme olduğu tespit edilmiştir edilmiştir (Tayh & ark., 2020).

Moghadas Nejad vd. (2014) bitümlü sıcak karışımların (BSK) performansını artırmak amacıyla karbon fiber kullanımının araştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada BSK'da karbon fiber kullanımının üst yapının mekanik özelliklerini fark edilir şekilde iyileştirdiğini göstermiş ve üst yapının servis ömrü boyunca ithiyaç duyacağı bakım ve onarım gereksinimlerini azaltacağını ortaya koymuşlardır (Nejad & ark., 2014).

Pang vd. (2014) ve Wu vd. (2015) farklı lif türlerinin fiziksel özelliklerini ve bunların bitümün mastik özelliklerini iyileştirici etkilerini değerlendirdikleri çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda karbon fiber liflerinin karışımlarda kullanımının, uygulanan yükleri aktarabilen ve tamponlayabilen bitüm içerisinde üç boyutlu boşluklu ağlar oluşturduğunu ve bu ağ yapısının agrega parçacıkları için daha kalın bir mastik yapı oluşturmasıyla da bitümün karışımdan süzülmesini azalttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca bu ağ yapısının asfalt mastiğinin tekerlek izi oluşumuna karşı direncini arttırdığını belirtmişlerdir belirtmişlerdir (Pang & ark., 2014) (Wu & ark., 2015).

Mawat ve Ismael (2020) asfalt karışımların nem hasarına karşı dayanımını incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada 3 farklı oranda (%0.1, %0.2 ve %0.3) ve 3 farklı uzunlukta (1 cm, 2cm ve 3cm) karbon fiber katkısını karışımları modifiye etmekte kullanmışlardır. Elde ettikleri modifiye karışımları Marshall stabilite ve akma, indirek çekme ve mukavemet indeksi deneylerine tabi tutmuşlardır. Deney sonuçları karışımlarda karbon fiber kullanımının genel olarak stabilite değerlerini arttırırken akma değerlerini azalttığı ve karışımların boşluk içeriğini arttırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca karbon fiber katkısının asfalt karışımların nem hassasiyetini azalttığını göstermiştir göstermiştir (Mawat & Ismael, 2020).

Jahromi ve Khodaii (2009) karbon fiberle güçlendirilmiş asfalt karışımlar üzerine yaptıkları çalışmada karbon fiber kullanımının karışımların hava boşluğu değerlerini yükseltmesine karşın maksimum stabilite değerlerini arttırdığını akma değerlerini düşürdüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda elde edilen karbon fiberle güçlendirilmiş karışım numunelerinin yorulma ömrü ve kalıcı deformasyona karşı daha yüksek dirence sahip olduğunu göstermişlerdir (Jahromi & Khodaii, 2009).

Liu ve Wu (2011) karbon fiber katkılı asfalt karışımların stabilite, tekerlek izi direnci ve elektrik iletkenliklerini değerlendirdikleri bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda karbon fiber katkılı asfalt karışımların Marshall stabilite değerle- rinin arttığı tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerinin iyileştiğini değerlendirmişleridir. Bunun yanısıra karbon fiber katksının beraberinde grafit kullanımıyla karışımlara elektrik iletkenlik özelliğinin kazandırıldığını belirtmişleridir (Liu & Wu, 2011).

Cleven M. A. (2000) yaptığı tez çalışmasında farklı oranlarda (%0.5, ve %0.8) ve farklı lif uzunluklarında (0.2 mm ve 0.65 mm'den 2.54 cm arasında değişen) karbon fiber modifiyeli asfalt karışımlar üretmiştir. Çalışmada modifiye asfalt karışımların mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla esneklik modülü, sünme, kiriş eğme yorulma ve indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda karbon lif katkılı karışımların daha yüksek mukavemet ve rijitlik değerlerine sahip oldukları, yüksek ve düşük sıcaklık performanslarının iyileştiği bunun yanısıra kalıcı deformasyona karşı daha iyi performans gösterdikleri belirtilmiştir. Ancak karışımların yorulma direncinde önemli bir farkın görülmediği de belirtilmiştir (Cleven, 2000).

Abtahi vd. (2010), çeşitli fiber takviyeli asfalt karışımların özelliklerini değerlendirdikleri bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada karışımlarda lif kullanımının karışımların viskoelastik özelliklerini iyileştirdiğini, nem hassasiyetini ve esnek kaplamalarda meydana gelen yansıma çatlaklarını azalttığını belirtmişlerdir (Abtahi & ark., 2010).

Karthik K. vd. (2015) yoğun gradasyonlu bitümlü makadam karışımda katkı maddesi olarak karbon elyafın kullanılmasının etkilerini araştırmak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada katkı maddesi olarak kullanılan karbon elyaf bitüm ağırlığınca %0.5, ve %2.5 oranlarında kullanılarak modifiye bitümler elde edilmiş ve makadam karışımlar bunlardan üretilmiştir. Elde edilen karışım numunelerinin optimum bitüm içerikleri, optimum lif uzunluğu, hacimsel özellikleri bulunmuş ve Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışma sonuçları karbon fiber kullanımının bitümlü karışımların stabilitesini ve boşluk oranını

arttırdığını, akma değerlerini düşürdüğünü göstermiştir. Bu sonuçlara göre, karbon fiber katkısının trafik yükleri nedeniyle yol kaplamasında meydana gelen bozulmalara karşı yapısal direnci geliştirme potansiyeline sahip olduğunu değerlendirmişlerdir (Karthik & Rohit, 2015).

Literatür taramalarından görüldüğü üzere yapılan çalışmalarda karbon fiber katkısının bitüm ve bitümlü karışımların performansını birçok yönden iyileştirdiği görülmektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

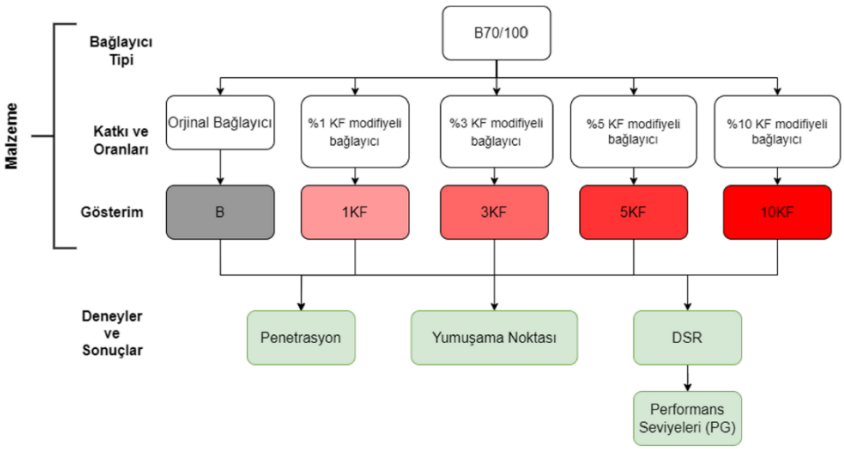
4.1. Materyal

Çalışmada ana bağlayıcı olarak Tüpraş Batman rafinerisinden B70/100 sınıfı bitüm ve bitüm modifikasyonunda katkı maddesi olarak KP Kompozit Pazarı A.Ş firmasından 80 mikron boyutunda öğütülmüş karbon elyaf malzemesi temin edilerek kullanılmıştır.

4.1. Yöntem

Karbon elyaf malzemesi saf bağlayıcıya (B70/100) ağırlıkça %1, %3, %5 ve %10 oranlarında ilave edilerek modifiye bitüm mikserinde (Şekil 4.1) 175C'de 1000 rpm karıştırma hızında 1 saat karıştırılarak üretilmiştir.

Yapılan çalışmanın deneysel planı Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1: Deneysel Plan

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

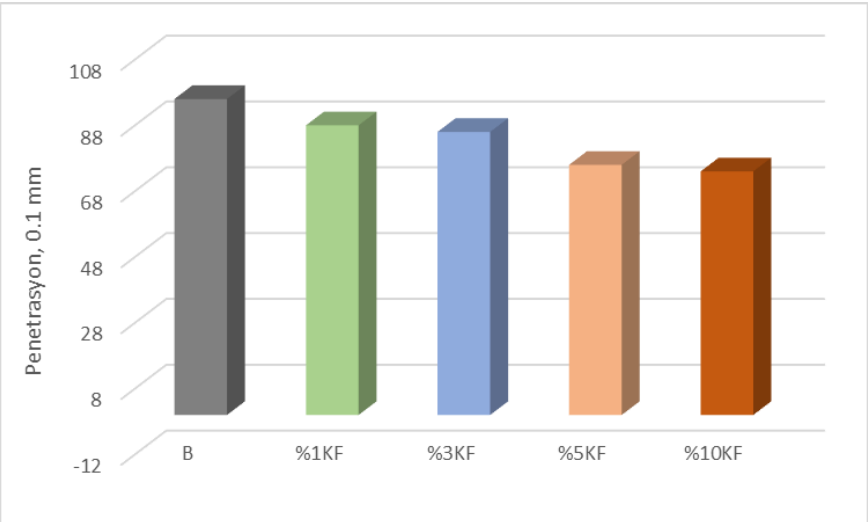
Çalışma kapsamında saf ve üretilen karbon elyaf katkılı modifiye bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri uygulanmıştır.

5.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

5.1.1. Penetrasyon Deneyi ve Sonuçları

Bitüm sınıflandırılmasında kullanılan geleneksel bir test yöntemi olan penetrasyon deneyi aynı zaman bağlayıcının kıvamını belirlemek için de kullanılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2007).

Bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Grafik 5.1'de görülmektedir.



Grafik 5.1: Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon deney sonuçları

Grafikte görüldüğü üzere en düşük penetrasyon değerine %10 karbon elyaf ile modifiye edilen bitüm, en yüksek penetrasyon değere ise saf bağlayıcı sahip olmuştur.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere katkı kullanımı ile saf bağlayıcıya göre penetrasyon değerleri azalmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamı artmıştır. Katkı içeriği arttıkça penetrasyon değerleri düzenli olarak azalmıştır.

%1 karbon elyaf içeren modifiye bitümün penetrasyon değeri saf bağlayıcıya göre %8,3 azalırken %3 karbon elyaf içeren modifiye bitümün penetrasyon değeri %11,6 oranında azalmıştır. %5 ve %10 karbon elyaf içeren modifiye bitümlerin penetrasyon

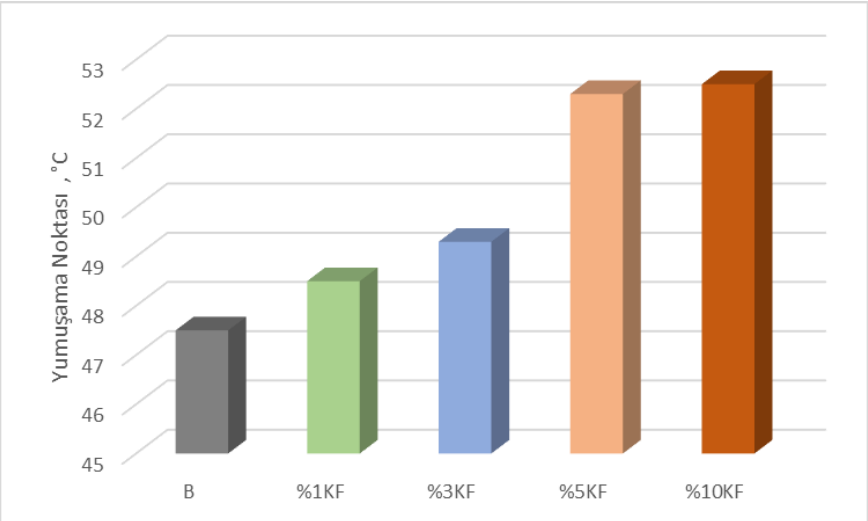
değeri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %20,8 ve %22,9 oranlarında azalmıştır.

Penetrasyon deney sonuçlarından karbon elyaf katkısının bitüm modifikasyonunda kullanılması durumunda penetrasyon değerlerinin azalacağı dolayısıyla bağlayıcılarının kıvamının artacağı belirlenmiştir. Deney sonuçlarından ayrıca bitüm modifikasyonunda karbon elyaf %5 ve %10 oranlarında kullanımının %1 ve %3 oranlarında kullanımına göre saf bağlayıcı üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. %5 ve %10 oranlarında karbon elyaf katkı kullanımının penetrasyon değişimi üzerinde benzer etkiye sahip olduğu görülmüştür.

5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi ve Sonuçları

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetlerini ve yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla, AASHTO T53 standartında belirtildiği gibi bitümle doldurulmuş standart halkanın üzerine bırakılan bilyenin sıcaklık artışıyla aşağıya doğru düşmesi ve bu düşüşün 2,5 cm olduğu andaki sıcaklık olarak tanımlanmaktadır (AASHTO T53-09 Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ringand-Ball Apparatus), 2004). Deney 5 °C'de başlatılarak sıcaklık her dakikada 5 °C artacak şekilde cihaz ayarlanır. Bağlayıcıların yumuşama noktalarının artması ile tekerlek izinde iyileşme sağlandığı bilinmektedir.

Saf ve modifiye bitümlere uygulanan yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar Grafik 5.2'de görülmektedir.



Grafik 5.2: Saf ve modifiye bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları

Grafikte görüldüğü üzere en yüksek yumuşama noktası değerine %10 karbon elyaf modifiyeli bitümün, en düşük değere ise saf bağlayıcının sahip olduğu görülmüştür. Katkı içeriğinin artması ile yumuşama noktası değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir.

Bitüm modifikasyonunda bitüm ağırlığınca %1, %3, %5 ve %10 oranlarında karbon elyaf kullanılması durumunda yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcının yumuşama noktası değerlerine göre sırasıyla %2,1, %3,8, %10,1 ve %10,5 oranlarında artmıştır. Penetrasyon deney sonuçlarına benzer şekilde %5 karbon elyaf kullanım oranından itibaren yumuşama noktası değerlerinde belirgin bir artış olmuştur.

Yumuşama noktası deney sonuçlarından bitüm modifikasyonunda karbon elyaf kullanılması ile yumuşama noktası değerlerinin arttığı dolayısıyla bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık dayanımlarının yükseldiği belirlenmiştir. Katkı kullanım oranları karşılaştırıldığında yumuşama noktası değerleri açısından en etkin oranın %10 karbon elyaf kullanımı durumunda olduğu fakat %5 karbon elyaf kullanımı ile %10 karbon fiber içeren modifiye bitümün yumuşama noktasının yaklaşık olarak eşit olduğu belirlenmiştir.

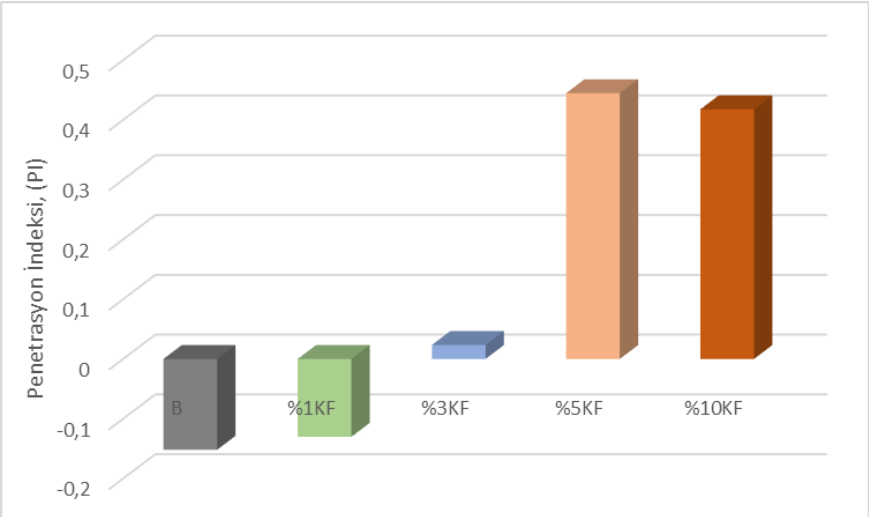
5.1.3. Bağlayıcıların Isıya Karşı Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

Penetrasyon indeksi (PI) değeri bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetlerinin göstergesidir. Bitümlü bağlayıcılar için ideal PI değeri -2 ile +2 arasındadır. PI değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıy karşı çok duyarlı olduğunu +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu ifade etmektedir.

Saf ve modifiye bitümleri PI değerleri penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden yararlanılarak Formül 5.1 ve Formül 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A=\frac{\log 800-\log P_{25}}{T_{YN}-25} \qquad 5.1$$

$$PI=\frac{20-500A}{1+50A} \qquad 5.2$$



Grafik 5.3: Saf ve modifiye bağlayıcıların penetrasyon indeksi değerleri

Grafik 5.3'te görüldüğü üzere saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri referans aralığı olan -2 ile +2 arasında kalmıştır. Bağlayıcılar arasında ısıya karşı en hassas olan saf bağlayıcı olmuştur.

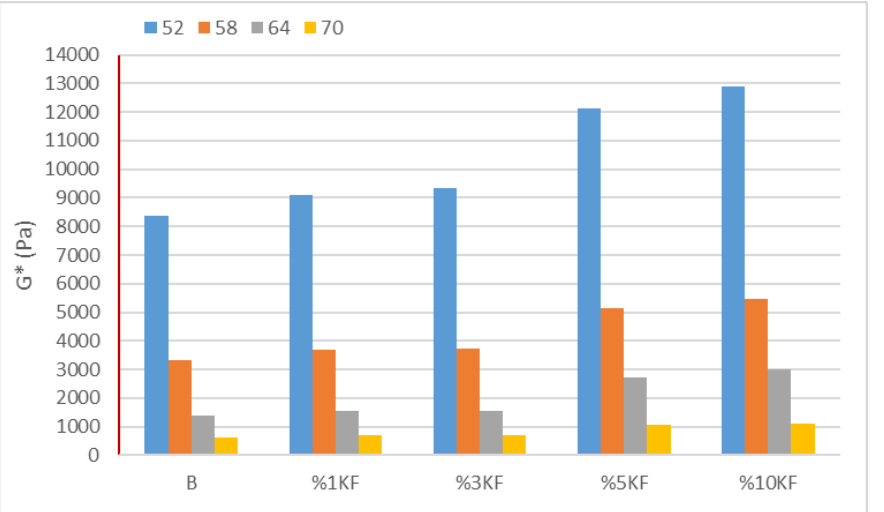
Penetrasyon indeksi değerlerindeki değişimlere bakıldığında karbon elyaf kullanımı ile penetrasyon indeksi değerleri saf bağlayıcıya göre artmıştır. Bu durum bitüm modifikasyonunda özellikle karbon elyaf kullanımının saf bağlayıcının ısıya karşı hassasiyetini azalttığını göstermektedir. Saf bağlayıcının ısıya karşı olan hassasiyetini en çok azaltan oranın %5 oranında karbon elyaf kullanımı durumunda olduğu görülmektedir. %1 ve %3 oranlarında karbon elyaf kullanımı saf bağlayıcının ısıya karşı hassasiyetini çok fazla değiştirmemiştir.

5.1.4. Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (DSR) ve Sonuçları

Dinamik Kayma Reometresi Deneyi (The Dynamic Shear Rheometer, DSR) belli bir sıcaklık ve kayma gerilmesi altında bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G*) ve faz açılarının (δ) belirlenmesiyle viskoz ve elastik davranışı karakterize edebilmek için yapılan bir deney yöntemidir. Kompleks kayma modülü (G*) ve faz açısı (δ) parametrelerinin belirlenebildiği test yöntemi ile bitümlü bağlayıcının tekerlek izine (G*/sin(δ)) ve kısa dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların yorulmaya karşı dayanımı (G*.sin(δ)) hakkında bilgi alınabilmektedir.

DSR deneyi ile ayrıca bitümlü bağlayıcının sıcaklık ve yük altında yorulma ve kalıcı deformasyona karşı direnci tespit edilerek yüksek sıcaklık performans sınıfı (PG) belirlenmektedir (AASHTO T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO T315, 2019).

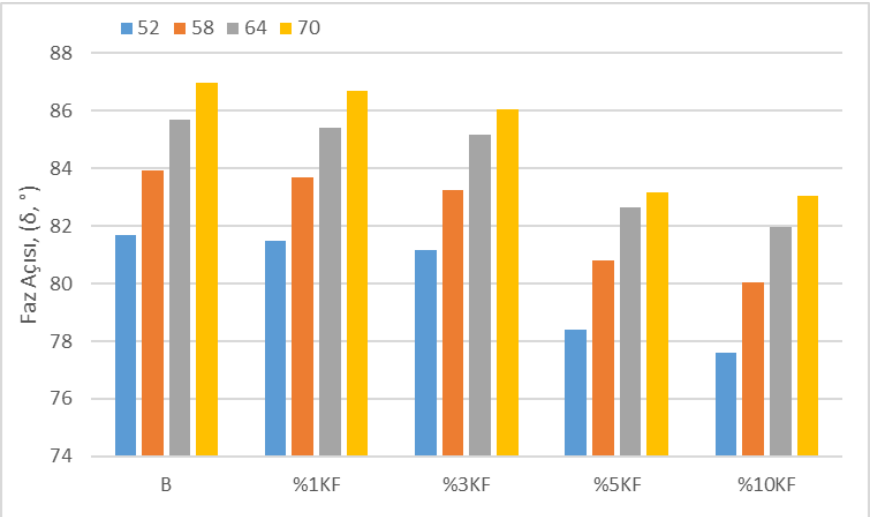
Bu çalışma kapsamında yaşlandırılmamış (orijinal) saf ve modifiye bitümlerin Superpave yöntemine göre performans seviyesi yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Bu nedenle Superpave şartnamesine uygun olarak saf bağlayıcı ve modifiye bağlayıcılar 4 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C) DSR deneyine tabi tutulmuştur. Uygulanan deneylerden elde edilen kompleks modül (G*) değerlerinin katkı türü ile değişimi Grafik 5.4'de, faz açısı (δ°) değerlerinin değişimi Grafik 5.5'de ve tekerlek izi parametresi (G*/sin δ) değerlerinin değişimi ise Grafik 5.6'da verilmiştir.



Grafik 5.4: Farklı sıcaklıklardaki kompleks modül (G) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi*

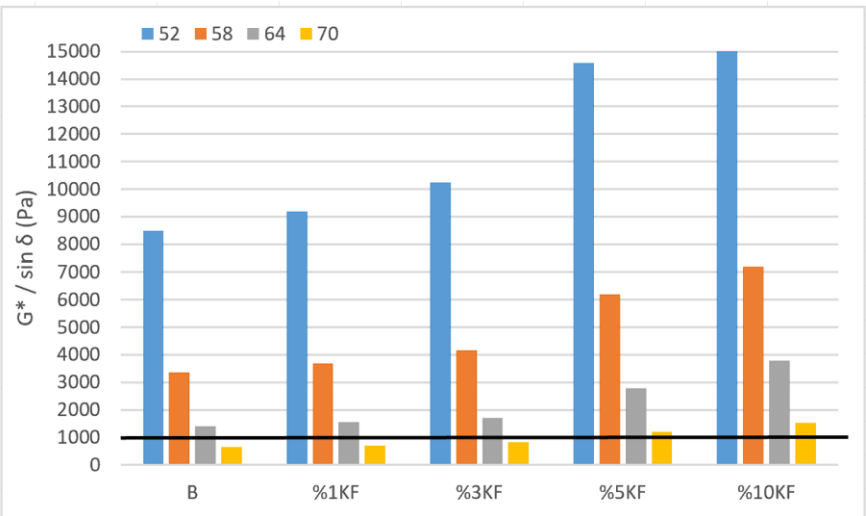
Grafik 5.4'de görülen kompleks kayma modülü (G*) değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile G* değerleri azalırken katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, dolayısıyla katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağlanacağı söylenebilmektedir. Kompleks kayma modülleri karşılaştırıldığında etkinliği en yüksek olan katkının bütün sıcaklıklarda %10 oranında karbon elyaf modifiyeli bağlayıcının olduğu, en az olan katkının ise %1 oranında karbon fiber modifiyeli bağlayıcının olduğu belirlenmiştir. %5 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı ile %10 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı modifikasyonunun G* değerleri açısından benzer etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Yine %1 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı ile %3 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı modifikasyonunun G* değerleri açısından benzer etkiye sahip olduğu ve saf bağlayıcının G* değerlerini önemli ölçüde

etkilemediği belirlenmiştir. Modifikasyonda karbon elyaf kullanımının %5 oranından itibaren G* değerleri üzerinde belirgin artış sağladığı gözlemlenmiştir.



Grafik 5.5: Farklı sıcaklıklardaki orijinal (yaşlandırılmamış) bağlayıcıların faz açısı (δ°) değerlerinin katkı türü ve oranı ile değişimi

Faz açısı (δ°) değerleri 0° ile 90° arasında değişmekte olup bu değerin sıfıra yakın olması elastikiyetin fazla olduğunu, 90°'a yakın olması ise viskoz davranışa daha yakın olduğunu göstermektedir. Grafik 5.5'de görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça δ° değerlerinin düzenli olarak arttığı dolayısıyla bağlayıcıların daha viskoz davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Bütün sıcaklıklarda saf bağlayıcının en yüksek δ° değerlerine sahip olması katkı kullanımının elastikiyeti arttırdığını göstermektedir.



Grafik 5.6: Farklı sıcaklıklardaki orijinal bağlayıcıların tekerlek izi (G/sinδ) parametrelerinin sıcaklık ve katkı türü ile değişimi*

Grafik 5.6'da verilen tekerlek izi dayanım parametreleri (G*/sin δ) incelendiğinde katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, sıcaklığın artması ile düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Superpave yöntemine göre orijinal bağlayıcılar için tekerlek izi dayanımı sınır değeri olan 1000 Pa değerlendirildiğinde 52°C, 58°Cve 64°C sıcaklıklarda bütün bağlayıcıların sağladığı, 70°C sıcaklıkta ise %5 ve %10 oranlarında karbon elyaf modifiyeli bağlayıcıların şartname kriterini sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan karbon elyaf malzemesinin katkı ürünü olarak kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkı maddesinin oranının kullanım oranına bakıldığında %5 katkılı karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir.

Bu sonuçlardan saf bağlayıcının, %1 ve %3 karbon elyaf katkılı modifiye bağlayıcıların performans seviyesinin PG 64-Y, %5 ve %10 oranında karbon elyaf katkılı modifiye bağlayıcıların modifiye bitümlerin performans seviyelerinin PG 70-Y olduğu belirlenmiştir. %5 ve %10 oranında karbon elyaf katkısı saf bağlayıcının performans seviyesini 1 derece arttırmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, artık bir yan ürün olan 80 mikron boyutundaki öğütülmüş karbon elyaf malzemesi katkı maddesi olarak kullanılmış, saf bağlayıcının (B70/100 sınıfı bitüm) performansına olan etkileri ve katkı maddesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Karbon elyaf katkısı saf bitüm içerisinde %1, %3, %5 ve %10 oranlarında kullanılmış böylece en optimum kullanım oranını tespit etmek amaçlanmıştır.

Saf bağlayıcı ve üretilen 4 farklı modifiye bağlayıcı üzerine penetrasyon, yumuşama noktası, DSR deneyleri uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

Penetrasyon deney sonuçlarına göre karbon elyaf kullanımı saf bağlayıcının penetrasyon değerini katkı oranlarının artmasıyla düzenli olarak azaltmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamı katkı kullanımı ile artmıştır. En düşük penetrasyon değeri %10 oranında karbon elyaf ile modifiye edilen bağlayıcıda görülmüştür. %1 ve %3 oranında karbon elyaf ile modifiye edilen bağlayıcılar saf bağlayıcının penetrasyon değerini önemli derecede düşürmemiş ve yakın sonuçlar vermiştir. %5 ve %10 oranında karbon elyaf ile modifiye edilen bağlayıcılar ise belirgin oranda saf bağlayıcının

penetrasyon değerini azaltmış ve birbirleriyle yakın sonuçlar vermiştir. Penetrasyon sonuçlarına göre %5 katkı kullanımının optimum kullanım oranı olduğu görülmüştür.

Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre karbon elyaf kullanımı saf bağlayıcının yumuşama noktası değerini katkı oranlarının artmasıyla düzenli olarak arttırmış dolayısıyla bağlayıcıların yüksek sıcaklığa karşı dayanımlarının iyileştiği belirlenmiştir. %1 ve %3 oranında karbon elyaf ile modifiye edilen bağlayıcılar saf bağlayıcının yumuşama noktası değerini önemli derecede arttırmamış ve yakın sonuçlar vermiştir. Katkı kullanım oranları karşılaştırıldığında yumuşama noktası değerleri açısından en etkin oranın %10 karbon elyaf kullanımı durumunda olduğu fakat %5 karbon elyaf kullanımı ile %10 karbon fiber içeren modifiye bitümün yumuşama noktasının yaklaşık olarak eşit olduğu belirlenmiştir. Penetrasyon deney sonuçlarına benzer şekilde %5 karbon elyaf kullanım oranından itibaren yumuşama noktası değerlerinde belirgin bir artış olmuştur.

Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden hesaplanan, bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetini ifade eden penetresyon indeksi (PI) sonuçlarına bakıldığında saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi değerleri referans aralığı olan -2 ile +2 arasında kalmıştır. Bağlayıcılar arasında ısıya karşı en hassas olan saf bağlayıcı olmuştur. Penetrasyon indeksi değerlerindeki değişimlere bakıldığında karbon elyaf kullanımı ile penetrasyon indeksi değerleri saf bağlayıcıya göre artmıştır. Bu durum bitüm modifikasyonunda özellikle karbon elyaf kullanımının saf bağlayıcının ısıya karşı hassasiyetini azalttığını göstermektedir. Saf bağlayıcının ısıya karşı olan hassasiyetini en çok azaltan oranın %5

oranında karbon elyaf kullanımı durumunda olduğu görülmektedir. %1 ve %3 oranlarında karbon elyaf kullanımının saf bağlayıcının ısıya karşı hassasiyetini çok fazla değiştirmediği görülmüştür.

Superpave şartnamesine uygun olarak saf ve modifiye bağlayıcılar 4 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C) DSR deneyine tabi tutulmuş bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyeleri, kompleks modül (G*), faz açısı (δ°) ve tekerlek izi parametre (G*/sin δ) değerlerinin katkı kullanımıyla değişimleri incelenmiştir.

Kompleks kayma modülü (G*) değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile G* değerleri azalırken katkı kullanımı ile bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, dolayısıyla katkı kullanımı ile kaymaya karşı direnç açısından fayda sağladığı görülmüştür. Etkinliği en yüksek olan katkının bütün sıcaklıklarda %10 oranında karbon elyaf modifiyeli bağlayıcının olduğu, en az olan katkının ise %1 oranında karbon fiber modifiyeli bağlayıcının olduğu belirlenmiştir. %5 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı ile %10 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı modifikasyonunun G* değerleri açısından benzer etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Modifikasyonda karbon elyaf kullanımının %5 oranından itibaren G* değerleri üzerinde belirgin artış sağladığı gözlemlenmiştir.

Faz açısı (δ°) değerleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile δ° değerlerinin düzenli olarak arttığı dolayısıyla bağlayıcıların daha viskoz davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Bütün sıcaklıklarda saf bağlayıcının en yüksek δ° değerlerine sahip olması katkı kullanımının elastikiyeti arttırdığını göstermiştir. Etkinliği en yüksek olan katkının bütün sıcaklıklarda %10 oranında karbon elyaf modifiyeli bağlayıcının olduğu, en az olan katkının ise %1 oranında

karbon fiber modifiyeli bağlayıcının olduğu belirlenmiştir. %5 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı ile %10 karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı modifikasyonunun δ° değerleri açısından benzer etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. δ° değerlerinin katkı kullanım oranlarına göre değişimleri incelendiğinde %5 karbon elyaf kullanımında saf bağlayıcıya göre belirgin düşüş gösterdiği tespit edilmiştir.

Tekerlek izi parametre (G*/sin δ) değerleri incelendiğinde katkı oranının artmasıyla bu değerlerin düzenli bir şekilde arttığı, sıcaklığın artması ile düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir. Superpave yöntemine göre orijinal bağlayıcılar için tekerlek izi dayanımı sınır değerini (1000 Pa) 52°C, 58°C ve 64°C sıcaklıklarda bütün bağlayıcıların sağladığı, 70°C sıcaklıkta ise %5 ve %10 oranlarında karbon elyaf modifiyeli bağlayıcıların şartname kriterini sağladığı belirlenmiştir. Karbon elyaf malzemesinin katkı ürünü olarak kullanımı ile bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarının artacağı, en etkin katkı maddesinin oranının kullanım oranına bakıldığında %5 katkılı karbon elyaf modifiyeli bağlayıcı olduğu tespit edilmiştir.

Saf bağlayıcının, %1 ve %3 karbon elyaf katkılı modifiye bağlayıcıların performans seviyesinin PG 64-Y, %5 ve %10 oranında karbon elyaf katkılı modifiye bağlayıcıların modifiye bitümlerin performans seviyelerinin PG 70-Y olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre %5 ve %10 oranında karbon elyaf katkısı saf bağlayıcının performans seviyesini 1 derece arttırmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde karbon elyaf kullanımının bitümlü

bağlayıcıların fiziksel özelliklerine olumlu yönde katkı sağladığı görülmüştür. Bu durum karbon elyaf katkılarının asfalt sektöründe kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılan öğütülmüş karbon elyaf artık bir yan üründür. Bundan dolayı kullanımı ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlıdır. Bu özelliğiyle asfalt sektöründe kullanılan katkı malzemelerine alternatif ve maliyet etkin bir katkı malzemesi olarak kullanılabileceği deneysel sonuçlar ışığında düşünülmektedir.

Karbon elyaf hakkında yapılan detaylı literatür araştırmasında bu malzemenin özellikle bitümlü sıcak karışımlarda kullanımının karışımlara mukavemet, yorulma ömrü, tekerlek izi direnci ve çatlak oluşumuna karşı direnç gibi kapmalarda sıkça görülen bozulma türlerine karşı fayda sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmada karbon elyaf katkısının bitümlü bağlayıcıların performansına olan etkileri incelenmiş olup bu malzemeyle alakalı daha ileride yapılacak olan çalışmalarda bitümlü sıcak karışımlarda kullanımı durumunda ortaya çıkacak etkilerinin araştırılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca çalışmada 80 mikron boyutunda kullanılan karbon elyaf malzemesinin farklı boyutlarında kullanımı durumunda nasıl bir fark oluşturacağıda araştırılması tavsiye edilen bir durumdur.

Kaynaklar

AASHTO T315, (2019). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO, (2019).

Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and Building Materials*, *24*(6), 871–877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009

Ahmedzade, P. (2013). The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, *38*, 285–291. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.090

Airey, G. D. (n.d.). Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal of Materials Science*, *39*, 951–959.

"AASHTO T53-09 Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ringand-Ball Apparatus)," (2004).

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). *Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials*.

Bahia, HU., Hanson, DI., Zeng, M., Zhai H., Khatri M.A., Anderson, R. M. (2001). *Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design*.

Bardesi, A., Brule, B. (1999). Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in road pavements. In *World Road Association (PIARC)*.

Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009). Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. *Materials & Design*, *30*(7), 2595–2603. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.030

Cleven M.A. (2000). *Investigation of the properties of Carbon Fiber Modified Asphalt Mixtures*. Master Thesis, Michigan Technological University.

D.D.L. Chung. (1994). *"Carbon Fiber Composites."* Butterworth-Heinemann Publishing, Newton, MA,.

Frigio, F., Raschia, S., Steiner, D., Hofko, B., & Canestrari, F. (2016). Aging effects on recycled WMA porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *123*, 712–718. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.063

Goh, S. W., Akin, M., You, Z., & Shi, X. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, *25*(1), 195–200. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.038

Golestani, B., Nam, B. H., Moghadas Nejad, F., & Fallah, S. (2015). Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. *Construction and Building Materials*, *91*, 32–38. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.019

Hassan, H. F., Al-Oraimi, S., & Taha, R. (2005). Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers

and Styrene Butadiene Rubber Polymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *17*(4), 416–422. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(416)

Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2009). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, *23*(8), 2894–2904. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.027

Jamal Khattak, M., Khattab, A., & R. Rizvi, H. (2013). Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *40*, 738–745. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.034

Janoo, VC., Korhonen, C. (1999). Performance testing of hot-mix asphalt aggregates. In *US Army Corps of Engineering Project*.

K.Karthik, M.Rohit, T. S. (2015). Carbon Fiber Modified Bitumen in Bituminious Macadam. *International Journal of Advance Engineering and Research*, *i*, 318–335.

Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R., & Zhang, P. (2012). The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology. *Construction and Building Materials*, *30*, 257–264. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.022

Klinsky, L. M. G., Kaloush, K. E., Faria, V. C., & Bardini, V. S. S. (2018). Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *176*, 747–752. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.221

Liu, X., & Wu, S. (2011). Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction and Building*

Materials, *25*(4), 1807–1811. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.082

Mawat, H. Q., & Ismael, M. Q. (2020). Assessment of Moisture Susceptibility for Asphalt Mixtures Modified by Carbon Fibers. *Civil Engineering Journal*, *6*(2), 304–317. https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091472

Mitchell, M. R., Link, R. E., Alvarez, A. E., Martin, A. E., Estakhri, C., & Izzo, R. (2009). Determination of Volumetric Properties for Permeable Friction Course Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, *37*(1), 101696. https://doi.org/10.1520/JTE101696

Moghadas Nejad, F., Vadood, M., & Baeetabar, S. (2014). Investigating the mechanical properties of carbon fibre-reinforced asphalt concrete. *Road Materials and Pavement Design*, *15*(2), 465–475. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.876442

Pang, L., Wang, P., Li, B., Pan, P., & Wu, S. P. (2014). Investigation of Rheological Characteristics of Carbon Fiber Modified Asphalt Binder. *Key Engineering Materials*, *599*, 182–186. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.182

Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., S. G. (2005). Guidelines for use of modified binders. In *Florida Department of Transportation Project*.

Salari, Z., Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2018). Analytical review of the mix design of fiber reinforced high strength self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, *20*, 264–276. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.025

Tapkın, S. (2008). The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Building and Environment*, *43*(6), 1065–1071. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.011

Tayh, S. A., Yousif, R. A., & Banyhussan, Q. S. (2020). A comparative study of physical properties using various grades asphalt binder with different type of fibers. *Journal of Engineering Research*, *17*(1), 34–40. https://doi.org/10.24200/tjer.vol17iss1pp34-40

Whiteoak, D., Read, J. (2003). *The Shell Bitumen Handbook, London, Thomas Telford Ltd.*

Wu, M.-M., Li, R., Zhang, Y.-Z., Fan, L., Lv, Y.-C., & Wei, J.-M. (2015). Stabilizing and reinforcing effects of different fibers on asphalt mortar performance. *Petroleum Science*, *12*(1), 189–196. https://doi.org/10.1007/s12182-014-0011-8

Wu, S., Ye, Q., & Li, N. (2008). Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*, *22*(10), 2111–2115. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.018

Xiong, R., Fang, J., Xu, A., Guan, B., & Liu, Z. (2015). Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, *83*, 44–52. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.089

BÖLÜM IX

Kesik Ve Yoğun Gradasyonlu Asfalt Karışım Tasarımı: İlkeler Ve Farklılıklar

Nimet İNKAYA[1]

1. Giriş

Asfalt beton tasarımı, yol yapımında dayanıklılığı, performansı ve uzun ömürlülüğü sağlamak amacıyla titizlikle yürütülen bir süreçtir. Bu süreçte kullanılan farklı tasarım yöntemleri, malzeme özellikleri, agrega gradasyonları ve uygulama gereklilikleri açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Kesik gradasyonlu asfalt karışım (Taş Mastik Asfalt (TMA)) tasarımı ise, yüksek dayanım ve deformasyon direnci sunan, özel bir agrega gradasyonu ve bağlayıcı içeriğiyle dikkat çekerken; yoğun gradasyonlu asfalt betonu ise, daha sıkı bir agregat yapısı, homojen dağılımı ve farklı tasarım parametreleri ile öne çıkar. Kesik gradasyonlu asfalt karışım tasarımı, genellikle ağır trafik yüklerine ve şiddetli iklim koşullarına dayanıklı yollar için tercih edilirken, yoğun gradasyonlu asfalt beton tasarımı daha yaygın bir kullanım alanına sahiptir ve çeşitli yol türleri için uyarlanabilir özellikler sunar. Bu makalede, Kesik gradasyonlu asfalt karışım tasarımı ile

[1] Öğretim Görevlisi., Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Ardahan/Türkiye, Orcid: 0000-0002-1624-9578, nimetinkaya@ardahan.edu.tr

yoğun gradasyonlu asfalt betonunun tasarım ilkeleri arasındaki farklar detaylı bir şekilde ele alınarak, her iki yöntemin avantajları, zorlukları ve uygulama alanlarına yönelik karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılacaktır.

2. Metot

Bu araştırmada, Web of Science ve Google Akademik veri tabanları kullanılmıştır. Literatür taraması, bu veri tabanlarında "TMA", "SMA", "yoğun gradasyon", "hot mix asphalt" ve "tasarım ilkeleri" anahtar kelimelerinin kombinasyonlarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen makale havuzu, konuya dair ilgili çalışmalarla oluşturulmuş, alakasız yayınlar ise dışarıda bırakılmıştır. Çalışmanın alt başlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Bölüm 3' te yol üstyapısına dair genel bilgiler sunulmuş, Bölüm 4' te yoğun gradasyonlu karışımlardan bahsedilmiştir. Bölüm 5' te kesik gradasyonlu (taş mastik) asfalt karışımlarına dair açıklamalar yapılmıştır. Bölüm 6, taş mastik asfalt tasarımı ile yoğun gradasyonlu asfalt betonun tasarım ilkeleri arasındaki farklılıklar üzerine bir inceleme sunmaktadır. Çalışmanın son bölümünde ise, tasarım ilkelerindeki farklılıkların sonuçları üzerine genel değerlendirmeler yapılmıştır.

3. Yol Üstyapısı

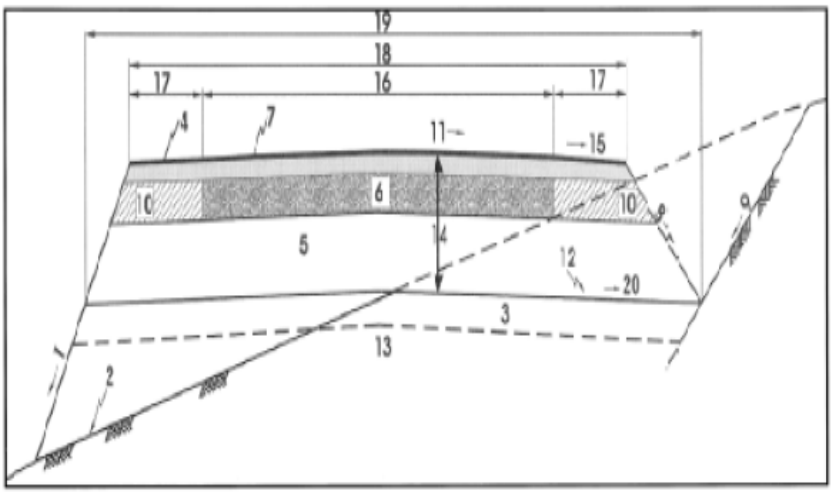
Ulaşım, ekonomik, sosyal ve çevresel sürekliliğin sağlanmasında kilit bir rol oynayarak yaşam kalitesini artırmakta ve bireyler, işletmeler ile endüstriler arasında etkin bir bağlantı kurmaktadır. Her türlü kalkınmanın temel taşlarından biri olan ulaşım altyapısı, bir ülkenin ekonomik gelişmişliği ile doğrudan ilişkilidir. Araştırmalar, ulaşım altyapısının boyutu ve kalitesinin ekonomik kalkınma seviyesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Ünal, Komut ve Kiziroğlu, 2018).

Türkiye'deki ulaşımın büyük bir kısmı karayolları üzerinden sağlanmaktadır. Karayolu ağı toplamda 68.654 km uzunluğundadır ve bu ağda 3.726 km otoyol, 30.864 km devlet yolu ve 34.064 km il yolu bulunmaktadır. Bu ağın %51'i sathi kaplama, %43'ü asfalt beton

kaplama, geri kalan %6'sı ise diğer yol türlerinden oluşmaktadır (KGM, y.y.). Türkiye'deki karayollarının büyük bir kısmı, esnek üstyapı olarak sathi kaplama ve asfalt beton (BSK ve Sathi) ile inşa edilmiştir. Karayolu üstyapıları üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

- Esnek üstyapılar,
- Rijit üstyapılar
- Kompozit üstyapılar

Şekil 1'de, tipik bir yol kesiti örneği sunulmuştur.



1- Dolgu Şevi
2- Doğal Zemin
3- Üstyapı Tabanı
4- Banket Kaplaması
5- Alttemel Tabakası
6- Temel Tabakası
7- Kaplama Tabakası
8- Hendek Şevi
9- Yarma Şevi
10- Banket Temeli
11- Yolun Enine Eğimi
12- Tesviye Yüzeyi
13- Yol Gövdesi Taban Zemini
14- Üstyapı Proje Kalınlığı
15- Banket Eğimi
16- Trafik Şeritleri Genişliği
17- Banket Genişliği
18- Yol (Platform) Genişliği
19- Üstyapı Tabanı Genişliği
20-Taban Yüzeyinin Enine Eğimi

Şekil 1. Yol Üstyapısı Tip Enkesiti

Kaynak: (KGM, 2008)

3.1. Karayolu Yapısı

Karayolu trafik yoğunluğunun artmasına paralel olarak karayolu ağınında genişlemesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Karayolu elemanları aşağıdaki gibidir (KGM, 2008):

Yol Altyapısı: Karayolları, yükleri taşıma görevini üstlenen üstyapı ve bu yükleri zemine ileten altyapı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Yol altyapısı, üstyapıdan gelen yükleri doğrudan alarak zemine aktarır. Yarma ve dolgu işlemleri, proje şartnamelerinde belirtilen kriterlere uygun olarak titizlikle gerçekleştirilmelidir.

Yol Üstyapısı: Yol üstyapısı, trafiğin doğrudan etkileşimde olduğu ve yükleri alarak alttaki tabakalar olan altyapıya ileten çok katmanlı bir sistemdir. Kullanılan malzemelerin özelliğine göre, esnek veya rijit davranış gösteren farklı üstyapı türleri bulunmaktadır.

Rijit Üstyapı: Trafik yüklerinin doğrudan etki ettiği ve bu yükleri kısmen absorbe ederek altyapıya ileten, betonarme malzemelerden oluşan üstyapıya rijit üstyapı denir.

Esnek Üstyapı: Altyapının üzerine inşa edilen, genellikle bitümlü bağlayıcılar kullanılarak oluşturulan ve trafik yüklerini esnek bir şekilde taşıyabilen çok katmanlı yapıya esnek üstyapı denir.

Bitümlü kaplamalar, yolun kullanım amacı, taşıdığı trafik yükü ve üretim yöntemine bağlı olarak farklı türlerde inşa edilebilmektedir. Esnek üstyapılar temel olarak iki ana sınıfa ayrılır:

- Karışım tipi kaplamalar (Bitümlü Karışımlar)
- Sathi kaplamalar

Bunun yanı sıra, kullanılan asfalt bağlayıcısının türüne göre bitümlü kaplamalar şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Soğuk kaplamalar
- Sıcak kaplamalar

Soğuk kaplamalarda bağlayıcı olarak sıvı petrol asfaltları veya asfalt emülsiyonları tercih edilirken, sıcak kaplamalarda 140 °C-170 °C sıcaklık aralığında ısıtılmış bitümlü bağlayıcılar (örneğin, saf bitüm ya da modifiye bitüm) kullanılır.

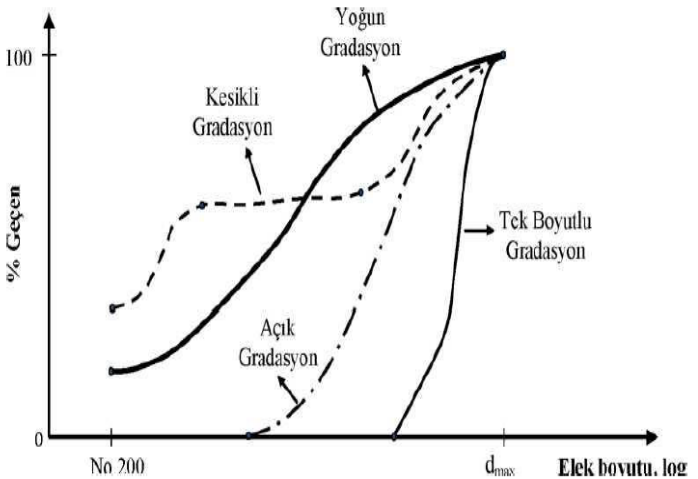
Sıcak karışımlı bitümlü kaplamalar, içindeki agrega taneciklerinin boyut dağılımı (gradasyon) ve kullanım amacına göre farklı gruplara ayrılır. Bu gruplar, karışımın sahip olduğu gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler açısından birbirinden ayrılır. Gruplandırma aşağıdaki gibidir (KGM, 2012):

Açık Gradasyonlu Karışımlar: Bu karışımlarda büyük boyutlu tanecikler daha fazla olup, aralarında büyük boşluklar bulunur. Bu sayede suyun yüzeyden daha hızlı uzaklaşmasını sağlayarak drenajı iyileştirirler. Genellikle üst katmanlarda, özellikle yağışlı bölgelerde kullanılırlar.

Kesikli Gradasyonlu Karışımlar: Belirli boyutlardaki taneciklerin eksik olduğu, düzensiz bir tane dağılımına sahip karışımlardır. Pürüzlü bir yüzey oluşturarak araçların yola daha iyi tutunmasını sağlarlar.

Yoğun Gradasyonlu Karışımlar: Tüm boyutlardaki taneciklerin dengeli bir şekilde dağılım gösterdiği, gözenekliliğin düşük olduğu karışımlardır. Yüksek dayanım ve stabiliteye sahiptirler. Yoğun trafik alanlarında ve ağır yüklere maruz kalan bölgelerde tercih edilirler.

Harç Tipi Karışımlar: İnce taneli malzemelerin (kum, toz) oranı yüksek olan, yapışkan kıvamlı karışımlardır. Düşük trafik yoğunluğuna sahip yollarda, yama çalışmaları ve ince tabaka kaplamalarda kullanılırlar. Mastik asfalt gibi harç tipi karışımlar, beton ve çelik köprülerde de sıkça tercih edilir. Şekil 2‘de agrega gradasyonlarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 2. Agrega gradasyonları

Kaynak: (Kabadayı, 2019)

4. Yoğun Gradasyonlu Asfalt Karışımlar

En yaygın asfalt türü olan asfaltik beton, sürekli gradasyonlu agrega, kum, filler ve bitümlü bağlayıcıdan oluşan bir karışımdır. Bu özellikler, kapsamlı kenetlenen bir yapı oluşturur ve serilmiş asfaltın dayanıklılığına ile performansına önemli ölçüde katkı bulunur. Yoğun gradasyonlu asfaltın durabilitesi ve dayanıklılığı, genellikle %3-7 oranında hava boşluğuna ve bitüm içeriği ile bulunur. Bu sıcaklıklara uygun şekilde optimize edilmesi oldukça önemlidir. Maksimum dayanıklılık sağlamak için, neredeyse tüm depolar doldurulacak miktarda yüksek bir bitüm içerikle kullanılabilir. Ayrıca, agrega-agrega kenetlenmeyi güçlendirmek ve trafik yükleri altında deformasyona karşı direnç sağlayan bir yapı oluşturulmalıdır. Karışımı oluşturan bağlayıcı türü, agrega türü ve cinsi, ve varsa katkı maddesi kulanımı yapısal sertliğine, yorulma ve deformasyon

direncine, yüzey dokusuna ve işlenebilirliğine doğrudan etki eder (Greer, 2006). Yoğun gradasyonlu asfalt karışımlar genel anlamı ile aşınma tabakasını, binder tabakasını veya her ikisini birden kapsar (KGM, 2013).

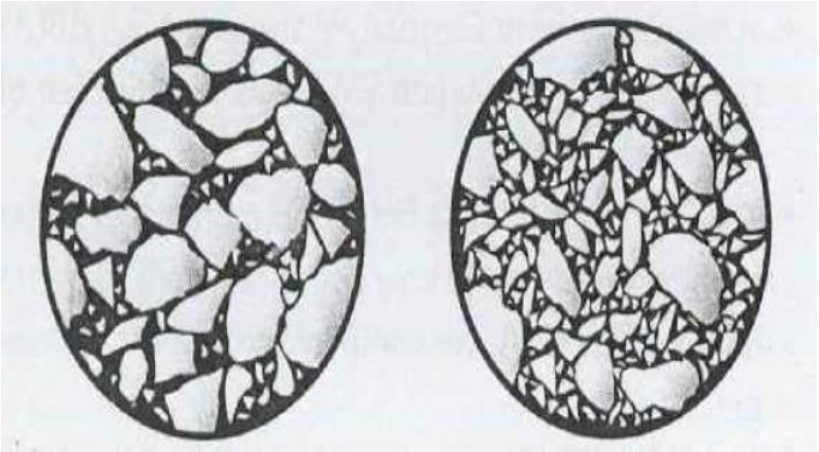
5. Kesik Gradasyonlu (Taş Mastik Asfalt) Karışımlar

Taş mastik asfalt (TMA), yüksek performanslı bir sıcak karışım asfalt türüdür. Diğer asfalt türlerine göre daha yüksek bir bitüm içeriğine sahip olması, karışıma yüksek dayanım ve su geçirmezlik özelliği kazandırır. TMA'da kaba agrega, karışımın taşıyıcı omurga iskeletini oluşturur. Bu kaba agregalar arasındaki boşluklar, ince agrega, mineral filler ve bitüm harcı ile doldurulur. Bu sayede, karışım içinde güçlü bir bağ oluşur ve yüksek bir kenetleme kuvveti elde edilir. Bu durum, TMA'ya diğer asfalt türlerine göre daha yüksek bir stabilite ve dayanım sağlar.

TMA'daki yüksek bitüm oranı, karışıma esneklik kazandırır ve düşük sıcaklıklarda bile çatlama riskini azaltır. Ancak, aşırı bitüm oranı, karışımdan bitümün sızması (kusma) riskini artırabilir. Bu sorunu önlemek için karışıma belirli oranlarda elyaf (fiber) eklenir. Elyaflar, bitümün karışımdan ayrılmasını engeller ve karışımın dayanımını artırır.

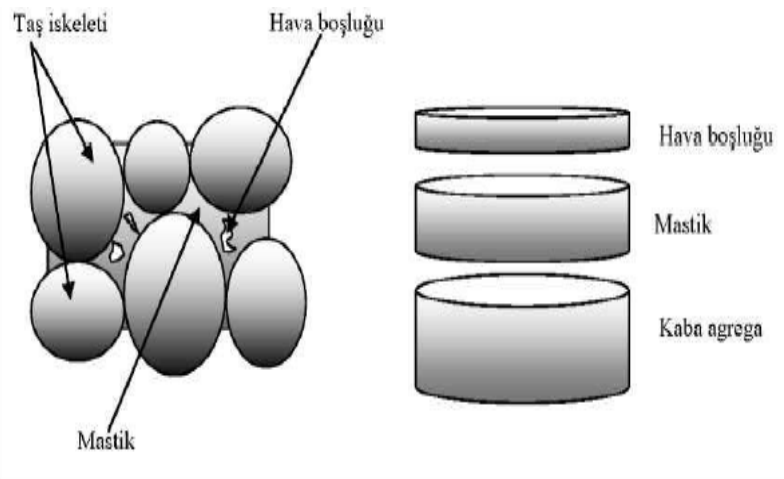
TMA, özellikle yoğun trafiğe maruz kalan otoyollar, tüneller ve köprülerde kullanılır. Yüksek dayanım, düşük gürültü seviyesi ve uzun ömürlü olması gibi özellikleri sayesinde, TMA, modern yol yapımında sıklıkla tercih edilen bir malzemedir (KGM, 2012). Şekil 3 ve Şekil 4 taş mastik asfalt karışımını oluşturan elemanları ve yoğun gradasyonlu karışım ile arasındaki farkı gösterilmektedir.

Taş Mastik Asfalt (TMA), geleneksel asfalt karışımlarına göre daha yüksek bir bitümlü bağlayıcı içeriğine sahip, özel bir sıcak karışım asfalt türüdür. Bu yüksek bağlayıcı oranı, TMA'ya bir dizi üstünlük kazandırır:



Şekil 3. TMA (solda) ve geleneksel BSK (sağda) yüzey dokuları

Kaynak: (NAPA, 2002)



Şekil 4. Taş mastik asfalt bileşimi

Kaynak: (Kulash, 1994)

6. Tasarım İlkeleri

Bitümlü karışımlar, bitümlü bağlayıcı ve agrega olmak üzere iki ana malzemeden oluşur. Bu karışım tasarımı, karışımların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde bölünmüş malzemelerin seçimini, agrega tane boyutunun durumunun belirlenmesini ve karışımın eklenecek bitümlü bağlayıcı miktarının tespitleri içerir. Elde edilen bu değerler, karışımın üretimi ve üretim sonrası kontroller için temel referans olarak kullanılır.

Bitümlü karışımların aşağıda verilen fonksiyonel özellikleri optimum düzeyde sağlaması beklenir;

- Stabilite
- Durabilite
- Esneklik
- Yorulmaya Karşı Direnç
- Geçirgenlik
- İşlenebilirlik
- Kaymaya karşı direnç

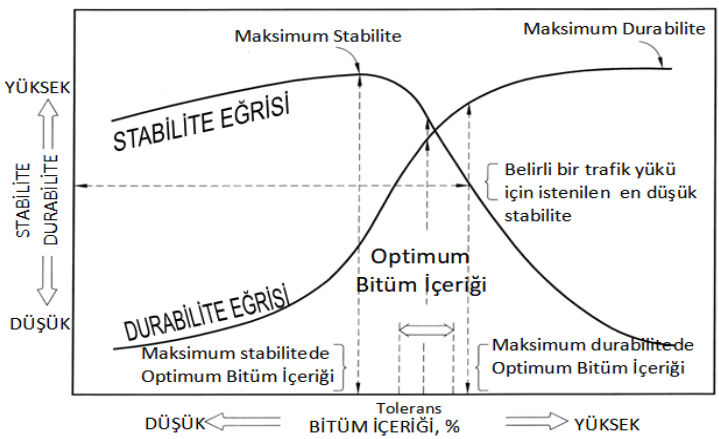
Stabilite, kaplamanın trafik yükleri altında şekil ve tekerleklerin izlerine karşı gösterdiği dirençtir. Stabil bir kaplama, tekrarlanan trafik yüklerine karşı şekli ve düzgünlüğünü koruyarak dayanıklılık gösterir. Bir karışımın stabilitesi, içsel güçler ve kohezyon gibi güçlere bağlıdır. Agrega taneleri arasındaki dahili şiddetler, agreganın şekli ve yüzey özellikleriyle birlikte koruyucunun agregaya tutunma gücüdür ve koruyucunun viskozitesi veya sıcaklıkla sınırlı kohezyon da artar. Kohezyon güçlenir. Ancak, aşırı bağlayıcı içerik, toplam tanelerinin arasındaki film gösterimini arttırır, dahili büyüklükleri azaltır ve stabildir.

Durabilite, bir asfalt kaplamanın koruyucu polimerizasyonu ve oksidasyonu nedeniyle fiziksel ve kimyasal değişimlere, agrega parçalanmaya ve koruyucu filmin agregadan ayrılmaya karşı gösterdiği dirençtir.

- Optimum miktarda,

- Yoğun derecelendirmeye sahip ve soyulma direnci yüksek agregaların tercih edilmesi,
- Maksimum geçirimsizlik sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Karışıma koruyucu miktarının artmasında, agregaların üzerinde oluşan kalın koruyucu film, uzatıcının yaşlanma sürecini değiştirerek orijinal özelliği daha uzun süre korumasını sağlar. Ayrıca bağlayıcılar, içindekiler içindekiler içeren hava birimlerini doldurarak su ve havanın girişini engeller. Bitüm içeriği, hem stabilite hem de dayanıklılık üzerinde önemli bir yapıya sahiptir. Bitüm içeriğinin stabilitesi azalabilirken, dayanıklılık artışı gösterebilir. Bu nedenle karışım tasarımında, stabilite sorunlarına yol açmadan ve yüksek dayanıklılığı sağlayabilecek optimum bitüm içeriği belirlenmelidir. Yüzey tabakalarında kullanılan karışımların miktarının, dayanıklılığın artırılması ve geçirimsizliğin sağlanması için yeterli düzeyde olmalıdır. Ancak bu miktarda kayma direnci ve tekerlek izi oluşumuna karşı direnç olumsuz etkilemeyecek şekilde tasarlanır.



Şekil 5. Bitümlü sıcak karışımda stabilite-durabilite ilişkisi ve bitüm içeriğinin belirlenme prensibi

Kaynak: (ASMÜD, y.y.)

Yoğun trafik ve zorlu iklim koşullarında kullanılan bitümlü karışımlar, bağlayıcıya veya karışıma ayrılan polimer gibi katkılarla iyi uygulanabilir. Sert ve dayanıklı agregalar, trafik yüklerinin aşındırıcı etkisine karşı direnç sağlar. Suya ve soyulmaya karşı dirençli agregalar, koruyucu filmin soyulmasını korur ve kaplamanın ömrünü uzatır. Bazı karışımların, karışımın soyulamaya karşı direncini artırması için soyulma önleyici katkılar mevcuttur. Ayrıca suyun ve havanın kaplamasının içerisine girişini minimum seviyede tutar. Şekil 5' de stabilite ile durabilitenin bitüm içeriği ile ilişkisi verilmiştir.

Esneklik, asfalt üstyapının çatlaması olmaksızın yük altında oluşan oturmalar veya zeminin su alarak şişmesi sonucunda ortaya çıkan hareketlere uyum sağlama kabiliyetidir. Açık gradasyonlu ve yüksek bağlayıcı içeriğe sahip karışımlar, yoğun gradasyonlu asfalt karışımlarına kıyasla daha dayanıklı bir yapıya sahiptir. Ancak , esneklik gereklilikleri ile stabilite özellikleri zaman zaman çelişebileceği için, asfalt tasarımlarında bu iki özellik: donma-çözülme ve kısmi yüklemelere karşı dayanıklılık arasında denge sağlayan optimum çözümler geliştirilir.

Yorulma direnci, asfalt kaplamanın trafik yüklerinden kaynaklanan tekrarlayan eğilmelere (deformasyonlara) karşı sarfiyatını ifade eder. Karışımdaki bölme oranı (bağlayıcı içeriğiyle doğrudan kullanılabilir) ve kalıcı viskozitesi, yorulma direnci üzerinde önemli bir stabiliteye sahiptir. Yetersiz sıkıştırma veya uygun olmayan tasarımın arttırılması artan havaları aynı şekilde, yaşlanma nedeniyle sertleşen da asfaltın yorulma direncini olumsuz etkiler. Daha kalın ve dayanıklı bir tabana sahip üstyapılar, yük altında daha az eğilme gösterir ve bu yorulma ömrü ince ve zayıf tabanlı üstyapılara göre daha uzundur.

Asfaltın geçirgenliği, malzemedeki gözeneklilik oranı ile doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek gözenekliliğe sahip asfalt karışımları, hava ve suyu daha kolay geçirir. Ancak, karışımın dayanımını etkileyen bu özellik, belirli sınırlar içinde tutulmalıdır.

Düşük asfalt içeriği ve yüksek boşluk oranı, genellikle daha yüksek geçirgenlikle sonuçlanır.

Asfalt karışımının işlenebilirliği, istenilen şekle getirilmesi ve yerleştirilmesi kolaylığını ifade eder. Bu özellik, karışımın içindeki agrega türü, boyutu ve miktarı, bağlayıcı türü ve miktarı, karışım sıcaklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. İri taneli ve sert agregalar içeren karışımların ayrılma riski daha yüksektir ve sıkıştırılması zordur. Çok ince taneli ve yüksek oranda bağlayıcı içeren karışımlar ise kolay deforme olabilir. Optimal işlenebilirliğe sahip bir karışım, hem yerleştirilmesi kolay hem de dayanıklı olmalıdır.

Asfalt yüzeylerin kayma direnci, araçların yolda güvenli bir şekilde tutunmasını sağlayan önemli bir özelliktir. Özellikle ıslak havalarda, araç tekerleklerinin asfalt yüzeyi ile olan etkileşimi, kayma direncini belirler. Kaba yüzeyli ve açık gradasyonlu agregalar içeren asfalt karışımları, daha yüksek kayma direnci sunar. Bu sayede, araçlar ıslak zeminde bile daha iyi tutunur ve kayma riski azalır. Aksine, düzgün ve parlak yüzeyler, suyun birikmesine ve araçların kaymasına neden olabilir.

Kesik gradasyonlu karışım tasarımı ile yoğun gradasyonlu asfalt betonunun tasarım ilkeleri karşılaştırıldığında; öncelikle karışımda kullanılan agrega çeşidi ve gradasyonu her iki karışım türü için farklılık göstermektedir. Karışımlar için kullanılan bitüm yüzdesi ve bitümü tutması için katkı malzemesi kullanılması da bir diğer tasarım farklılığı olarak ortaya çıkmaktadır.

Agrega çeşidi: TMA tipi karışımlarda stone-stone mekanizması olduğu için kullanılacak agrega çeşidi önem arz etmektedir. Cilalanma direnci yüksek agrega (bazalt vb.) kullanılması gerekmektedir. Bu agrega temini bu karışımın hem kullanılmasında hem de maliyetine etki etmektedir. Yoğun gradasyonlu sıcak karışımlarda kullanılan agrega için kırmataş gibi cilalanma değeri bazalt tipi agregalara göre daha düşük agregalar kullanılabilir. Her iki karışımda da farklı tip agrega kullanılmasının

hem artı hem de eksi yönleri vardır. Şekil 6 ve Şekil 7' de sırasıyla kesik gradasyonlu asfalt karışım ve yoğun gradasyonlu asfalt karışımda kullanılan kaba agrega özellikleri verilmiştir.

Agrega gradasyonu: TMA tipi karışımlarda iskeleti kaba agrega oluşturmaktadır. Bu yüzden ince ve filler malzeme ya hiç ya da neredeyse az kullanılmaktadır. Yoğun gradasyonlu sıcak karışımlarda kaba, ince ve filler agrega belli gradasyonda kullanılmaktadır. Her iki karışımda da farklı agrega gradasyonu kullanılmasının hem artı hem de eksi yönleri vardır. Şekil 8 ve Şekil 9' da ilgili karışımlara ait agrega gradasyon limitleri verilmiştir.

Deney	Şartname Limitleri[c]	Deney Standardı
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 25 (LA_{25})	TS EN 1097-2 [a] AASHTO T 96
Aşınma Direnci (Micro-Deval) [b], % Kayıp	≤ 20 (M_{DE} 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, ($MgSO_4$ ile kayıp), %	≤ 14 (MS_{14})	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi, %	≤ 25	BS 812
	≤ 20 (FI_{20})	TS EN 933-3 [a]
Cilalanma Değeri, %	≥ 50 (PSV_{50}) ≥ 40 (PSV_{40}) binder için	TS EN 1097-8
Kırılmışlık, ağırlıkça, % (Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)	≥ 100 - ≤ 0 ($C_{100/0}$)	TS EN 933-5
Soyulma Mukavemeti (Bitüm Kaplı Yüzey), % (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	TS EN 12697-11 (Kısım403 EK-A)
Su Emme, %	$\leq 2{,}0$ ($WA_{24}2$)	TS EN 1097-6
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	Bulunmayacak	ASTM C 142 AASHTO T 112

[a] Referans metot.
[b] Gerek görüldüğünde yapılacaktır.
[c] Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043 'deki sınıfını gösterir.

Şekil 6. Kesik gradasyonlu asfalt karışım kaba agreganın fiziksel ve mekanik özellikleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Deney	Şartname Limitleri [c]		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 30 (LA_{30})	≤ 27 (LA_{27})	TSEN 1097-2[a] (AASHTO T 96)
Aşınma Direnci (Micro-Deval)[b], % Kayıp	≤ 25 (M_{DE} 25)	≤ 20 (M_{DE} 20)	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, ($MgSO_4$ ile kayıp), %	18 (MS_{18})	16 (MS_{16})	TS EN 1367-2
Kırılmışlık, ağırlıkça % (Tüm yüzeyi kırılmış – tüm yüzeyi yuvarlak)	$\geq 95 - \leq 0$ ($C_{95/0}$)	$\geq 95 - \leq 0$ ($C_{95/0}$)	TS EN 933-5
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	≤ 25	BS 812
	≤ 25 (FI_{25})	≤ 20 (FI_{20})	TS EN 933-3[a]
Cilalanma Değeri, %	≥ 35 (PSV_{35})	≥ 50 (PSV_{50})	TS EN 1097-8
Su Emme, %	$\leq 2,5$ ($WA_{24}2,5$)	$\leq 2,0$ ($WA_{24}2,0$)	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Bitümle Kaplı Yüzey (24 saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	≥ 60	TS EN 12697-11 (Kısım 403 EK-A)
Kil Topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	ASTM C 142 AASHTO T 112

[a] Referans metot.
[b] Gerek görüldüğünde yapılacaktır.
[c] Parantez içindeki ifade, şartname değerinin TS EN 13043 'deki sınıfını gösterir.

Şekil 7. Yoğun gradasyonlu asfalt karışım kaba agreganın fizikse ve mekanık özellikleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Elek Boyu Mm (in, No)	TİP-1	TİP-2	TİP-3 Çok İnce Aşınma
19 (3/4")	100		
12,5 (1/2")	88 - 100	100	100
9,5 (3/8")	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6,0 (1/4")	-	-	25 - 33
4,75 (No.4)	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2,00 (No.10)	25 - 35	36 - 53	20 - 27
0,425 (No.40)	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0,180 (No.80)	7 - 14	8 - 16	
0,075 (No.200)	3 - 8	4 - 8	7 - 11

Şekil 8. Yoğun gradasyonlu asfalt karışım gradasyon limitleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Elek Boyutu		TMA TİP-1		TMA TİP-2	Tolerans Limitleri
		A	B		
in, No	mm	Geçen %	Geçen %	Geçen %	%
3/4"	19,0	100	100		
1/2"	12,5	90-100	90-100	100	± 4
3/8"	9,5	50-75	50-67	90-100	± 4
No.4	4,75	25-40	25-35	25-45	± 3
No.10	2,00	20-30	20-30	20-30	± 3
No.40	0,425	12-22	12-22	12-22	± 3
No.80	0,180	9-17	9-17	9-17	± 3
No.200	0,075	8-12	8-12	8-12	± 2

Şekil 9. Kesikli gradasyonlu asfalt karışım gradasyon limitleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Bitüm yüzdesi: Her iki karışımda da kullanılan agregaların yüzeyini kaplayacak şekilde bitüm kullanılır. Haliyle karışıma ilave edilecek bitüm yüzdesi hem agrega yüzeyine hemde agrega boşluklarını doldurması için değişiklik göstermektedir. Bitümün visko-elasto-plastik yapıda olması karışımların avantaj ve dezavantajlarını belirleyen diğer bir parametredir.

Bitümü tutmak için kullanılan polimer katkılar: TMA karışımlarda bitüm yüzdesi fazla olduğu için sıkıştırma esnasında ve sıkıştırma sıcaklığında bitümün agregalar arasında süzülmesi söz konusudur. Bu karışımlarda polimerik katkılar ilave edilerek süzülmenin önüne geçilmektedir. Bu durum yine TMA tipi kaplamalarda maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Yoğun gradasyonlu sıcak karışımlarda süzülmeyi önleyici katkı malzemelerinin kullanılmasına gerek yoktur.

Katkı maddeleri: Bitümün bazı özelliklerini geliştirmek için ilave katkı maddeleri kullanılabilir. Her iki karışımda da bu tarz katkı maddeleri karışım performansını artırmaktadır. Şekil 10 ve Şekil 11' de sırasıyla yoğun gradasyonlu karışım ve kesik gradasyonlu karışım tasarım kriterleri verilmiştir.

Özellikler	Binder		Aşınma TİP-1, TİP-2		Aşınma TİP-3		Deney Standardı
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	75		75		75		TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	400	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	3	5	5	12	TS EN 12697-8
Asfaltla Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	-	-	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	-	-	TS EN 12697-8
Akma, mm (10^{-2} in)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1,4	-	1,5			
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	3,5	6,5	4,0	7,0	5,0	8,0	TS EN 12697-1
Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci, İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %	80		80		80		AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma (30.000 devirde, 60 °C'de), maks. %	-		8		-		TS EN 12697-22
Tekerlek İzinde Oturma (3.000 devirde, 60 °C'de 5 cm kalınlığında numune), maks. %					7		TS EN 12697-22
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilecektir.							

Şekil 10. Yoğun gradasyonlu karışım dizayn kriterleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Özellikler		Şartname Limitleri		Deney Standardı
		TMA Aşınma	TMA Binder	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		50	50	TS EN 12697-30
Hava Boşlukları, (%) Sıcak İklim Bölgelerinde Hava Boşlukları, (%)		2 - 4 3 - 4	3 - 4	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk (VMA), (%) min.	TİP -1	16	13	TS EN 12697-8
	TİP -2	17		
Bitümlü bağlayıcı, (%) min.	TİP -1	5,8	5,2	TS EN 12697-1
	TİP -2	6,5		
İndirekt Çekme Mukavemeti (İÇM) Oranı, min. %		80	80	AASHTO T 283
Tekerlek İzinde Oturma * (30.000 devirde , 60 °C'de), (%) maks.		6	6	TS EN 12697-22
Elyaf Miktarı, %		0,3 - 1,0	0,2 - 0,8	
Schellenberger Bitüm Süzülme Deneyi, (%) maks.		0,3	0,3	TS EN 12697-18
Not: Tabakalar arası yapışma dayanımı TS EN 12697-48'e göre yapılabilecektir.				

Şekil 11. Kesikli gradasyonlu karışım dizayn kriterleri

Kaynak: (KGM, 2013)

Tüm bunlar karışımların tasarım ilkelerini etkiyen durumlardır. Tasarım performansına, maliyetlerine olumlu ve olumsuz etkileri bulunmaktadır.

7. Sonuç

Kesik ve yoğun gradasyonlu asfalt karışımlarının tasarımı, asfalt üstyapılarında doğrudan kritik bir şekilde sunulur. Kesik gradasyonlu karışımlar, genellikle drenajın bozulması, yüzeydeki suyun uzaklaştırılmasının arttırılması ve ses azaltılmasının sağlanması amacıyla tercih edilmektedir. Ancak bu karışımlar, yüksek içerikli bileşenler nedeniyle dayanıklılık ve dayanıklılık açısından yoğun gradasyonlu karışımlara kıyasla daha hassastır. Yoğun gradasyonlu karışımlar, düşük bileşenli bileşenler sayesinde daha yüksek bir stabilite ve geçirimsizlik sunar, aynı zamanda özellikle ağır trafik yükleri ve sert iklim koşullarında uzun ömürlü performans sağlar. Her iki karışım tipi, belirli mühendislik ve

pazarlama gereksinimlerine göre özelleştirilmiş özellikler ve iyi sonuçlar verir.

Kesik ve yoğun gradasyonlu karışımlar arasında seçim, standart, maruz kalacak kalın trafik yüklerine, iklim şartlarına ve ekonomik faktörlere bağlı olarak yapılabilir. Gelecekte, bu karışımların tasarımlarında, polimer katkıları ve geri dönüştürülebilir parçaların birleştirilmesi gibi gelişmiş çözümlerin daha fazla önemsenmesi sağlanabilir. Ayrıca, bu karışımların karbon ayak izi ve yaşam harcamalarının tasarım parçalarında izlenebilmesi için, desteğin sürdürülebilirliği artırılmaktadır. Kesik ve yoğun gradasyonlu karışımların optimal kullanımı, mühendislik performansı ile gereklilikler arasında dengeli bir çözüm sunma potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmada, kesikli ve yoğun gradasyonlu asfalt karışımların ülkemizdeki tasarım farklılıklarına değilmiştir. Karşımı oluşturan elemanlar için şartnamanin izin verdiği değerler incelenmiştir.

KAYNAKÇA

ASMÜD. (y.y.). *Asfalt Karışımları*. https://www.asmud.org.tr/Asfalt_Karisimlari.asp adresinden erişildi.

Greer, G. (2006). Stone Mastic Asphalt - A review of Its Noise Reducing and Early Life Skid Resistance Properties. *1st Australasian Acoustical Societies' Conference 2006, ACOUSTICS 2006: Noise of Progress* içinde (ss. 319–323).

Kabadayı, E. (2019, Haziran). *Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

KGM. (y.y.). Devlet ve İl Yol Envanteri. 14 Kasım 2024 tarihindehttps://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlYolEnvanteri.aspx adresinden erişildi.

KGM. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*. Ankara.

KGM. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Ankara.

KGM. (2013). *Karayolu Teknik Şartnamesi 2013*. Ankara.

Ünal, E. N., Komut, M. ve Kiziroğlu, S. (2018). Üstyapı Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi ve Ağ Seviyesinde Değerlendirmeler. *Karayolu 4. Ulusal Kongresi ve Sergisi* içinde (ss. 81–95).

BÖLÜM X

Taş Mastik Asfalt Karışımlar Sürüş Güvenliğini Nasıl Arttırmaktadır?

Nimet İNKAYA[1]

1. Giriş

Taş Mastik Asfalt (TMA), yüksek performansı ve dayanıklı yapısı sayesinde modern yol kaplama teknolojilerinde önemli bir yer edinmiştir. Geleneksel asfalt karışımlarına kıyasla daha yoğun agrega yapısına ve özel katkı maddelerine sahip olan TMA, sürücülerin güvenliğini arttıran önemli özellikler sunmaktadır. Özellikle yüksek trafiğe sahip yollar ve zorlu iklim koşullarında kullanılan Taş Mastik Asfalt, sürtünme katsayısının yüksek olması sayesinde kayma riskini azaltarak sürüş güvenliğini önemli ölçüde iyileştirir. Aynı zamanda, uzun ömürlü yapısı ve yüksek yüzey dayanımı ile tekerlek izi oluşmasının önünü keserek, sürüş sırasında

[1] Öğretim Görevlisi., Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Ardahan/Türkiye, Orcid: 0000-0002-1624-9578, nimetinkaya@ardahan.edu.tr

oluşabilecek olumsuzlukları minimize eder. Bu çalışma, Taş Mastik Asfalt karışımlarının sürüş güvenliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi ve bu teknolojinin trafik kazalarını önlemedeki potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Metot

Bu araştırmada, Web of Science ve Google Akademik veri tabanları kullanılmıştır. Literatür taraması, bu veri tabanlarında "TMA", "SMA", "sürüş güvenliği", "driving safety" ve "importance of aggregate size in driving safety" anahtar kelimelerinin kombinasyonlarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen makale havuzu, konuya dair ilgili çalışmalarla oluşturulmuş, alakasız yayınlar ise dışarıda bırakılmıştır. Çalışmanın alt başlıkları şu şekilde sıralanmıştır: Bölüm 3'te yol üstyapısına dair genel bilgiler sunulmuş, Bölüm 4'te taş mastik asfalt karışımlarına dair açıklamalar yapılmıştır. Bölüm 5, sürüş güvenliğini etkileyen parametreler üzerine bir inceleme sunmaktadır. Çalışmanın son bölümünde ise, taş mastik asfalt karışımlarının sürüş güvenliğine olan katkıları üzerine genel değerlendirmeler yapılmıştır.

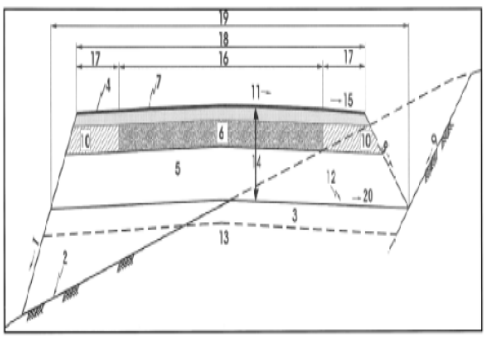
3. Yol Üstyapısı

Ulaşım, ekonomik, sosyal ve çevresel sürekliliğin sağlanmasında kilit bir rol oynayarak yaşam kalitesini artırmakta ve bireyler, işletmeler ile endüstriler arasında etkin bir bağlantı kurmaktadır. Her türlü kalkınmanın temel taşlarından biri olan ulaşım altyapısı, bir ülkenin ekonomik gelişmişliği ile doğrudan ilişkilidir. Araştırmalar, ulaşım altyapısının boyutu ve kalitesinin ekonomik kalkınma seviyesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir (Ünal, Komut ve Kiziroğlu, 2018).

Türkiye'deki ulaşımın büyük bir kısmı karayolları üzerinden sağlanmaktadır. Karayolu ağı toplamda 68.654 km uzunluğundadır ve bu ağda 3.726 km otoyol, 30.864 km devlet yolu ve 34.064 km il yolu bulunmaktadır. Bu ağın %51'i sathi kaplama, %43'ü asfalt beton kaplama, geri kalan %6'sı ise diğer yol türlerinden oluşmaktadır (KGM, y.y.). Türkiye'deki karayollarının büyük bir kısmı, esnek üstyapı olarak sathi kaplama ve asfalt beton (BSK ve Sathi) ile inşa edilmiştir. Karayolu üstyapıları üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

- Esnek üstyapılar
- Rijit üstyapılar
- Kompozit üstyapılar

Şekil 1'de, tipik bir yol kesiti örneği sunulmuştur.



1- Dolgu Şevi
2- Doğal Zemin
3- Üstyapı Tabanı
4- Banket Kaplaması
5- Alttemel Tabakası
6- Temel Tabakası
7- Kaplama Tabakası
8- Hendek Şevi
9- Yarma Şevi
10- Banket Temeli
11- Yolun Enine Eğimi
12- Tesviye Yüzeyi
13- Yol Gövdesi Taban Zemini
14- Üstyapı Proje Kalınlığı
15- Banket Eğimi
16- Trafik Şeritleri Genişliği
17- Banket Genişliği
18- Yol (Platform) Genişliği
19- Üstyapı Tabanı Genişliği
20-Taban Yüzeyinin Enine Eğimi

Şekil 1. Yol Üstyapısı Tip Enkesiti

Kaynak: (KGM, 2008)

3.1.Karayolu Yapısı

Karayolu trafik yoğunluğunun artmasına paralel olarak karayolu ağınında genişlemesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Karayolu elemanları aşağıdaki gibidir (KGM, 2008):

Yol Altyapısı: Karayolları, yükleri taşıma görevini üstlenen üstyapı ve bu yükleri zemine ileten altyapı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Yol altyapısı, üstyapıdan gelen yükleri doğrudan alarak zemine aktarır. Yarma ve dolgu işlemleri, proje şartnamelerinde belirtilen kriterlere uygun olarak titizlikle gerçekleştirilmelidir.

Yol Üstyapısı: Yol üstyapısı, trafiğin doğrudan etkileşimde olduğu ve yükleri alarak alttaki tabakalar olan altyapıya ileten çok katmanlı bir sistemdir. Kullanılan malzemelerin özelliğine göre, esnek veya rijit davranış gösteren farklı üstyapı türleri bulunmaktadır.

Rijit Üstyapı: Trafik yüklerinin doğrudan etki ettiği ve bu yükleri kısmen absorbe ederek altyapıya ileten, betonarme malzemelerden oluşan üstyapıya rijit üstyapı denir.

Esnek Üstyapı: Altyapının üzerine inşa edilen, genellikle bitümlü bağlayıcılar kullanılarak oluşturulan ve trafik yüklerini esnek bir şekilde taşıyabilen çok katmanlı yapıya esnek üstyapı denir.

Bitümlü kaplamalar, yolun kullanım amacı, taşıdığı trafik yükü ve üretim yöntemine bağlı olarak farklı türlerde inşa edilebilmektedir. Esnek üstyapılar temel olarak iki ana sınıfa ayrılır:

- Karışım tipi kaplamalar (Bitümlü Karışımlar)

- Sathi kaplamalar

Bunun yanı sıra, kullanılan asfalt bağlayıcısının türüne göre bitümlü kaplamalar şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Soğuk kaplamalar
- Sıcak kaplamalar

Soğuk kaplamalarda bağlayıcı olarak sıvı petrol asfaltları veya asfalt emülsiyonları tercih edilirken, sıcak kaplamalarda 140 °C - 170 °C sıcaklık aralığında ısıtılmış bitümlü bağlayıcılar (örneğin, saf bitüm ya da modifiye bitüm) kullanılır.

Sıcak karışımlı bitümlü kaplamalar, içindeki agrega taneciklerinin boyut dağılımı (gradasyon) ve kullanım amacına göre farklı gruplara ayrılır. Bu gruplar, karışımın sahip olduğu gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler açısından birbirinden ayrılır. Gruplandırma aşağıdaki gibidir (KGM, 2012a):

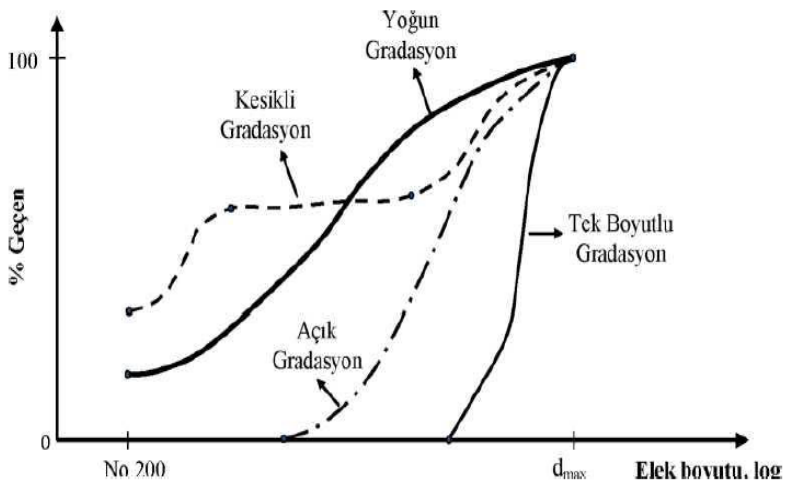
Açık Gradasyonlu Karışımlar: Bu karışımlarda büyük boyutlu tanecikler daha fazla olup, aralarında büyük boşluklar bulunur. Bu sayede suyun yüzeyden daha hızlı uzaklaşmasını sağlayarak drenajı iyileştirirler. Genellikle üst katmanlarda, özellikle yağışlı bölgelerde kullanılırlar.

Kesikli Gradasyonlu Karışımlar: Belirli boyutlardaki taneciklerin eksik olduğu, düzensiz bir tane dağılımına sahip karışımlardır. Pürüzlü bir yüzey oluşturarak araçların yola daha iyi tutunmasını sağlarlar.

Yoğun Gradasyonlu Karışımlar: Tüm boyutlardaki taneciklerin dengeli bir şekilde dağılım gösterdiği, gözenekliliğin düşük olduğu karışımlardır. Yüksek dayanım ve stabiliteye

sahiptirler. Yoğun trafik alanlarında ve ağır yüklere maruz kalan bölgelerde tercih edilirler.

Harç Tipi Karışımlar: İnce taneli malzemelerin (kum, toz) oranı yüksek olan, yapışkan kıvamlı karışımlardır. Düşük trafik yoğunluğuna sahip yollarda, yama çalışmaları ve ince tabaka kaplamalarda kullanılırlar. Mastik asfalt gibi harç tipi karışımlar, beton ve çelik köprülerde de sıkça tercih edilir. Şekil 2‘ de agrega gradasyonlarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 2. Agrega gradasyonları

Kaynak: (Kabadayı, 2019)

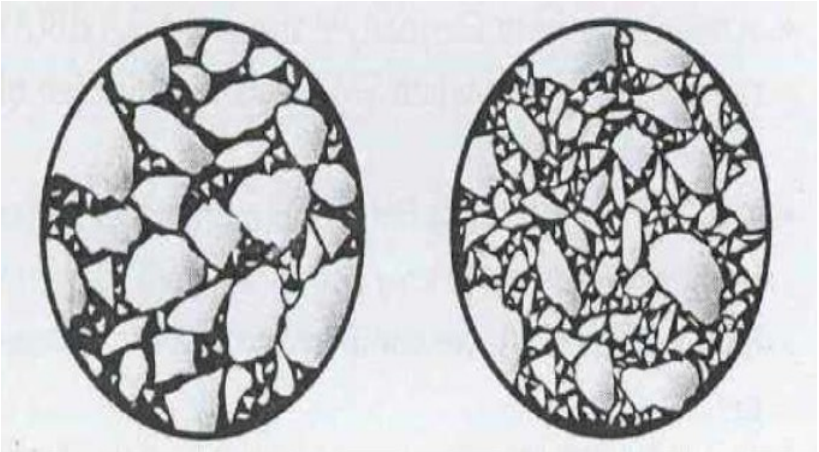
4. Taş Mastik Asfalt Karışımlar

Taş mastik asfalt (TMA), yüksek performanslı bir sıcak karışım asfalt türüdür. Diğer asfalt türlerine göre daha yüksek bir

bitüm içeriğine sahip olması, karışıma yüksek dayanım ve su geçirmezlik özelliği kazandırır. TMA'da kaba agrega, karışımın taşıyıcı omurga iskeletini oluşturur. Bu kaba agregalar arasındaki boşluklar, ince agrega, mineral filler ve bitüm harcı ile doldurulur. Bu sayede, karışım içinde güçlü bir bağ oluşur ve yüksek bir kenetleme kuvveti elde edilir. Bu durum, TMA'ya diğer asfalt türlerine göre daha yüksek bir stabilite ve dayanım sağlar.

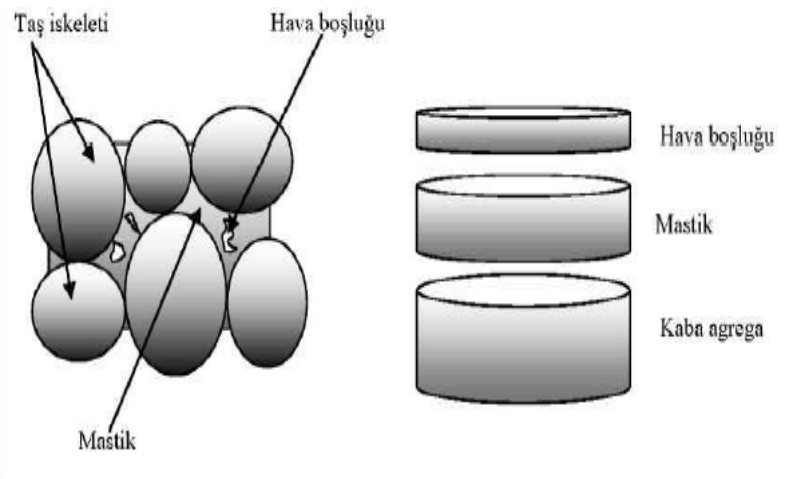
TMA'daki yüksek bitüm oranı, karışıma esneklik kazandırır ve düşük sıcaklıklarda bile çatlama riskini azaltır. Ancak, aşırı bitüm oranı, karışımdan bitümün sızması (kusma) riskini artırabilir. Bu sorunu önlemek için karışıma belirli oranlarda elyaf (fiber) eklenir. Elyaflar, bitümün karışımdan ayrılmasını engeller ve karışımın dayanımını artırır.

TMA, özellikle yoğun trafiğe maruz kalan otoyollar, tüneller ve köprülerde kullanılır. Yüksek dayanım, düşük gürültü seviyesi ve uzun ömürlü olması gibi özellikleri sayesinde, TMA, modern yol yapımında sıklıkla tercih edilen bir malzemedir (KGM, 2012a). Şekil 3 ve Şekil 4 taş mastik asfalt karışımını oluşturan elemanları ve yoğun gradasyonlu karışım ile arasındaki farkı gösterilmektedir.



Şekil 3. TMA (solda) ve geleneksel BSK (sağda) yüzey dokuları

Kaynak: (NAPA, 2002)



Şekil 4. Taş mastik asfalt bileşimi

Kaynak: (Kulash, 1994)

Taş Mastik Asfalt (TMA), geleneksel asfalt karışımlarına göre daha yüksek bir bitümlü bağlayıcı içeriğine sahip, özel bir sıcak karışım asfalt türüdür. Bu yüksek bağlayıcı oranı, TMA'ya bir dizi üstünlük kazandırır:

Yüksek Dayanım ve Stabilite: TMA'daki yüksek bitüm içeriği, agrega parçacıkları arasında daha güçlü bağlar oluşturarak karışımın dayanımını ve stabiliteyi önemli ölçüde artırır. Özellikle yüksek trafik yoğunluğuna maruz kalan bölgelerde, tekerlek izi deformasyonlarına karşı daha dirençli bir yapı sunar.

Uzun Ömür: TMA'nın yoğun ve homojen yapısı, suyun karışıma nüfuz etmesini engelleyerek dayanım ömrünü uzatır. Bu durum, bakım maliyetlerini azaltarak ekonomik bir çözüm sunar.

Sürüş Konforu: TMA'nın pürüzsüz yüzeyi, araçların daha konforlu bir sürüş deneyimi sunar ve yol gürültüsünü azaltır.

Yüksek Sürtünme Direnci: TMA'da kullanılan özel agrega türleri ve yüksek bitüm içeriği, yol yüzeyinin daha iyi bir kavrama sağlamasına yardımcı olur, özellikle ıslak havalarda güvenli sürüş koşulları sunar.

TMA'nın bu avantajlarına karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır:

Yüksek Maliyet: Yüksek bitüm içeriği, özel agrega ve stabilizör kullanımı nedeniyle TMA'nın üretim ve uygulama maliyeti, geleneksel asfalt karışımlarına göre daha yüksektir.

Üretim ve Uygulama Zorlukları: TMA'nın yüksek sıcaklıkta ve hassas karışım oranlarında üretilmesi gerekmektedir. Bu nedenle,

üretim ve uygulama süreçleri daha karmaşıktır ve özel ekipmanlar gerektirir.

Taş Mastik Asfalt, yüksek performansı ve uzun ömrü sayesinde özellikle yoğun trafiğe maruz kalan yollarda, tünellerde ve köprülerde tercih edilen bir malzemedir. Ancak, yüksek maliyeti nedeniyle tüm projelerde kullanımı uygun olmayabilir. Proje şartları ve bütçe göz önünde bulundurularak, TMA'nın kullanılıp kullanılmayacağına karar verilmelidir.

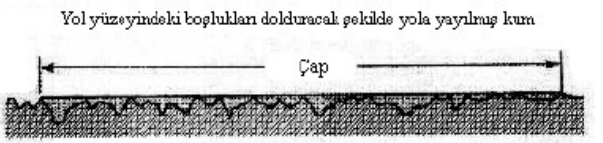
TMA oluşturan elemanlardan stabilizörler; TMA'da kullanılan stabilizörler (selüloz veya mineral elyaf), karışımın homojenliğini artırır, bitümün sızmasını önler ve karışımın sıcaklık değişimlerine karşı dayanımını artırır. TMA'da genellikle kırılmış granit veya bazalt gibi yüksek yoğunluklu ve aşınmaya dayanıklı agrega türleri kullanılır. Otoyol aşınma tabakaları, tünel iç döşemesi, köprü üst yapıları, havaalanı pistleri gibi yüksek performans gerektiren projelerde TMA sıklıkla tercih edilir (EAPA, 1998; KGM, 2012a; Tayfur, 2001).

Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında yüksek kayma direnci elde etmek için; agrega, yüzey dokusu ve uygulama yöntemleri gibi çeşitli faktörler titizlikle değerlendirilmelidir. Kaba agregaların cilalanma direnci, kayma direncinin en önemli belirleyicilerinden biridir. Bu nedenle, TMA karışımlarında mutlaka yüksek aşınma ve cilalanma direncine sahip, tercihen kırmataş türü agregalar kullanılmalıdır. Kırmataşların köşeli ve pürüzlü yüzeyleri, tekerlek ile yol yüzeyi arasındaki sürtünmeyi artırarak kayma direncini yükseltir.

TMA karışımının yüzey dokusu, hem sürüş güvenliği hem de sürüş konforu üzerinde doğrudan etkilidir. Yüzeyde bulunan boşluklar, yağmur suyu gibi sıvıların yüzeyden hızla uzaklaşmasını sağlayarak, su filminin oluşmasını engeller ve kayma riskini azaltır. Ancak aşırı pürüzlü bir yüzey, sürüş konforunu olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, TMA şartnamelerinde belirtilen limitler dahilinde, optimum bir yüzey dokusu elde etmek hedeflenir.

Kum Yama Metodu: Yapımı tamamlanan TMA yüzeylerinde, "Kum Yama Metodu" (ASTM E-965) gibi standart yöntemlerle yüzey pürüzlülüğü ölçülerek, yüzeyin istenen özelliklere sahip olup olmadığı kontrol edilir. Bu yöntemle, yüzeydeki makro pürüzlülük (pürüz derinliği) belirlenir ve belirlenen limitlerin altında kalmaması sağlanır.

TMA karışımlarında yüksek kayma direnci elde etmek için, doğru agrega seçimi, uygun yüzey dokusu ve standartlara uygun uygulama yöntemlerinin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu sayede hem sürüş güvenliği hem de yol ömrü artırılabilir (Tayfur, 2001). Şekil 5’ de kum yama metodunun uygulanış görselleri verilmiştir.



$$\text{Doku Derinliği} = \frac{\text{Kum Hacmi}}{\text{Kum Serilen Alan}}$$

(a)

(b)

Şekil 5. Kum yama metodunun uygulanışı (a)(b)

Kaynak: (Kokkalis, 1998)

5. Sürüş Güvenliği

Sürüş güvenliği, sürücülerin, yolcuların ve diğer trafik katılımcılarının can ve mal güvenliğini sağlamak amacıyla alınan tüm önlemleri ve uygulanan kuralları kapsayan kapsamlı bir kavramdır. Trafik kazalarının önlenmesi, trafik akışının düzenlenmesi ve yol kullanıcılarının konforunun artırılması, sürüş güvenliğinin temel hedefleridir. Sürüş güvenliğini etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bunlar, insan faktörleri, araç faktörleri, yol faktörleri ve çevresel faktörler olmak üzere başlıca dört ana başlık altında toplanabilir. *İnsan faktörleri;* sürücülerin dikkat seviyesi, sürüş becerileri, fiziksel ve psikolojik durumu, alkol ve uyuşturucu kullanımı gibi bireysel özelliklerini içerir. Sürücülerin yorgunluk, stres, dikkat dağınıklığı gibi durumlar altında araç kullanmaları, kazaların en önemli nedenlerinden biridir. *Araç faktörleri;* aracın teknik özellikleri, bakımları, lastiklerin durumu, fren sisteminin etkinliği gibi faktörleri kapsar. Eski model araçlar, bakımları yapılmayan araçlar ve hatalı lastik basınçlarına sahip araçlar, sürüş güvenliğini olumsuz etkiler. *Çevresel faktörler*; hava koşulları, trafik yoğunluğu, görüş mesafesi gibi dış etkenleri kapsar. Yağmur, kar, sis gibi olumsuz hava koşulları, sürücü görüşünü kısıtlayarak ve yol tutuşunu azaltarak kazalara neden olabilir. *Yol faktörleri*; yolun durumu, işaretlemelerin yeterliliği, aydınlatma koşulları, eğimleri ve virajları gibi fiziksel özellikleri içerir. Çukurlar, bozuk zeminler, yetersiz aydınlatma ve görüş mesafesi, kazaların sıklıkla yaşandığı nedenler arasındadır.

Sürüş güvenliğini belirleyen faktörlerden yol faktörü karayolunun tasarımı ile doğrudan ilgilidir. Yol güvenliği, karayolu tasarım ve yönetiminde öncelikli bir hedeftir. Sürüş güvenliğini

sağlamanın temel unsurlarından biri olan sürtünme direnci, doğrudan yol yüzeyi pürüzlülüğü ile ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğü, araçların yol tutuşu, frenleme mesafesi ve manevra kabiliyeti gibi kritik parametreleri etkiler. Bu parametreler aracılığıyla yol güvenliği, sürüş konforu, yakıt tüketimi, lastik ömrü, gürültü seviyesi ve çevresel etkiler gibi birçok faktörü doğrudan etkileyen bir zincirleme reaksiyon başlatır. Dolayısıyla, yol yüzey pürüzlülüğünün doğru olarak tanımlanması ve yönetilmesi hem güvenli hem de sürdürülebilir bir ulaşım sistemi için elzemdir.

Yol yüzey özellikleri, yüzey dokusu ve geometrik düzgünlük olmak üzere iki ana kategori altında incelenir. Bu sınıflandırma aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

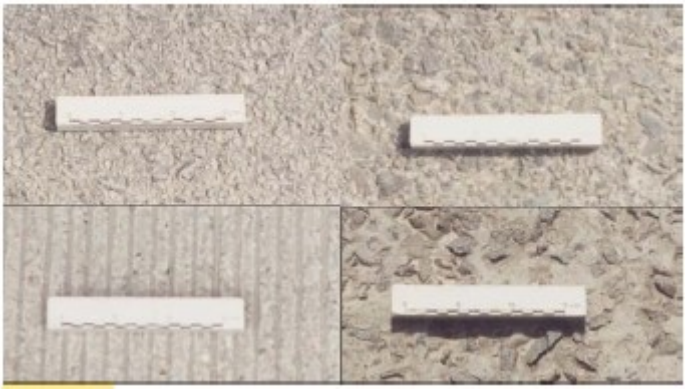
Yol Yüzey Dokusu (Pürüzlülük):

- Mikro doku: Dalga boyu $\lambda < 0{,}5$ mm
- Makro doku: $0{,}5 \text{ mm} < \lambda < 50$ mm
- Mega doku: $50 \text{ mm} < \lambda < 500$ mm

Geometrik Düzgünlük:

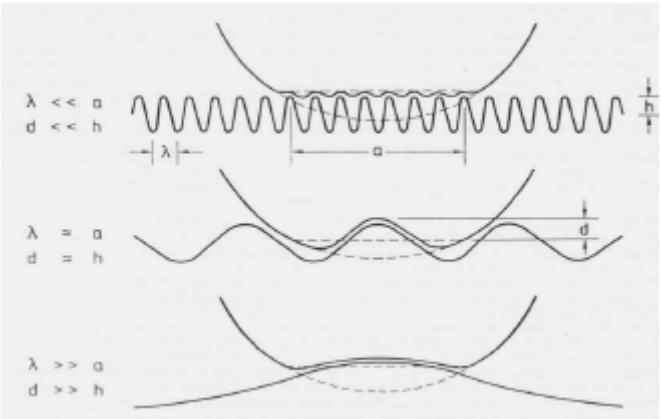
- Boyuna geometrik düzgünlük: $0{,}5 \text{ m} < \lambda < 50$ m
- Enine geometrik düzgünlük: $0{,}5 \text{ m} < \lambda < 50$ m

Bu kategorilere ilişkin görseller Şekil 6 ve Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 6. Değişik yol yüzeyleri

Kaynak: (Ergün, 1998)

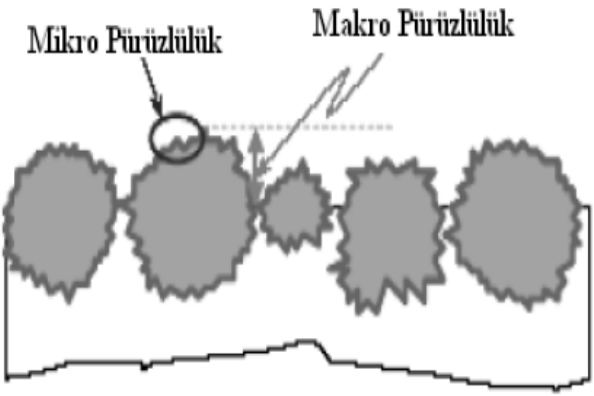


Şekil 7. Yol yüzey özelliklerindeki farklı durumların basit gösterimi

Kaynak: (Ergün, 1998)

Yol yüzeyinin dokusu, mikro, makro ve mega olmak üzere farklı ölçeklerde incelenebilir. *Mikro doku*, karışımdaki agregaların yüzey özelliklerine bağlı olup, yüzeyin mikroskobik pürüzlülüğünü ifade eder. *Makro doku* ise, agregaların boyut ve dağılımına bağlı

olarak oluşan daha büyük ölçekli pürüzlerdir. *Mega doku* ise, yolun genel yapısındaki bozulmalar sonucu oluşan çatlaklar, çukurlar ve tekerlek izleri gibi daha büyük ölçekli düzensizlikleri ifade eder. Bu üç doku türünün tamamı, yolun sürtünme özellikleri ve dolayısıyla güvenliği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Özellikle *makro pürüzlülük*, araçların yol tutuşu ve frenleme performansı üzerinde doğrudan etkili olan bir parametredir. Yolun geometrik düzensizlikleri ise, daha çok araçların konforunu ve güvenli seyirini etkileyen faktörlerdir. Zaman içinde oluşan çatlaklar, çökmeler ve diğer deformasyonlar, araçların hasar görmesine ve kazalara neden olabilir (Maden, 2009). Şekil 8' de makro ve mikro pürüzlülük görselleştirilmiştir.

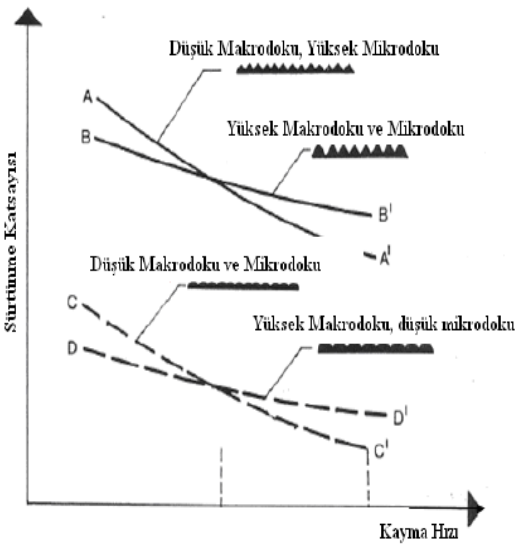


Şekil 8. Makro ve mikro pürüzlülük gösterimi

Kaynak: (Maden, 2009)

Yol yüzeyindeki sürtünme kuvveti, esas olarak adezyon ve histeresis olmak üzere iki ana mekanizmanın birleşiminden oluşur. Adezyon, yol yüzeyi ile lastik arasında moleküler düzeyde oluşan çekim kuvvetlerini ifade eder ve mikro doku ile yakından ilişkilidir.

Histerezis ise, lastik deformasyonları sırasında ortaya çıkan enerji kaybı olup, makro doku ile ilişkilidir. Islak koşullarda, su filmi adezyonu azaltarak sürtünmeyi düşürür. Yüzey pürüzlülüğünü artırmak için kullanılan özel agrega karışımları, hem adezyonu artırarak hem de histerezisi sağlayarak daha yüksek sürtünme değerleri elde edilmesini sağlar. Agreganın sertliği, mineralojik yapısı, tane şekli ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri, yol yüzeyinin uzun ömürlü ve güvenli olmasında belirleyici rol oynar. Özellikle sert ve pürüzlü agregalar, aşınmaya karşı daha dayanıklıdır ve daha yüksek sürtünme değerleri sunar (Maden, 2009). Şekil 9' da dört temel yüzeyin hıza bağlı durumu için pürüzlülük sürtünme ilişkisi gösterilmektedir.

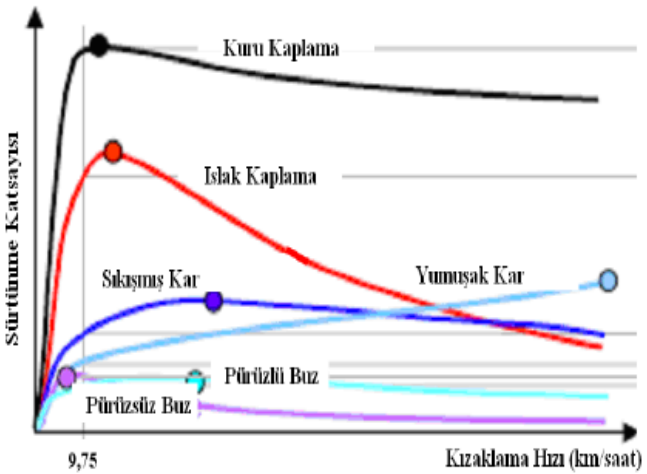


Şekil 9. Hız ve pürüzlülük durumuna göre sürtünme katsayısının değişimi

Kaynak: (Maden, 2009)

Yol yüzeyinin makro ve mikro pürüzlülüğü, trafik yükü ve çevresel etkenlerin etkisiyle zamanla azalır. Bu azalma, yüzeyin sürtünme performansını da olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla, pürüzlülük üzerinde etkili olan her faktör, sürtünme değerlerini de doğrudan etkiler. Yol yüzeyindeki agregaların cilalanmaya karşı dirençli olması, pürüzlülüğün uzun süreli korunmasında kritik bir rol oynar.

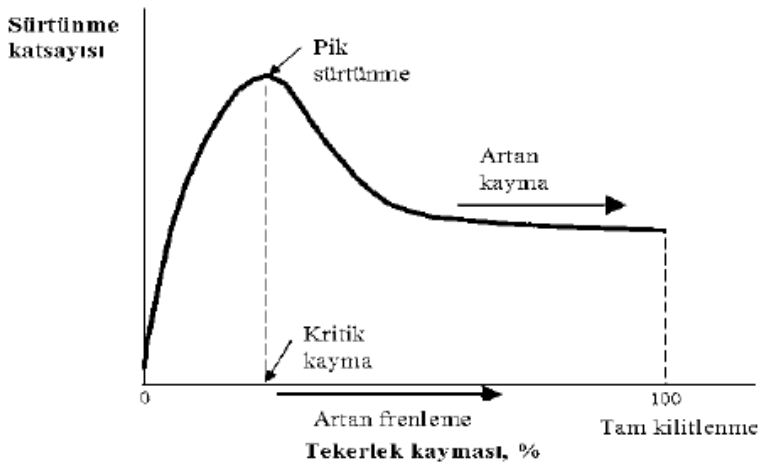
Sürüş güvenliğini sağlamanın temel unsurlarından bir diğeri yanal sürtünme kuvvetidir. Araçların şerit değiştirme, sollama, kavşak ve kurplardaki dönüş manevralarında, ayrıca rüzgârın oluşturduğu yan basınç etkilerinde, özellikle yüksek enine eğime sahip yol kesimlerinde yanal sürtünme katsayısı büyük önem taşır. (Özey, 1992). Şekil 10'da sürtünme katsayısı-kayma hızı ilişki grafiği verilmiştir.



Şekil 10. Sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi

Kaynak: (Maden, 2009)

Sürüş güvenliğini sağlamada önemli bir unsur da tekerlek-yol etkileşim mekanizmasıdır. Sürtünme kuvveti, temel olarak iki ana bileşenin birleşimiyle oluşur. İlk bileşen, yüzeyler arasındaki temas noktalarında kaymayı engelleyen adezyon kuvvetidir. İkinci bileşen ise, temas noktalarındaki yüzey çıkıntılarının tekerlek kauçuğunda oluşturduğu içe doğru deformasyon sonucu ortaya çıkan basınç-histeris kuvvetidir. Adezyon, yol yüzeyinin mikro dokusu ile doğrudan ilişkiliyken, histeris kuvveti makro doku ile bağlantılıdır. Her iki etkileşim de frenleme sırasında viskoelastik kauçuğun yer değiştirmesine direnç göstererek enerji kaybına yol açar. Özellikle ıslak yüzeylerde, su filmi temas yüzeyleri arasında yağlama etkisi oluşturarak adezyon kuvvetini azaltır. Bu etki, araç hızının artmasıyla birlikte daha belirgin hale gelir. (Maden, 2009). Şekil 11' de sürtünme katsayısı değerrinin frenlemeyle değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 11. Sürtünme katsayısı değerinin frenlemeyle değişimi

Kaynak: (Maden, 2009)

Sürüş güvenliği, yol yüzeyinin tasarımı, malzeme özellikleri ve zamanla değişen fiziksel koşulların etkisi altında şekillenir. Yol yüzey dokusunun mikro, makro ve mega ölçeklerde pürüzlülük özellikleri, araçların yol tutuşu, fren performansı ve manevra kabiliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle makro pürüzlülük, sürtünme performansını artırarak sürüş güvenliğinin temel unsurlarından biri olan frenleme ve yanal stabiliteyi sağlar. Bununla birlikte, zamanla trafik yükü, çevresel faktörler ve agregaların cilalanma eğilimi yüzey pürüzlülüğünü azaltarak sürtünme performansını olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, yüksek kaliteli, aşınmaya dayanıklı ve cilalanmaya karşı dirençli agrega kullanımı yol yüzeylerinin uzun ömürlü olmasında kritik bir rol oynar. Yanal sürtünme kuvveti ise özellikle dönüşler, şerit değişimleri ve yüksek eğimli yol kesimlerinde araç güvenliği açısından büyük önem taşır. Tekerlek-yol etkileşiminde etkili olan adezyon ve histeris mekanizmalarının optimize edilmesi, sürüş güvenliğini artırmak adına önemli bir hedef olarak öne çıkar. Sonuç olarak, yol yüzey pürüzlülüğünün doğru şekilde tasarlanması, korunması ve yönetilmesi hem güvenli hem de sürdürülebilir bir ulaşım sistemi için vazgeçilmez bir gerekliliktir.

6. Sonuç

Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında yüksek kayma direnci sağlamak amacıyla, kaba agregaların fiziksel özellikleri ve yüzey dokusu büyük bir öneme sahiptir. Kaba agregaların cilalanmaya karşı dirençli, yani aşınmaya dayanıklı olması gereklidir. Bu nedenle, genellikle kırmataş gibi sert, köşeli ve dayanıklı agregalar tercih edilir. Yüzey dokusu ise, tekerlek-yol etkileşimi ve suyun yüzeyden tahliyesi açısından önemli bir role

sahiptir. Makro pürüzlülük, tekerleklerin yola tutunmasını artırarak kayma riskini azaltır; ancak, aşırı pürüzlülük sürüş konforunu olumsuz etkileyebilir. Bu sebeple, TMA uygulamalarında yüzey pürüzlülüğünün belirli bir değerde tutulması hedeflenir. Standart yöntemlerden biri olan kum yama yöntemi (Sand Patch Method, ASTM E-965) ile makro pürüzlülük ölçülerek, optimum pürüzlülük derinliğinin sağlanması birçok teknik şartnamede zorunlu hale getirilmiştir. (Tunç, 2004).

TMA yol uygulamaları, gerekli kayma direncini sağlayacak şekilde özel olarak tasarlanmaktadır. Bu tasarımda agrega boyutu ve boşlukları dolduran harcın oranı belirleyici faktörlerdir. TMA, yüzey suyu drenajını sağlayamasa dahi yüzey dokusu açısından açık gradasyonlu karışımlara benzer özellik göstermektedir. Bu sayede, ıslak yüzeylerde araçların güvenliğini sağlayacak yüksek sürtünme direnci sunar. Ancak, trafik altında doku kaybını önlemek için karışımın aşırı miktarda harçla doldurulmaması önemlidir. TMA karışımları, geleneksel asfalt kaplamalara kıyasla yüzeyde daha kalın bir bağlayıcı film tabakası oluşturur. Bu durum, bazı ülkelerde ilk birkaç ay boyunca kayma direncinin beklenenden düşük olmasına yol açabilir. Trafiğin aşındırma etkisiyle zaman içinde yüzeydeki agregayı kaplayan fazla asfalt filmi azalır ve kayma direnci artar. Yine de bu olası sorunu önlemek amacıyla, bazı uygulamalarda serim işlemi sırasında yüzeye 0-2/5 mm boyutlarında kırmataş mıcır serimi yapılmaktadır (Campbell, 1999; EAPA, 1998; KGM, 2012; Temren, 2009; Tunç, 2007).

Sonuçta; ağırlıkça, TMA karışımın yaklaşık %65' ini oluşturan kaba agreganın kendi içerisindeki dane temasıyla sağlanan mükemmel kenetlenme trafik yüklerini taşırken yorulmaya karşı

yüksek bir direnç sağlarken, TMA’ nın kesikli (süreksiz) agrega gradasyonu yüzey pürüzlülüğünü, dolayısıyla da sürtünme direncini artırır.

Bu çalışmada, Taş Mastik Asfalt (TMA) karışımlarında kullanılan kaba agregaların fiziksel özellikleri, yüzey dokusu ve gradasyonu, yol performansını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. TMA'da ağırlıkça yaklaşık %65 oranında bulunan kaba agregalar arasındaki güçlü dane teması, trafik yüklerini taşıyarak yüksek yorulma direnci sağlarken, kesikli agrega gradasyonu sayesinde yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla sürtünme direnci önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca, yüzeyin makro pürüzlülüğü, tekerlek-yol etkileşimini iyileştirerek araçların yol tutuşunu güçlendirir ve kayma riskini azaltır. Trafiğin aşındırma etkisiyle zaman içinde yüzeydeki bağlayıcı film azalır ve kayma direnci optimum seviyeye ulaşır. Dolayısıyla, TMA karışımlarının doğru tasarımı ve uygulaması hem yol güvenliğini hem de uzun vadeli dayanıklılığı sağlayarak modern yol altyapısında önemli bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKÇA

Campbell, C. (1999). *Use of Stone Mastic Asphalt on Airport Pavements*.

EAPA. (1998). *Ağır Yüklere Maruz Üstyapılar/Taş Mastik Asfalt-SMA*. Ankara.

Ergün, M. (1998). *Effect of Road Surface Micro- and Macrutexture on Skid Resitance*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kabadayı, E. (2019, Haziran). *Üleksitin Taş Mastik Asfalt Karışımlarda Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

KGM. (y.y.). Devlet ve İl Yol Envanteri. 14 Kasım 2024 tarihinde https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlYolEnvanteri.aspx adresinden erişildi.

KGM. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*.

KGM. (2012). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları*. Ankara: Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü.

Kokkalis, A. G. (1998). Prediction of Skid Resistance from Texture Measurements. *Transport*, *129*(2), 85–93.

Kulash, D. J. (1994). Based Specifications for Bitumen and Asphalt Mixtures. *Proceedings of Institution of Civil Engineering Transport*, *105*, 187–194.

Maden, M. (2009, Haziran). *Asfalt Yol Yüzeyindeki İnce Taneli Malzemelerin Sürtünme Katsayısına Etkilerinin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

NAPA. (2002). *Designing and Constructing SMA Mixtures-State-of-the-Practice*. Maryland. www.asphaltpavement.org adresinden erişildi.

Özey, İ. (1992). *Rijit Üstyapı ile Esnek Üstyapının Karşılaştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tayfur, S. (2001). *Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamalar İçin Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Temren, Z. (2009). *Taş Mastik Asfalt Dizaynı, Üretimi ve Uygulamaları*. Ankara.

Tunç, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı*. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti. .

Tunç, A. (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Akademik Yayıncılık.

Ünal, E. N., Komut, M. ve Kiziroğlu, S. (2018). Üstyapı Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi ve Ağ Seviyesinde Değerlendirmeler. *Karayolu 4. Ulusal Kongresi ve Sergisi* içinde (ss. 81–95).

BÖLÜM XI

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Trafik Üzerindeki Etkisinin Bibliyometrik Analizi

Özlem BATTAL ŞAL[1]
Sahla Alarshi[2]

1. Giriş

Trafik, araçların hızı, yoğunluğu, hacmi, akışı ve yayaların hareketleri gibi faktörler birlikte değerlendirilen bir husustur. Bu faktörler, ulaşım sistemlerini etkili bir şekilde anlamak ve yönetmek için önemlidir. Yüksek trafik hacmi, özellikle kentsel alanlardaki yoğun saatlerde tıkanıklığa yol açabilmektedir. Bu da gecikmelere ve seyahat sürelerinin artmasına neden olabilmektedir. Hız, trafik koşullarına, yol türlerine ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Trafik tıkanıklığı sırasında hızın düşürülmesi genellikle sürücüler arasında istenmeyen bir durumdur. Trafik yoğunluğu, araçların bir yolda ne kadar sıkışık bir şekilde yer

[1] Dr., Öğr. Üyesi Özlem BATTAL ŞAL, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2308-7933, ozlembattal@karabuk.edu.tr
[2] Sahla Alarshi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye, Orcid: 0009-0009-5140-1772, sahlamht@gmail.com

alabileceğini ölçmektedir. Trafik sıkışıklığı, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, büyük şehirlerin çoğunda karşılaşılan temel bir sorundur. Trafik sıkışıklığı, yolcuları yoran ve strese neden olan kuyruklar, azalan hızlar ve artan seyahat sürelerinden oluşmaktadır. Böylece üretkenliği düşürürken maddi olmayan toplumsal masraflara sebep olmaktadır (Emo, Matthews & Funke, 2016). Ek olarak, doğal kaynakların kullanımı, çevre, yolcu güvenliği vb. gibi farklı faktörleri doğrudan veya dolaylı bir şekilde etkilemektedir. Bu nedenle, trafik sıkışıklığı her büyüyen şehir için bir zorluk oluşturmaktadır. Çözüm olarak yeni yollar inşa etmek, araç yolcuğu için daha fazla talep yaratarak sıkışıklığa katkıda bulunabilir ve böylece eklenen kapasiteyi hızla tüketebilmektedir (Pfleiderer & Dieterich, 1995).

Trafik sıkışıklığıyla ilişkili artan zorlukları ve sorunları çözmek için çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bilgisayar programları, yazılım tabanlı analizler ve güncel teknolojiyi takip eden uygulamalar çeşitli mühendislik problerinde kullanılmaktadır (Ertenli vd., 2021, Kisa vd., 2024, Ertenli ve Köseoğlu, 2024).Trafik üzerinde tercih edilen çözümler, kablosuz sensör ağı protokollerine sahip en son veri toplama ekipmanlarından (Faye, Chaudet & Demeure, 2012; Collotta & ark, 2014) rota şemalarına (Chen, Zhou & Zhao, 2012; Bell & ark, 2012) ve trafik tahmin yöntemlerine (Min & Wynter, 2011; Shen & Wynter, 2012) ve bulut bilişim gibi yepyeni yüksek teknolojiler kadar uzanmaktadır. Birkaç araştırmacı, trafik yönetimi sorunların çözümü için Akıllı Ulaşım Sistemlerinin (AUS) uygulanmasını önermişlerdir. Akıllı Ulaşım Sistemleri, bu zorlukların üstesinden gelmede büyük öneme sahiptir. AUS, ulaşım güvenliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için gelişmiş teknolojileri sisteme entegre etmektedir. AUS, araç türlerini göz önünde bulundurarak trafik yönetimi stratejilerini özelleştirebilir ve genel ulaşım deneyimini iyileştirebilmektedir. Örneğin, uyarlanabilir trafik sinyalleri acil durum araçlarına öncelik verebilirken, araç türlerine ilişkin veri toplama, altyapı planlamasını ve politika kararlarını bilgilendirir (Huang & ark, 2012). Özetle, veri toplamak ve araçları tespit etmek için çok sayıda tekniğin

kullanılmasına rağmen, bu tekniklerin uygulanmasının trafiğin yönetilmesi gereken konumun özelliklerine dayandığı belirtilmektedir. Tablo 1, trafikle ilgili verilerin toplanmasında kullanılan teknolojileri özetlemektedir.

Tablo 1. Trafik verilerini toplamak için benimsenen teknolojilerin özeti (Ravish & Swamy, 2021)

Kaynak	Teknoloji	İlkeler	Avantaj	Dezavantaj
Khan (2017)	Uyarlanabilir mimari çerçeve	Trafik izleme için veri madenciliği tekniklerinin ve makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı	Mevcut sistemde herhangi bir değişikliğe gerek yok. Otobüs ve güzergahların gerçek zamanlı izlenmesi.	Yeni veri kaynaklarının akışı, verilerin tüm yaşam döngüsünü ve veri toplama performansını etkileyecektir.
Fan &. (2018)	Makine öğrenimi ve büyük veri	Araçlar, gerçek zamanlı veri sağlayan sensörlerle donatılmıştır	Basit ve ekonomik	Trafik hacmi ve yoğunluğu dalgalandığında doğruluk ve güvenilirlik sorunları ortaya çıkar
Sen & ark, (2009)	Ses kaydı (mikrofonlar)	Araç korna seslerinin Doppler kaymasının değerlendirilmesi	Ekonomiktir, trafiğin düzensiz olduğu yerlerde kullanılabilir	Araç hızları arttıkça sonuçlarda hata oluşur, üst üste gelen korna sesleri sonuçları etkiler
Mohan, Padmanabhan & Ramjee, (2008)	GPS, hız ölçer ve mikrofon	Geliştirilen Nericell, akıllı telefondaki ivmeölçeri sanal olarak yeniden yönlendiriyor, korna seslerini algılıyor ve yer tespiti yapıyor.	Enerji tasarruflu, kötü yollar ve kaotik trafik için uygun	Akıllı telefon kullanıcılarının gizlilik endişeleri, kullanıcıların paylaşımlı sisteme katılımını sağlamak
Haferkamp & ark, (2017)	Üç verici ve alıcıdan oluşan kablosuz ağ	Araçların tespiti ve araç tiplerinin sınıflandırılmasında RSSI bilgisi kullanılması	Yüksek sınıflandırma doğruluğu	Kullanılan yönlü antenler pahalı olmasına sebep oluyor.
Bernas, Płaczek, & Korski, (2018)	Dört verici ve alıcı kullanan kablosuz ağ	Araçların tespiti ve araç tiplerinin sınıflandırılmasında RSSI bilgisi kullanılması	Yüksek sınıflandırma doğruluğu, düşük enerji tüketimi, kolay kurulum	Kullanılan yönlü antenler onu pahalı hale getiriyor.

Tablo 1. Trafik verilerini toplamak için benimsenen teknolojilerin özeti (devamı) (Ravish & Swamy, 2021)

Kaynak	Teknoloji	İlkeler	Avantaj	Dezavantaj
Bernas, Płaczek, & Korski, (2018)	Dört verici ve alıcı kullanan kablosuz ağ	Araçların tespiti ve araç tiplerinin sınıflandırılmasında RSSI bilgisi kullanılması	Yüksek sınıflandırma doğruluğu, düşük enerji tüketimi, kolay kurulum	Kullanılan yönlü antenler onu pahalı hale getiriyor.
Rivas, Wunderlich, & Heinen (2017)	Piezoelektrik hızlanma sensörleri	Algoritmalar titreşimlerin genliklerini ve frekans aralığını analiz eder	Ekonomik, yüksek doğruluk	Hava koşulları verimliliği etkileyebilir
Ghosh & ark, (2015)	Sismometre ve jeofon	Sismik dalgalar için geliştirilmiş bir CFAR dedektörü ile Pseudo-Wigner-Ville Dağıtımı destekli Rényi entropi yöntemi	Minimum yanlış alarm, iyi tespit	CFAR eşiği, CPA'ya yaklaşıldıkça artar ve bu da olay tamamlanmadan önce tespit penceresinin düşmesine neden olur
Na & ark, (2015)	Otuz yedi mikrofon düzenlemesi		Zayıf ışık ve olumsuz hava koşullarında bile çalışabilir	Yüksek ekipman maliyetleri, doğruluk sınırlamaları

AUS, araç içi iletişim ve veri paylaşımı gerçek zamanlı olarak gerçekleşebilmektedir ve araçlar ile altyapı arasındaki etkileşimi iyileştirmektedir. Gelişmeye devam ettikçe, ulaşım sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve yönetimi için sağlam bir çerçeve sunmaktadır. Sürücüler için kritik yol bilgileri ve rota planlaması ve trafik yöneticileri için eyleme geçirilebilir içgörüler sağlayarak, trafik sıkışıklığı önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Zhang & Jin, 2002). Bu nedenle ITS teknolojisi kentsel hareketliliğin karmaşıklıklarını anlamak için önemlidir.

2. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Trafik

Araç trafiğinin artmasıyla birlikte özellikle kentsel alanlarda oluşan trafik sıkışıklığı artınca dolayısıyla trafik verilerini toplama, analiz etme ve modellemeye yönelik çabalarda aynı orada artış olmaktadır. AUS kentiçi ulaşım sistemlerinin işleyişini ve işlevselliğini iyileştirmeyi amaçlayan güncel teknolojiler kümesidir. AUS, trafik akışını iyileştirmek, güvenliği sağlamak, sürdürülebilir çözümler üretmek için veri tabanlarından gelen çeşitli verileri kullanmak ve analiz etmek üzere tasarlanmıştır. Bu trafik verilerinin önemli ölçüde kullanılması, trafik hacmi, trafik hızı, trafik yoğunluğu ve trafik akışı açısından trafik sıkışıklığının anlaşılması ve optimize edilmesini kolaylaştırmaktadır. Gerçek zamanlı verilerin kullanılmasıyla, sürücülerin ve trafik düzenleyicilerinin ulaşım sisteminin verimliliğini artırma ve iyileştirmenin yanı sıra hızlı karar alınması sağlayarak trafikte harcanan süreyi azaltmak mümkün olabilmektedir.

2.1. Trafik akış faktörleri

Trafik akışı, araç sayısı, hız ve yoğunluk gibi temel faktörler AUS'un birincil odak noktasıdır. Araç sayısı, belirli bir süre boyunca belirli bir yoldaki toplam araç sayısını ifade etmektedir. (Wang & An, 2004). Bu veriler, trafiği optimize ederken yoğun kullanım saatlerini yani pik yaptığı saatleri anlamak için önemlidir. Öte yandan, ortalama hız, araçların ne kadar hızlı hareket ettiğini gösterirken, günün içinde oluşabilecek trafik yoğunluğunun saatlerine, hava koşullarına ve yol altyapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Yoğunluk, yol birimi başına düşen araç sayısını ölçererek tıkanıklık seviyeleri hakkında fikir vermektedir. Yüksek trafik yoğunluğunda daha düşük hızlar oluşurken seyahat sürelerini artırmaktadır. Ulaşım mühendisleri ve planlamacılar, bu hususları analiz ederek, ulaşım modelleri o yol kesimi için optimize edilirken altyapı iyileştirmeleri, trafik sinyalizasyon süreci ve toplu taşıma iyileştirmeleri konusunda bilinçli kararlar alabilmelerini sağlamaktadır.

2.2. Trafikte bekleme süreleri

Trafikte bekleme sürelerinin ölçümleri, tıkanıklık ve trafik sinyalizasyon süreci gibi çeşitli faktörler nedeniyle trafiğin akışı sırasın kaybedilen zamanı anlamak için çok önemlidir. Seyahat süresi, araçların belirli bir mesafeyi kat etmesinin süresidir. Bu ölçümler, trafik yönetim sistemlerinin performansını değerlendirmek için büyük öneme sahiptir. Örneğin, bir kavşakta yaşanan gecikmeler, trafik akışını iyileştirmek için sinyalizasyon sisteminin optimizasyonuna veya döner kavşakların uygulanmasına ihtiyaç olduğunu gösterebilmektedir. Gecikme ölçümlerini anlamak, yolu kullananlar için seyahat sürelerini azaltmada en önemli etkiye sahip olan projeleri önceliklendirilmesini sağlamaktadır.

2.3. Güvenlik faktörleri

Ulaşım sisteminin güvenilirliği, yolcu ve sürücülerin seyahat güvenliği en önemli husustur. AUS'un bu konuda uygulamaları sayesinde ulaşım sistemine olan güven ve güvenli yolculuk sağlanmaktadır. AUS, trafik kaza oranları ve yaralanma/ölüm sayıları gibi trafikte oluşan verileri izleyerek yol güvenliğini artırmada büyük öneme sahiptir. Kaza oranları, trafik kazalarının oluşabileceği noktalarda oluşma sıklığının niceliksel bir ölçüsünü sağlamaktadır ve genellikle zamana, konuma, oluşum şekline ve sebebine göre veriler gruplandırılmaktadır. Ayrıca, trafik kazalarından kaynaklanan ciddi yaralanma ve ölüm sayılarının izlenmesi, şehir planlamacılarının güvenlik önlemlerinin etkinliğini değerlendirmelerine ve yüksek riskli alanları belirlemelerine olanak tanımaktadır. Bu veriler, kolluk kuvvetlerinin etkisi, kamuoyu farkındalık kampanyaları ve yol tasarımında iyileştirmeler gibi hususların geliştirilmesinde etkilidir. Güvenlik faktörlerine odaklanarak, AUS trafikle ilgili yaralanmaları ve ölümleri azaltmada ve daha güvenli bir ulaşım ortamı oluşturmada büyük rol oynamaktadır.

2.4. Altyapı kullanımı

Yol kullanım oranları ve kapasite kullanımı gibi faktörler, ulaşım altyapısının verimliliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Yol kullanım oranları, mevcut yolların ne kadar etkili kullanıldığını ve hangi saat dilimlerinde yoğunluk oluştuğunu yansıtmaktadır. Bu sayede yol kapasitesinin artırılması veya alternatif rota seçeneklerinin gerekli olup olmadığı da belirlenmektedir. Kapasite kullanımı, bir yolun maksimum kapasitesinin belirli bir zamanda ne kadar kullanıldığını ölçmektedir. Yüksek kapasite kullanımı, tıkanıklığa ve seyahat hızlarının düşmesine yol açabilmekte ve altyapı iyileştirmelerime ihtiyaç duyulmasına neden olabilmektedir. Bu faktörleri analiz ederek, mevcut yol iyileştirmeleri, toplu taşıma iyileştirmeleri ve alternatif ulaşım modlarının geliştirilmesine yönelik yatırımlarla ilgili daha verimli kararlar alınabilmektedir. AUS teknolojik çözümleriyle mevcut altyapı ile trafik üzerinde çözüm odaklı ve yolu kullananlar için de hızlı ve güvenilir çözümler üretmede büyük rol oynamaktadır.

2.5. Çevresel etki faktörleri

Ulaşımın çevresel etkileri son yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte giderek daha fazla incelenmektedir. Trafikte oluşan hava ve gürültü kirliliği gibi faktörlerin izlenmesinde, AUS uygulamaları ile daha güvenilir veri elde edilmektedir. Araç trafiği nedeniyle atmosfere salınan kirleticilerin miktarı, hava kalitesini ve ulaşım sisteminin çevresel uygunluğunu konusunda kritik veriler sağlamaktadır. Gürültü kirliliği ise kentsel alanlarda yaşam kalitesini etkileyebilecek ve trafik tarafından üretilen yüksek ses seviyeleridir. Ulaşımın oluşturacağı olumsuz faktörleri belirlemek, trafiğin çevresel etkisini kavrayarak çözüm bulunmalıdır. Kentiçi ulaşımda yolu kullananlar için bireysel araç yerine toplu taşımaya teşvik etmek ve bireysel araç kullanımına olan bağımlılığı azaltmak için bisiklet yolları geliştirmek gibi sürdürülebilir uygulamalar geliştirilmelidir.

2.6. Yol ve hava koşulları

Ulaşım sisteminde dikkate alınan hususlardan biri de yol koşullarıdır. Yol koşulları üzerinden seyreden trafiğin akışını ve güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Yol kaplamasının mevcut durumu, bakım onarım sürecinin takibi, yol güvenlik elemanlarının konumu ve durumu sürücülerin trafikte güvenli bir şekilde hareketi konusunda büyük öneme sahiptir. Yol koşullarının yanı sıra hava koşulları sürücülerin sürüş davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Yağmur, kar veya sis gibi hava koşulları, sürüş davranışlarını değiştirebilir ve kaza risklerini artırabilmektedir. Buzlu, ıslak veya deformasyona uğramış yolda, yol yüzey koşullarının izlenmesi, AUS ve bakım ekiplerinin güvenli sürüş koşullarını sağlaması için gerekli verileri sağlamaktadır. Yol koşullarıyla ilgili gerçek zamanlı veriler, sürücüleri dinamik mesaj işaretleri veya mobil uygulamalar aracılığıyla bilgilendirmek, güvenliği ve verimliliği artırmak için kullanılabilmektedir. AUS yol durumu koşullarını dahil ederek olası tehlikeleri detaylı bir şekilde ele alarak trafik yönetimini iyileştirebilmektedir.

2.7. Trafik yönetim sistemleri

Trafik sinyalleri ve kontrol sistemleri de dahil olmak üzere trafik yönetim sistemleri, araç akışını düzenlemek ve güvenliği artırmak için büyük öneme sahiptir. Trafik yönetim sistemi hem hareketli hem de hareketsiz trafiğin, diğer araçlar, bisikletliler ve yayalarla birlikte düzenlenmesi, yönlendirilmesi ve kontrol edilmesiyle ilgilidir. Trafik yönetim sistemi trafikteki hareketin güvenli, düzenli ve verimli olmasını sağlamaktadır.

Trafiği etkili bir şekilde yönetmek için AUS çözümlerine ihtiyaç vardır. Gelişen teknoloji AUS üzerinde doğrudan geliştirme etkisi olduğu için yeni uygulamalar ile birçok sorun daha sürdürülebilir çözümler ile çözümlenmektedir. Kablosuz sensör ağları ve bileşenleri trafiği algılamak ve tıkanıklığı önlemek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kablosuz sensör ağları diğer ağ seçenekleriyle karşılaştırıldığında hızlı veri aktarımı, basit kurulum,

minimum bakım, küçük boyut ve maliyet etkinliği nedeniyle etkilidir. Kablosuz sensör ağları tıkanıklığı önlemek, acil durum araçlarına öncelik sağlamak ve trafik ışıklarında araçların bekleme süresini azaltmak için daha sık kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra AUS, dinamik sinyalizasyon sistemi, değişen trafik düzenlerine gerçek zamanlı olarak uyum sağlayarak gecikmeleri azaltabilmekte ve trafiğin akışını iyileştirebilmektedir. Ek olarak, sürücü bilgi sistemleri ile sürücülere trafik koşulları, kazalar ve alternatif rotalar hakkında gerçek zamanlı güncellemeler sağlayarak daha iyi yol kararları alınmasını sağlamaktadır.

3. Yöntem

3.1. Bibliyometrik analiz

Bibliyometrik analiz, yayınlar ve atıflar gibi bibliyometrik verileri analiz etmek için kullanılan nicel bir yöntemdir ve 1950'lerde kullanılmaya başlanılmıştır (Donthu & ark, 2021). Tarihsel olarak, bibliyometrik analizin kategorilendirilmesi ve işlenmesi oldukça karmaşıktı, ancak bugün çeşitli yazılımlar (örneğin VOSviewer, CiteSpace, BibExcel ve Bibliometrix) sayesinde bibliyometrik analiz daha kolay hale getirilmiştir (Cancino & ark, 2017). Bilimsel üretim büyük bir hızla devam ettiğinden, bibliyometrik analiz büyük hacimli bilimsel materyalin titizlikle işlenmesi ve önemli çıktılar sunulması için kritik bir araçtır (Bakır & ark, 2022).

Bibliyometrik analizin yanı sıra meta-analizler ve sistematik literatür incelemeleri, daha önce yayınlanmış literatürün analizini sağlamaktadır. Meta-analizler geniş bir bilgi havuzunu analiz edebilme kapasitesine sahip olsa da genellikle sınırlı bir konu üzerinde gerçekleştirilmektedir. Öte yandan, sistematik literatür incelemeleri belirli bir konu hakkında daha az sayıda makaleyi inceleyebilmektedir (Donthu & ark, 2021). Literatür incelemelerinde nicel bir öğenin olmaması nedeniyle, araştırma bulgularında araştırmacı yanlılığı riski de olabilmektedir (Bakır & ark, 2022). Bu nedenle, bibliyometrik analiz, çok sayıda çalışmayı değerlendirme

yeteneği, bulguların analitik titizliğini ve güvenilirliğini büyük ölçüde artırması (Gölgeci & ark, 2021) ve araştırmacı öznelliğini ortadan kaldırmasıyla öne çıkmaktadır. Bu tür bir yaklaşım, çok değişkenli analizler dahil olmak üzere birçok gelişmiş metodolojinin kullanılmasından da faydalanmaktadır (Bakır & ark, 2022).

Bibliyometrik analiz, kütüphanecilik ve bilgi ve belge yönetimi alanlarında ortaya çıkmış olsa da (Bhukya vd., 2021), o zamandan beri turizm (Comerio & Strozzi, 2019; Mulet-Forteza & ark, 2019), yönetim (Forliano, De Bernardi &Yahiaoui, 2021), pazarlama (Perannagari & Chakrabarti, 2020), sivil havacılık yönetimi (Raza, Ashrafi & Akgunduz, 2020) ve finans (Chung, Cox & Mitchell, 2001) dahil olmak üzere çok çeşitli alanların yapısının anlaşılmasında yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu teknik, bilimsel dergilere bir bakış sağlamak için de kullanılmaktadır.

Bibliyometrik analiz, iki farklı yaklaşımın bir kombinasyonu ile gerçekleştirilmektedir: performans analizi ve bilim haritalama analizi. Performans analizi, bilimsel üretimin çeşitli açılardan genel bir resmini veren tanımlayıcı bir analizdir (Donthu & ark, 2021). Öte yandan bilim haritalama analizi, bir bilimsel disiplinin kavramsal yapısını görselleştirir ve anlaşılmasına yardımcı olur. Bu iki tekniği bütünleştirerek, bir araştırma alanının istenilen zaman aralığında gelişimi incelenebilmektedir. Performans analizi, araştırma birimlerinin üretkenliğini ve etki göstergelerini incelemektedir.

3.2 Uygulama

Akıllı Ulaşım Sistemleri'nin trafik üzerindeki etkisinin bibliyometrik analizi için yürütürken, öncelikle Web of Science veri tabanı kullanıldı. Bu veri tabanı, belirli alandaki çeşitli araştırma çıktıları arasındaki ilişkileri ve etkileri incelemek için çok önemli olan kapsamlı atıf verileriyle ünlüdür. Web of Science, trafikle ilgili araştırmalardaki temel çalışmaların, eğilimlerin ve önerilerin belirlenmesini kolaylaştıran zengin veri kümeleri sağlamaktadır.

Analizin araştırma hedefleriyle uyumlu olduğundan emin olmak için verileri dışa aktarırken arama parametrelerini dikkatlice

ayarlanmıştır. Belirli etkili çalışmalara atıfta bulunan makaleleri toplamak için " Alıntılanan Referanslar" gibi özellikler kullanıldı. Bu yaklaşım veri setini zenginleştirdi ve belirli çalışmaların AUS'un trafik çalışmalarını nasıl şekillendirdiğinin ayrıntılı bir incelemesine olanak tanımıştır. Web of Science, kullanıcıların sonuçları sekmeyle ayrılmış bir biçimde dışa aktarmasına olanak tanımakta ve dışa aktarma başına 1.000'e kadar makaleye yer vermektedir. Bu esneklik, dışa aktarma sınırlamaları olmadan önemli veri kümelerinin derlenmesinde etkili olmaktadır.

Veriler dışa aktarıldıktan sonra, bibliyometrik analiz için güçlü bir araç olan VOSviewer'a sorunsuz bir şekilde aktarılabilmektedir. VOSviewer, bibliyografik verileri verimli bir şekilde yönetir ve iş birliği modellerini keşfetmek için ortak yazarlık analizi, alıntılanan çalışmalar arasındaki ilişkileri belirlemek için ortak alıntı analizi, makalelerin paylaşılan referanslar aracılığıyla nasıl birbirine bağlandığını incelemek için bibliyografik bağlantı ve yaygın araştırma temalarını ortaya çıkarmak için anahtar kelime analizi dahil olmak üzere çeşitli analizleri desteklemektedir. Örneğin, analizimizin bir parçası olarak, atıf ve anahtar kelime kullanımına dayalı olarak belirli çalışmaların etkisini tahmin etmek için denetlenen öğrenme tekniklerini uygulanabilmektedir. Tarihsel araştırma etkisini yansıtan kronolojik veri kümeleri üzerinde modeller oluşturarak, hangi çalışmaların gelecekteki AUS gelişmelerini etkileyeceği konusunda tahminlerde bulunulabilmektedir.

Bu bölümde VOSviewer'ın yeteneklerinden ve Web of Science'ın zengin veri kümelerinden yararlanarak, analizi AUS'un trafik üzerindeki etkisiyle ilgili araştırma ortamına dair anlamlı içgörüler ortaya çıkarma amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, konu alanı hakkında bilgileri geliştirmektedir. Literatürdeki boşlukları ve gelecekteki araştırmalar için olası yolları belirlemeye yardımcı olmakta ve daha etkili trafik yönetimi ve akıllı ulaşım çözümlerine katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

“Traffic / Intelligent Transportation System” anahtar sözcükleri ile “Web of Science” veri tabanında endekslenen içerikler üzerinden 30/10/2024 tarihinde gerçekleştirilen araştırmada 1213 yayına ulaşılmıştır.

4. Bulgular

4.1. Performans analizi bulguları

Bu bölümde WoS veri tabanında, 2000-2025 yılları arasında Akıllı Ulaşım Sistemleri’nin trafik üzerindeki etkisini inceleyen 1213 (n=1213) çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmalar arasında yayın türü olarak makaleler ve konferans bildirileri yer almaktadır. Tablo 1, incelenen çalışmaların türlerine dair özet sunmaktadır. Tek filtreleme ölçütü olarak İngilizce dilinin kullanıldığı seçim süreci sonucunda, 100 farklı bilimsel dergide yayınlanmış 1213 çalışma bulunmuştur. Aynı zamanda yazarlar 1213 çalışmada 298 anahtar kelimenin doğru bir şekilde bulunduğu görülmüştür.

Tablo 1: Bibliyometrik veriler için tanımlayıcı istatistikler

Tanım	**Frequency**
Zaman periyodu	2000-2025
Kaynaklar	1213
Yayınlar	58
Referanslar	1586
Anahtar Kelimeler	298
Yazarlar	200

Grafik 1, literatürdeki bilimsel üretimin sürecini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi yayın sayısı 2008'den sonra giderek artmıştır. Yayın sayısı, bibliyometrik analiz için en son yıl olan 2024'te zirve noktasına ulaşılmıştır.

En üretken yazarları belirlemek, performans analizinin kritik bir göstergesidir çünkü bir araştırma alanındaki ilerleme, bilimsel üretim yapan ve bilimsel bir alanın mevcut sınırlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunan yazarlara bağlıdır. Tablo 2'de

listelenen yazarlar, akıllı ulaşım sistemlerinin trafiğin üzerindeki etkisine ilişkin literatüre en önemli katkılarda bulunmuştur.

Grafik 1. Akıllı ulaşım sistemlerinin trafiğin üzerindeki etkisine yönelik yayınların sayısının yıllara göre dağılımı

Benzer şekilde, Tablo 3'te görüldüğü gibi yayın açısından en üretken ülkeler ve önde gelen dergiler incelenmiştir. Buna göre, Çin'den araştırmacılar 371 çalışmayla ilk sırada yer alırken, bunu ABD (n = 277) ve Hindistan (n = 19) takip etmiştir.

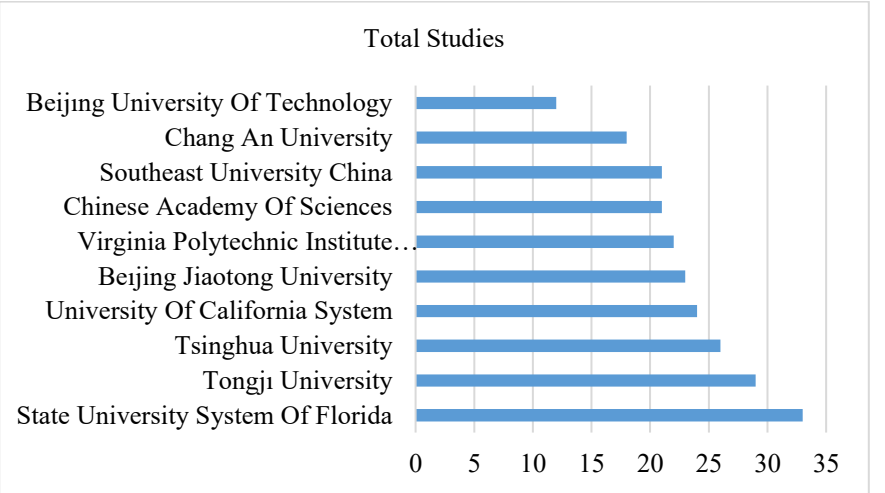
Tablo 2: En üretken yazarlar

Yazar	Toplam Yayın Sayısı
Rakha HA	14
Mahgoub I	6
Mitsakis E	5
Boriboonsomsin K	5
Dressler F	5
Ahn K	5
Barth MJ	5
Al-Najada H	5
Boukerche A	5
Sarvi M	5

Tablo 3. En çok katkıda bulunan ülkeler

Ülkeler	Toplam Sayı
Çin	371
ABD	277
Hindistan	62
Kanada	58
Avusturalya	47
İngiltere	42
İtalya	41
Almanya	38
Fransa	37
Güney Kore	31

Grafik 2'de üniversitelerin akıllı ulaşım sistemlerinin trafiğin üzerindeki etkisi literatürüne katkıları gösterilmektedir. Buna göre, Florida Eyalet Üniversitesi Sistemi 33 çalışmayla en fazla katkı sağlayan üniversite olurken, bunu Tongji Üniversitesi (n=29) ve Tsinghua Üniversitesi (n=26) takip etmektedir.



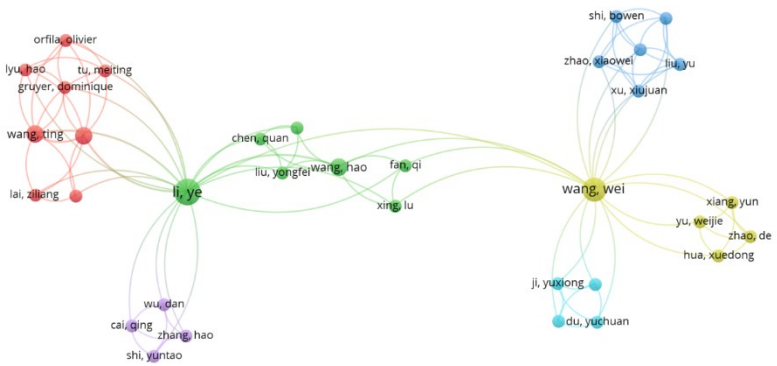
Grafik 2. En çok katkıda bulunan üniversiteler

4.2. Bilimsel haritalama analizi bulguları

Ağ analizine dayalı bilim haritalama analizi, araştırma birimleri arasındaki ilişkiyi kurmak için kritik öneme sahiptir. En popüler bilim haritalama yöntemleri olan ortak atıf analizi, ortak oluşum analizi ve ortak yazarlık analizi bu bölümde gerçekleştirilir. Ortak atıf analizi olarak bilinen haritalama yöntemi, ortak atıf yapılan çalışmaların benzer bir konuya sahip olduğu fikrine dayanmaktadır. Araştırmacılar, atıf modellerini inceleyerek alana önemli ölçüde katkıda bulunan yüksek etkili makaleleri belirleyebilmektedir. Bu yöntem etkili araştırmaları vurgulamakta ve diğer çalışmalarla arasındaki bağlantılara ilişkin bilgiler sağlamaktadır. Atıf analizi yoluyla araştırmacılar, hangi çalışmaların akıllı ulaşım sistemlerinin trafik üzerindeki etkisine ilişkin bulguların tasarımını ve uygulamasını şekillendirdiğini ayırt edebilmektedirler. Bu çalışmaların etkilerini anlamak, belirli araştırma sonuçlarının trafik yönetimi ve AUS'u geliştirmedeki güncel uygulamaları ve verilecek kararları nasıl bilgilendirdiğini değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

4.2.1. Ortak yazar analizi

Ortak yazar analizi, yazarlar arasındaki ortak ilişkileri incelemektedir. Araştırmacılar, ortak yazar ağlarını görselleştirerek etkili yazarları, ortak kümeleri ve bir alandaki araştırma iş birliğinin genel yapısını belirleyebilmektedirler. Bu yöntem, iş birliğinin araştırma üretkenliğini ve inovasyonu nasıl etkilediğini anlamanıza yardımcı olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Ortak yazar ağ haritası

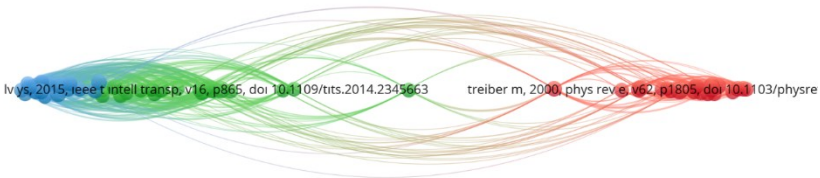
Araştırmacılar arası bağlantıları ortaya koyabilmek amacına yönelik olarak, her yazarın en az 1 yayınının olması ve en az 1 atıf alması kısıtları sonucunda 200 yazar baz alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda Şekil 1'de de görülmekte olduğu üzere oldukça dağınık yapıda, çok sayıda tekil ya da ikili eşleşmelerin bulunduğu kümelerden oluşmuştur. Bu durumda çalışma alanının çok sayıda disiplini içeriyor olmasının da etkisi olduğu şüphesizdir.

4.2.2. Ortak atıf analizi:

Ortak atıf analizi, iki çalışmanın diğer çalışmalarda ne sıklıkla birlikte atıf yapıldığına odaklanmaktadır. Bu yöntem, araştırmacıların makaleler arasındaki ilişkileri belirlemelerine ve literatürdeki tematik kümeleri ayırt etmelerine olanak tanımaktadır (Şekil 2). Kullanıcılar, ortak atıf ağlarını görselleştirerek etkili

yayınları ortaya çıkarabilmekte ve araştırma konularının zaman içindeki evrimini izleyebilmektedir.

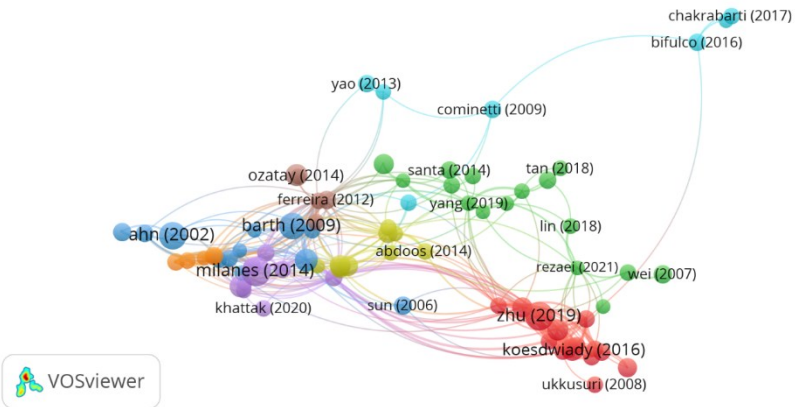
Bu ortak atıf analizi, akıllı ulaşım sistemlerinin trafikteki etkilerine ilişkin araştırmanın yapısını anlamak için çok önemlidir ve araştırmacıların literatürdeki temel çalışmaları ve ortaya çıkan eğilimleri belirlemesine olanak tanımaktadır.



Şekil 2. Ortak atıf ağı haritası

4.2.3. Bibliyografik eşleşme analizi

Bibliyografik bağlantı, iki çalışmanın bir üçüncü çalışmaya atıfta bulunması durumunda meydana gelmektedir. Bu yöntem, paylaşılan referanslara dayalı olarak makaleler arasındaki benzerliği değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. VOSviewer bu bağlantıları görselleştirebilir ve araştırmacıların ilgili çalışmaların belirli araştırma alanlarına nasıl katkıda bulunduğunu keşfetmelerini ve ortaya çıkan konuları belirlemelerini sağlamaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Bibliyografik eşleşme ağı haritası

Bu bibliyografik eşleşme analizi, akıllı ulaşım sistemlerinin trafikteki etkilerine ilişkin araştırmaların birbiriyle bağlantılarını sunarak, bilim insanlarının önemli çalışmaları ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel yönleri belirlemesine yardımcı olmaktadır.

Bibliyografik eşleşme analizi sonucunda alınan atıf sayısına göre ilk 10 yayın Tablo 4'te yer almaktadır. Buna göre, en çok atıf alan çalışma, 778 atıf alan Papageorgiou vd. (2003) "Review of Road Traffic Control Strategies"dir. Milanes vd. (2014) tarafından yapılan "Modeling coalition and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data" adlı çalışma 709 atıf ile ikinci sırada yer almaktadır. Dokuz çalışma 300'den fazla atıf almışken, Zhu vd. (2019) "Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey" adlı çalışma 101,33 ortalama yıllık atıf sayısıyla ilk sırada yer almaktadır. Tabloda yer alan çalışmaların yayın yılları 2003-2019 arasındadır. Daha yeni çalışmalar da önümüzdeki yıllarda yüksek atıf sayılarıyla bu listeye katılabilir.

4.2.4 Anahtar kelime eşleşme analizi

Anahtar kelime eşleşme analizi, akıllı ulaşım sistemleri ve trafik ile ilgili araştırmaların tematik yapısını keşfetmek için temel

bir yöntemdir. Araştırmacılar, bu analiz sayesinde anahtar kelimelerin birlikte görünme sıklığını inceleyerek, alandaki ortaya çıkan eğilimleri ve odak noktalarını ortaya çıkarabilmektedirler. Bu analitik yaklaşım, farklı araştırma konuları arasındaki ilişkileri ve kesişim konularının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Örneğin, anahtar kelime eşleşmelerinin görselleştirilmesi, gerçek zamanlı trafik verilerinin ve uyarlanabilir trafik kontrol sistemlerinin artan önemi gibi araştırma vurgusundaki değişimleri vurgulayabilmektedir.

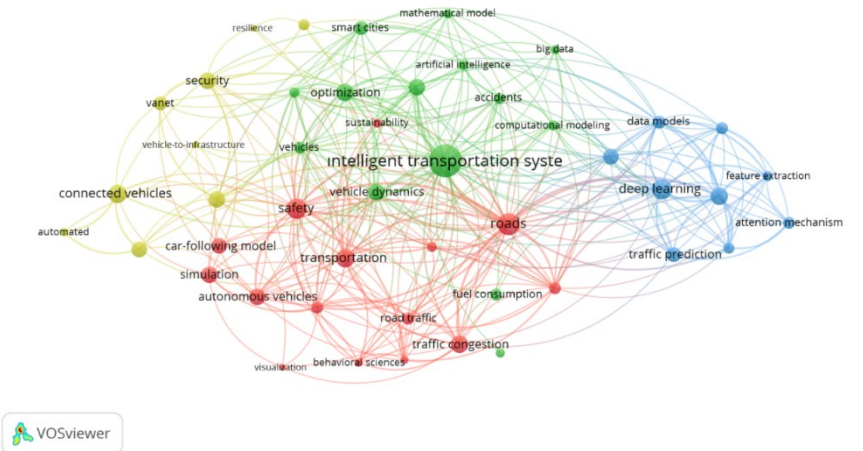
Tablo 4. En çok atıf alan çalışmalar

No	Makalenin Başlığı	Yazar(lar)	Yıl	Toplam Atıf	Yıllık Atıf Sayısı
1	Review of road traffic control strategies	Papageorgiou & ark, 2003	2003	778	35.36
2	Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data	Milanes & Shladover, 2014	2014	709	64.45
3	Big data analytics in ıntelligent transportation systems: A survey	Zhu & ark, 2019	2019	608	101.33
4	Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels	Ahn & ark, 2002	2002	550	23.91
5	A survey on vehicular cloud computing	Whaiduzzaman & ark, 2014	2014	523	47.55
6	Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system	Barth & Boriboonsomsin, 2009	2009	410	25.63
7	Autonomous vehicles: Challenges, opportunities, and future implications for transportation policies	Bagloee & ark, 2016	2016	387	43
8	Vehicular Channel Characterization and Its Implications for Wireless System Design and Performance	Mecklenbraeuker & ark, 2011	2011	333	23.79
9	Smart Antennas In Intellıgent Transportatıon Systems	Li & ark, 2010	2010	326	21.73
10	Improving Traffic Flow Prediction With Weather Information in Connected Cars: A Deep Learning Approach	Koesdwiady, Soua & Karray, 2016	2016	246	27.33

Ayrıca, hangi anahtar kelimelerin bir araya geldiğini belirleyerek, araştırmacılar trafik yönetimindeki fikirlerin ve yeniliklerin evrimini izleyebilmektedirler. Bu bilgi, gelecekteki araştırmalara bir altyapı oluşturmak, bilgilendirmek ve akademisyenler ile uygulayıcılar arasındaki iş birliğini geliştirmek için çok önemlidir. Sonuç olarak, anahtar kelime birlikteliğinin analizi daha etkili çözümlerin geliştirilmesine destek olmaktadır.

Analiz çalışmanın içerdiği 1213 yayın kapsamındaki 298 anahtar kelime kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanım sıklığı yüksek ve aralarında kuvvetli bağ olan anahtar kelimeler Şekil 4'de gösterilmektedir.

1213 yayın kapsamında kullanılan toplam 298 anahtar kelime 106 farklı küme içinde toplanmıştır. Bu kümeler birlikte kullanılma durumlarına göre oluşan kümelenmiştir. Tablo 4'te en çok kullanılan anahtar kelimeler ve bağlantı link ağırlıkları (TLS) verilmiştir.



Şekil 4. Anahtar kelime analizi

Tablo 4. En çok kullanılan anahtar kelimeler

Anahtar Kelimeler	TLS
Roads	89
Intelligent transportation systems	62
Safety	53
Predictive models	43
Vehicle dynamics	42
Transportation	39
Real-time systems	35
Optimization	32
Traffic control	32
Data models	31

5. Sonuçlar

Akıllı ulaşım sistemlerinin trafik üzerindeki etkisi kentiçi ulaşımda birçok alanda etkileri bulunan karmaşık bir süreçtir. Bu karmaşık yapı çok sayıda disiplinin de konuya dahil olması ile sonuçlanmaktadır. Disiplinler arası, çok sayıda bağlantının olduğu, analizi ve takibi güç ve zaman alıcı bir ortamda, çalışmalarını sağlam bir temele oturtmaya çabalamaları sonucunu doğurmaktadır. Bibliyometrik analiz araştırmacıların çalışmak istedikleri alanda boşlukları doldurabilecek ve güçlü alan taramalarına dayalı önemli çalışmalar gerçekleştirebilmelerine olanak sağlaması açısından büyük önem taşımaktadır. VOSviewer programı da bu kapsamda sağladığı kolaylık ve görsellikle araştırmacıların verimliliğini artırmaktadır. Ancak bu noktada bibliyometrik analizi gerçekleştirilen veri setinin elde edildiği veri tabanı ve/veya analizin gerçekleştirildiği VOSviewer ve benzeri programlar kaynaklı kısıtların ve kabullerin neler olduğunun çok net bir şekilde farkında olunması çalışmanın güvenilirliği anlamında büyük önem taşımaktadır.

İlgili alanda çalışmaların Çin, ABD, Hindistan, Kanada ve Batı ve Avustralya'da yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum akıllı

ulaşım sistemlerinin trafik üzerindeki etkisi konusunda gerçekleştirilecek çalışmalar ülke ve hatta Türkiye gibi büyük ülkelerde bölgeler ve iller arası farklılıkların ne gibi sonuçlarının olduğunun belirlenmesinde büyük katkı sağlayacaktır. Çünkü AUS ve trafik arasındaki etkileşim, yolu kullananları doğrudan etkilemektedir. Trafik koşulları hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlamak, sürücülerin bilinçli kararlar almasına, daha güvenli yolculuk yapmalarına ve memnuniyeti artırmasına yardımcı olmaktadır. AUS verileriyle entegre navigasyon uygulamaları, kullanıcıları daha az sıkışık rotalarda yönlendirerek genel seyahat deneyimlerini iyileştirmektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinin sürdürülebilir kentleşme ve kentsel ulaşım temelinde de büyük etkisi vardır.

Yapılan analiz sonucu araştırma alanları konusunda yayınların büyük oranda trafik modelleme, matematiksel modelleme, gerçek zamanlı sistemler, güvenlik, navigasyon ve akıllı nesneler üzerine odaklandığı görülmektedir. Bağlantılı nesneler ve yenilikçi altyapı gibi teknolojik gelişmeler, trafik yönetim sistemlerinin AUS ile entegrasyonunu daha da iyileştirecektir. Bu entegrasyon, daha sorunsuz trafik akışını, gelişmiş güvenliği ve azaltılmış sıkışıklığı kolaylaştırarak kentsel mobiliteyi geleceğe dönüştürecektir.

Kaynaklar

Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of transportation engineering*, *128*(2), 182-190.

Bakır, M., Özdemir, E., Akan, Ş., & Atalık, Ö. (2022). A bibliometric analysis of airport service quality. *Journal of Air Transport Management*, *104*, 102273.

Bagloee, S. A., Tavana, M., Asadi, M., & Oliver, T. (2016). Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of modern transportation*, *24*, 284-303.

Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2009). Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *14*(6), 400-410.

Bell, M. G., Trozzi, V., Hosseinloo, S. H., Gentile, G., & Fonzone, A. (2012). Time-dependent Hyperstar algorithm for robust vehicle navigation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *46*(5), 790-800.

Bernas, M., Płaczek, B., & Korski, W. (2018). Wireless network with bluetooth low energy beacons for vehicle detection and classification. In *Computer Networks: 25th International Conference, CN 2018, Gliwice, Poland, June 19-22, 2018, Proceedings 25* (pp. 429-444). Springer International Publishing.

Bhukya, R., Paul, J., Kastanakis, M., & Robinson, S. (2022). Forty years of European Management Journal: A bibliometric overview. *European Management Journal*, *40*(1), 10-28.

Cancino, C., Merigó, J. M., Coronado, F., Dessouky, Y., & Dessouky, M. (2017). Forty years of Computers & Industrial Engineering: A bibliometric analysis. *Computers & Industrial Engineering*, *113*, 614-629.

Chen, C. P., Zhou, J., & Zhao, W. (2012). A real-time vehicle navigation algorithm in sensor network environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *13*(4), 1657-1666.

Chung, K. H., Cox, R. A., & Mitchell, J. B. (2001). Citation patterns in the finance literature. *Financial Management*, 99-118.

Collotta, M., Pau, G., Scatà, G., & Campisi, T. (2014). A dynamic traffic light management system based on wireless sensor networks for the reduction of the red-light running phenomenon. *Transport and telecommunication journal*, *15*(1), 1-11.

Comerio, N., & Strozzi, F. (2019). Tourism and its economic impact: A literature review using bibliometric tools. *Tourism economics*, *25*(1), 109-131.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, *133*, 285-296.

Emo, A. K., Matthews, G., & Funke, G. J. (2016). The slow and the furious: Anger, stress and risky passing in simulated traffic congestion. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 42, 1-14.

Ertenli, M. F., Kalkan, I., & Büyükkaragoz, A. (2021). Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanal burkulma sınır uzunluğuna etkisi. *Politeknik Dergisi*, *24*(1), 347-354. https://doi.org/10.2339/politeknik.821093

Ertenli, M. F., & Köseoğlu, E. M. (2024). Geleneksel Bir Yapıdaki Ahşap Taşıyıcı Sistem Panelinin Yanal Yük Kapasitesinin Analizi. International Journal of Engineering Research and Development, 16(1), 448-460. https://doi.org/10.29137/umagd.1409739

Fan, S. K. S., Su, C. J., Nien, H. T., Tsai, P. F., & Cheng, C. Y. (2018). Using machine learning and big data approaches to

predict travel time based on historical and real-time data from Taiwan electronic toll collection. *Soft Computing*, *22*, 5707-5718.

Faye, S., Chaudet, C., & Demeure, I. (2012, September). A distributed algorithm for adaptive traffic lights control. In *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1572-1577). IEEE.

Forliano, C., De Bernardi, P., & Yahiaoui, D. (2021). Entrepreneurial universities: A bibliometric analysis within the business and management domains. *Technological Forecasting and Social Change*, *165*, 120522.

Ghosh, R., Akula, A., Kumar, S., & Sardana, H. K. (2015). Time–frequency analysis based robust vehicle detection using seismic sensor. *Journal of Sound and Vibration*, *346*, 424-434.

Gölgeci, I., Ali, I., Ritala, P., & Arslan, A. (2022). A bibliometric review of service ecosystems research: current status and future directions. *Journal of Business & Industrial Marketing*, *37*(4), 841-858.

Haferkamp, M., Al-Askary, M., Dorn, D., Sliwa, B., Habel, L., Schreckenberg, M., & Wietfeld, C. (2017, June). Radio-based traffic flow detection and vehicle classification for future smart cities. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.

Huang, A., Guan, W., Chang, Y., & Yang, Z. (2012). Analysis of ITMS system impact mechanism in beijing based on FD and traffic entropy. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, *2012*(1), 350847.

Khan, N. A. (2017). Real time predictive monitoring system for urban transport.

Kisa, M. H., Yuksel, S. B., & Özmen, R. (2024). Experimentally validated numerical investigation on the behavior of composite shear walls subjected to cyclic loading. Engineering

Science and Technology, an International Journal, 59, 101884. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101884

Koesdwiady, A., Soua, R., & Karray, F. (2016). Improving traffic flow prediction with weather information in connected cars: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *65*(12), 9508-9517.

Li, M. H., Wang, B., Lu, Y. L., Zhou, M. T., & Chen, I. M. (2010). Smart antennas in intelligent transportation systems., *WIreless Technologıes In Intellıgent Transportatıon Systems*. https://doi.org/10.1109/MWC.2010.5416350

Milanés, V., & Shladover, S. E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *48*, 285-300.

Min, W., & Wynter, L. (2011). Real-time road traffic prediction with spatio-temporal correlations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *19*(4), 606-616.

Mohan, P., Padmanabhan, V. N., & Ramjee, R. (2008, November). Nericell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones. In *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems* (pp. 323-336).

Mecklenbrauker, C. F., Molisch, A. F., Karedal, J., Tufvesson, F., Paier, A., Bernadó, L., ... & Czink, N. (2011). Vehicular channel characterization and its implications for wireless system design and performance. *Proceedings of the IEEE*, *99*(7), 1189-1212.

Mulet-Forteza, C., Genovart-Balaguer, J., Mauleon-Mendez, E., & Merigó, J. M. (2019). A bibliometric research in the tourism, leisure and hospitality fields. *Journal of business research*, *101*, 819-827.

Na, Y., Guo, Y., Fu, Q., & Yan, Y. (2015, August). An acoustic traffic monitoring system: Design and implementation.

In *2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom)* (pp. 119-126). IEEE.

Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, *91*(12), 2043-2067.

Perannagari, K. T., & Chakrabarti, S. (2020). Analysis of the literature on political marketing using a bibliometric approach. *Journal of Public Affairs*, *20*(1), e2019.

Pfleiderer, R. H., & Dieterich, M. (1995). New roads generate new traffic. *World Transport Policy and Practice*, *1*(1), 29-31.

Ravish, R., & Swamy, S. R. (2021). Intelligent traffic management: A review of challenges, solutions, and future perspectives. *Transport and Telecommunication Journal*, *22*(2), 163-182.

Raza, S. A., Ashrafi, R., & Akgunduz, A. (2020). A bibliometric analysis of revenue management in airline industry. *Journal of Revenue and Pricing Management*, *19*, 436-465.

Rivas, J., Wunderlich, R., & Heinen, S. J. (2016). Road vibrations as a source to detect the presence and speed of vehicles. *IEEE Sensors Journal*, *17*(2), 377-385.

Sen, R., Sevani, V., Sharma, P., Koradia, Z., & Raman, B. (2009). Challenges in communication assisted road transportation systems for developing regions. *NSDR'09*.

Shen, W., & Wynter, L. (2012, July). Real-time road traffic fusion and prediction with GPS and fixed-sensor data. In *2012 15th International Conference on Information Fusion* (pp. 1468-1475). IEEE.

Wang, J., & An, S. (2004, August). Environment management model of multi-mode traffic system based on intelligent transportation systems. In *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04EX826)* (Vol. 5, pp. 2661-2665). IEEE.

Whaiduzzaman, M., Sookhak, M., Gani, A., & Buyya, R. (2014). A survey on vehicular cloud computing. *Journal of Network and Computer applications*, *40*, 325-344.

Zhang, H. M., & Jin, W. L. (2002). Kinematic wave traffic flow model for mixed traffic. *Transportation Research Record*, *1802*(1), 197-204.

Zhu, L., Yu, F. R., Wang, Y., Ning, B., & Tang, T. (2018). Big data analytics in intelligent transportation systems: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *20*(1), 383-398.

BÖLÜM XII

Blokzincir Teknolojisinin Akıllı Otopark Sistemlerinde Kullanılabilirliği

Özlem BATTAL ŞAL[1]

1. Giriş

Son yıllarda bireysel araç sahipliliğinin artması otopark sorununun giderek artmasına da sebep olmaktadır. Sürücüler araçlarını istedikleri yere, özellikle yakın yerlere park etmek için çabalarken şehir planlayıcıları ve uygulayıcılar trafik tıkanıklığını ve boşa harcanan arazi kullanımını azaltmak için kentsel otopark sistemlerini planlamada ve yönetmede büyük zorluklarla karşılaşmaktadırlar (Taherkhani & ark., 2016). Sürücüler tercihlerine göre bir park yeri bulmakta zorluk yaşarken zaman da kaybetmektedirler. Hatta alternatif olarak başka otopark alanlarına tekrarlı bakmalarla bile yer bulmakta zorluk yaşayabilmektedirler. Bu sadece zaman alıcı değil, aynı zamanda sürücüler için sinir

[1] Dr., Öğr. Üyesi Özlem BATTAL ŞAL, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye, Orcid: 0000-0002-2308-7933, ozlembattal@karabuk.edu.tr.

bozucudur. Ayrıca, kullanıcının boş park yerlerini aramak için fiziksel olarak orada bulunması gerekmektedir. Bazen biraz daha uzakta park yerleri mevcutken yüksek park ücretleri ödemeleri gerekir. Bu sorunları çözmek için, şehir sakinleri tüm park bilgilerini ortak bir platformda bulabilecekleri bir uygulama aramak isterler.

Akıllı şehirlerde yaygın cihazların yaygınlaşması, birçok akıllı mobilite uygulamasının geliştirilmesini sağlamıştır (Rahaman & ark., 2017). Akıllı otopark ve mobil ödeme uygulamalarından yararlanarak şehir içinde kullanımı kolay park hizmetleri sağlamak yeniliklerden biridir. Ancak, mevcut akıllı park çözümleri sürücülerim bilgi ihtiyaçlarını karşılamak için yeterli değildir. Örneğin, otopark imkânlarına ilişkin kişiselleştirilmiş bilgiler (örneğin; otopark müsaitliği, ücreti, mesafesi) sağlayabilen bir sistem bulunmamaktadır. Bu sorunun çözümü için alternatif park sağlayıcılarını tek bir platform altında birleştirmek çözüm olabilmektedir. Ancak başka altyapı gereksinimi olmak üzere çeşitli hususlar verimli bir hizmet sağlamak için oluşabilecek zorluklar bulunmaktadır (Gubbi & ark., 2014).

2- Otopark Planlanmasında Gelişmeler ve Gereksinimler

Otoparklar şehir içi ulaşım ağında büyük öneme sahip alanlardır. Bireysel araçların park edeceği konumlar arazi kullanımıyla doğrudan bağlantılıdır. Otopark ihtiyacı karşılanması ulaşım ağı ve arazi kullanımı açısından önemlidir. Otopark alanları kentsel kullanım açısından büyük alanlara ihtiyaç duyduğu için planlama doğru yapılmadığında arazi ve çevresini tüketirken olumsuz etkileri giderek artıracaktır. Kentsel mekânın tüketimi konusunda yaşanan problemlerden dolayı otopark sorunlarına çözüm olarak daha küçük alanda daha fazla otomobil depolanması şeklinde çözümler bulunmuştur . (Yetişkul & Şenbil, 2018) Oysa otopark alanları şehir içi arazisini ve yaşadığımız çevreyi doğrudan etkilediği için şehir dinamiğini ve dolayısıyla insan hayatını büyük oranda etkilemektedir. Bu yüzden otopark alanlarında yaşanan

sorunlara çözüm üretmek ve talebi karşılayacak önerilerin değerlendirilerek uygulanması gerekmektedir.

2.1. Otopark planlanması

Otopark alanları kentsel arazide yer kaplamasından kaynaklı olarak bir mekân tüketimine sebep olmaktadır. Bireysel aracı ile ulaşım ihtiyacını gideren sürücü, varış noktasında yakın yerlerde otopark alanlarına gereksinim duymaktadır. Varış noktalarının özellikle yoğun talep olduğu noktalarda olması durumunda önemli problemlerin oluştuğu noktalar haline gelmektedir. Trafikte araçların çoğu park yeri ararken mevcut yoğunluğa eklenerek trafiğin tıkanmasına sebep olurken yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu durumda sürücü aracını bireysel olarak belirlediği alanlara park etmektedir. Bireysel kararın alışkanlık haline gelmesi durumunda ise otopark kullanımının araç sahipleri tarafından kullanımında farklılaşmalar oluşturacaktır. Diğer yandan trafiği bir bütün olarak düşündüğümüzde trafikte araçla geçirilen süre ile aracın park edilmesi durumun geçen süreyi düşündüğümüzde otopark alanlarının önemi bir kez daha artacaktır. Sürücülerin park alanı seçimlerinde alışkanlıkları, park etme davranışları tespit park alanlarının tasarımı ve otopark sağlayıcıların uygulamalarının değerlendirilmesi için önemlidir (Sun & ark., 2013). Ayrıca kent merkezlerindeki park problemlerinin çözülebilmesi için de araç sürücülerinin park alanı seçim alışkanlıklarını gerekmektedir (Sun & ark., 2013), (Ibeas & ark., 2014), (Axhausen & ark., 1991), (Kardi, & ark., 1997), (Kobus & ark., 2013).

Türkiye'de 3194 sayılı İmar kanununun 37. ve 44. maddeleri otopark konusuna yöneliktir. Bu maddelerde yer alan resmi metinlerde otopark alanlarına ihtiyaç ve bu ihtiyacın karşılanması için önerilen alternatiflerin uygunluğu, araç sınıfına göre park kapasitesinin nasıl olması gerektiği, otopark alanlarının olmadığı yerlerde park ihtiyacının nasıl giderileceği ve bu süreci etkileyecek tüm hususlarla ilgili olabilecek tüm bilgilere yer verilmektedir. Yönetmelikteki ilgili maddeler araç sahiplerinin park ihtiyaçlarını

varış noktaların yakın konumlarda yani parsel içerisinde çözülmesi vurgulanmaktadır.

2.2. Otopark yönetimi

Otopark yönetimi, sürücülerin araçlarına park yeri bulması, park etmesi ve park süresince güvenli bir park oluştuğuna ikna olması süreçlerinde karşılaşılabilecek sorunları çözmeye yönelik geliştirilen politika, program ve stratejiler olarak tanımlanmaktadır (Litman, 2016).Sürücülerin araçlarını varış noktalarına yakın yerlerde dilediği gibi park yapabilmesine imkân sağlayan sistemler en ideal sistemlerdir. Bunu gerçekleştirebilmek için konunun çok yönlü ele alınması gerekmektedir. Yetersiz arazi, şehir içi arazi kullanım planlamasının etkin bir şekilde yapılamaması, mevcut araç trafiğini aksatabilmesi ve yüksek maliyetler gibi hususlar dikkate alındığında sürecin ne kadar önemli olduğu bir kez ortaya çıkmaktadır. Otopark yönetimi tüm bu süreci kapsadığı için park sorununu ele alırken aslında şehir içi ulaşımı ile kaçınılmaz bağını ele alarak ulaşım alternatifleri, güzergahlar, talep merkezlerine yakın arazi kullanım oranları ve ulaşım alışkanlıkları gibi hususları da otopark kapasitesini etkilediğini kabul ederek süreci yönetmesi gerekmektedir.

Otopark uygulamalarının başarı oranlarına bakıldığında kısa vadede %5-%10 oranlarında fayda sağlarken, uzun vadede %20-%40 seviyelerine çıkabilmektedir. Sadece yeni tesisler yaparak sorunları çözebilmeyi hedeflemek yerine park yönetimi uygulamalarından yararlanmak hem ekonomik açıdan hem de zaman yönünden daha avantajlıdır. Uygulamaların sağlayacağı faydalara ek olarak esneklik, yeni sistemlere uyumlu olması, teknolojik gelişmelere ayak uydurabilmesi yani güncellenebilmesi, oluşabilecek yeni taleplere cevap verebilecek kapasitede olması sayılabilmektedir. Tüm bu etkiler değerlendirildiğinde otopark yönetimi uygulamalarının geliştirilmesiyle park sorunlarına daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Uygulamaların geliştirilmesinin yanı sıra park planlaması için geliştirilecek stratejiler de büyük öneme

sahiptir. Tablo 1'de Litman (2016) tarafından önerilen park yönetim stratejiler ve sağlayacağı fayda oranları verilmiştir.

Tabloda park yönetimi stratejileri özetlemektedir. Bir varış noktasında park ihtiyacındaki azalmayı, önerilen stratejinin araç trafiğini azaltmaya yardımcı olup olmadığını ve trafik sıkışıklığı, kaza ve çevre kirliliğini azaltma konusunda fayda sağlayıp sağlamadığını göstermektedir.

Tablo 1: Park yönetimi stratejileri (Litman, 2016)

Strateji	**Tanımlama**	**Tipik Azalma**	**Trafik Azalması**
Paylaşımlı Park	Park alanı pek çok gruba ve kişiye hizmet eder	%10-30	
Park Uygulamaları	Servis araçları ve teslimat araçları gibi araçlara özel uygulamalar sağlar	%10-30	
Daha Doğru ve Esnek Standartlar	Park standartlarını talepleri karşılayacak şekilde arttırmak ve geliştirmek	%10-30	
Parkı Maksimize Etmek	Park standartlarını maksimize etmek	%10-30	
Uzaktan Park	Kenar alanlara ve kent giriş noktalarında parklanma	%10-30	
Akıllı Büyüme	Daha bütünsel, karışık ve çoklu seçenekli parkı desteklemek, araç paylaşımı ve alternatif modları desteklemek	%10-30	√
Yaya ve Bisiklet Geliştirmeleri	Park tesisinin yürüyüş ve bisiklet menzilinin arttırılması	%5-15	√
Mevcut Kapasitelerin Arttırılması	Boş yerleri değerlendirerek ve sıkıştırma yaparak park alanını arttırmak	%5-15	
Mobilite Yönetimi	Daha değişik ulaşım desenlerini destekler, mod değişimi veya seyahat sıklığı gibi	%10-30	√
Park Ücretlendirmesi	Park tesislerini kullananlardan para almak	%10-30	√
Ücretlendirme Metotlarını Geliştirmek	Daha iyi ücretlendirme teknikleri uygulamak ve verimliliği arttırmak	Değişken	√
Finansal Teşvikler	Ulaşım modunu değiştirmek için maddi çıkarlar sağlamak	%10-30	√
Park Yerinin Ayrıştırılması	Park alanını başka bir işyerine komple satmak ya da kiralamak	%10-30	√

Tablo 1: Park yönetimi stratejileri (Litman, 2016) (devam)

Strateji	**Tanımlama**	**Tipik Azalma**	**Trafik Azalması**
Park Vergi Reformu	Park yönetimini desteklemek için vergi düzenlemeleri yapmak	%5-15	√
Bisiklet Tesisleri	Bisiklet depolama alanı ve değişim alanı yaratmak	%5-15	√
Bilgilendirme ve Reklam Geliştirmek	Parklanma ücreti, harita kullanımı, işaretler, broşürler ve internet bilgilendirmesini geliştirmek	%5-15	√
Ceza Sistemini Geliştirmek	Cezaların caydırıcı ve adil olmasının sağlanması	Değişken	
Ulaştırma Yönetim Kurumları	Belli bir alanda ulaşım ve park yönetimi sevisi sağlayan üye kontrol sistemli organizasyonlar yapmak	Değişken	√
Ulaştırma Yönetim Kurumları	Belli bir alanda ulaşım ve park yönetimi sevisi sağlayan üye kontrol sistemli organizasyonlar yapmak	Değişken	√
Dolup Taşan Park Yerlerinin Planları	Zirve saatlerdeki durum için plan yapmak	Değişken	
Dolup Taşan Park Yerlerine Çözüm	Yönetim, cezalar ve ücretlendirme gibi uygulamalar kullanmak	Değişken	

2.3. Akıllı Otopark Sistemleri

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte dijital tekniklerin artması ulaşım alanında akıllı sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Akıllı uygulamalar, yönetimi ve denetimi daha kolay olurken çevreci çözümler sunması yönüyle de büyük öneme sahiptirler. Araç sahipliliğinin artması hava ve çevre kirliğine, enerji ihtiyacının artmasına ve kentsel yaşam alanlarında bir takım olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bu olumsuz etkileri azaltmak için teknolojiden yararlanmak en etkili çözüm olmaktadır. Otopark açısından bakıldığında ekonomik, çevreci ve tutarlı bir yönetim sistemi için akıllı otopark sistemlerindeki teknolojilerin kullanılması en etkin çözüm olmaktadır. Sistemin ihtiyacı olan temel hususlar otopark için kabul edilebilecek araçların sisteme tanınması, kabul edilmesi ve park sürecini yönetebilmesi gibi çeşitli teknolojilerdir.

Araçların sisteme tanınması için araç kimliklerinin (ID) Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisine ihtiyacı vardır. RFID teknolojisi ile otopark sistemi, tanımadığı aracı kabul etmeyip, park alanına dahil olan aracı boş alanlara yönlendiren, park edildikten sonra aracın park konumu belirleyerek sisteme dahil eden bir akıllı sistemdir. Araçların ID kartları ve RFID teknolojisi ile sisteme katılan araçlar, modülün okuma işlemi sonrası bariyerin otomatik olarak açılması ile park alanına giriş yapmaktadır. Tanımlanma işlemi başarısız olan araçlar sistem tarafından onay verilmediği için bariyer açılmaz ve park alanına girmesine müsaade edilmemektedir. Park alanına giriş yapan araçların, sisteme ID tanımlanmaları sayesinde veri tabanına ulaşması ile park alanının doluluk oranları, kaç araç olduğu, kapasitesi doğrultusunda geriye ne kadar boş park alanının kaldığı da kayıt altına alınmaktadır.

3.Blokzincir Teknolojisi

3.1. Genel bakış

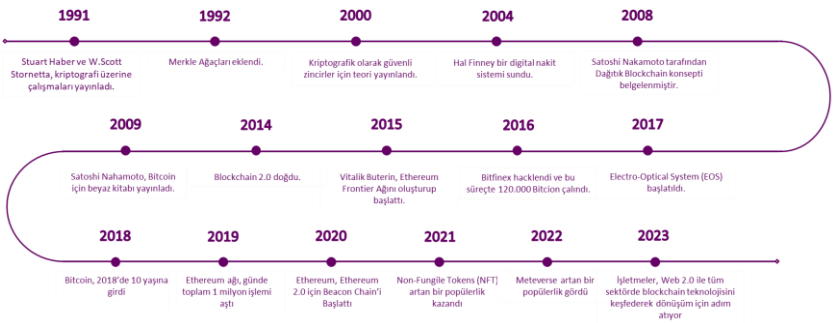
Blok zincir, genel bir tanımlamayla bloklar adı verilen artan sayıda veri yapısı listesini ifade etmektedir (Haber & Stornetta, 1991). Merkezi olmayan işlem süreçlerini ekstra veri yönetim

araçlarıyla birleştiren başka bir veri odaklı ağ türüdür (Perera & Czachorowski, 2019). Blok zinciri, 2008 yılında Satoshi Nakamoto tarafından geliştirilen bir teknolojidir ve bu teknolojiye öncülük eden kişiler tarafından kullanılan bir terimdir (Bitcoin, 2015). Blok zinciri, herhangi bir devlet veya bankanın onayı olmadan hızlı elektronik transferlere olanak tanıyan merkezi olmayan bir dijital para birimi olan 'Bitcoin'in yaratılmasının ardından ortaya çıktığı bilinmektedir (Taskinsoy, 2019). Blok zinciri başlangıçta Bitcoin işlem geçmişlerini kaydetmek için geliştirildi ancak o zamandan beri çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Coğrafi olarak birbirlerinden habersiz olan uzak taraflar arasında güvenli, şifrelenmiş varlık değişimlerini mümkün kılarken banka gibi güvenilir bir aracıya olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Tüm ağ katılımcıları arasında paylaşılan dağıtılmış bir veritabanı sistemi olarak işlev görürken, verileri topluca bir kayıt koleksiyonu oluşturan birbirine bağlı bloklarda yakalamakta ve depolamaktadır (Lemieux & ark., 2019). Bir kez kaydedildikten sonra, girişler değiştirilemez ve silinemez veya değiştirilemez. Ancak, yeni kayıtlar eklemek veya mevcut olanları almak mümkündür. Bu dağıtılmış veritabanı merkezi bir varlık yerine eşler arası bir ağ üzerinde çalışır (Li & ark., 2021). Bu ağ, katılımcıların hem istemci hem de sunucu olarak hareket ettiği eşler arası bir temelde çalışır (Kuo & ark., 2019). Sistemdeki her üye bir düğüm veya eş olarak hareket eder. Katıldığında, yeni üyeler otomatik olarak mevcut blok zincirinin bir kopyasını alır (Li & ark., 2021).

Blokzincir teknolojisi, günümüz problemlerden biri olan güven sorununa bir çözüm niteliği taşımaktadır. Blokzincir teknoloji mevcut internet altyapısının gerçekleştirebildiği veri aktarımının daha korunaklı ve şeffaf bir şekilde aktarılmasını sağlamaktadır. Tüm bu tanımlara ek olarak blok zincir teknolojisi merkeziyetsiz, kriptografik bir defter teknolojisidir.

3.2 Blokzincir Teknolojisinin Ortaya Çıkışı ve Gelişimi

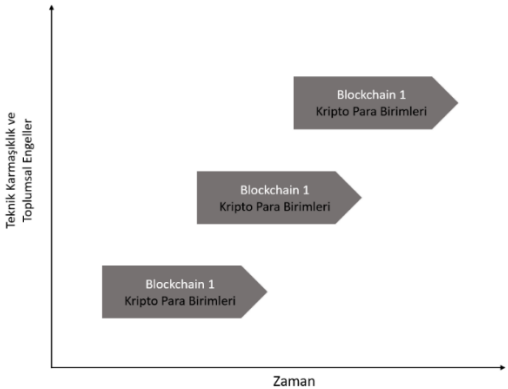
Blokzincir teknolojisinin ortaya çıkışı ve günümüze gelinceye geçen süreç incelendiğinde ilk olarak Bitcoin ile tanınmasına rağmen temeli Bitcoin'den daha eski bir tarihe dayandığı görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: Blok zincir teknolojisinin tarihi süreci The Knowledge Academy (2023)

Şekil 1'de görüldüğü üzere blokzincir teknolojisinin temel düşünceleri 1991 yılında Haber ve Stornetta' nın yazdığı bir makalede anlatılmıştır. Bilgisayar ve internet kullanımının artmaya başladığı bu dönemde dijital ortamda tutulan belgelerin korunması için zaman damgası fikrini ortaya atmışlardır. Böylece belgelerin oluşturulması kronolojik bir şekilde gösterilecekti (Suliman Eissa Mohammed & Jamal Salem Alharthi, 2022). 1992 yılında daha fazla kayıtın bir blokta depolanabilmesi için Merkle Ağaçları Yapısını tasarıma eklenerek verimliliğin arttırılması amaçlanmıştır. 2004 yılında Hal Finney Tekrar kullanılabilir İş İspatı isimli bir çalışma mekanizmasıyla aynı işlemin yanlışlıkla tekrarlanmasının önüne geçilmek istenmiştir (Sümer, 2021). 2008 yılında ise Satoshi Nakamoto adıyla bilinen bir kişi veya grup tarafından yayımlanan 'Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System' adlı makalede blokzincir sistemi açıkça anlatılmıştır.

Blokzincir teknolojisinin gelişim seviyelerini 3'e ayrılmıştır (Şekil 2): Blok zincir 1.0, Blok zincir 2.0 ve Blok zincir 3.0.



Şekil 2: Blokzincir teknolojisinin 3 aşaması (Hughes & ark,2019)

Blokzincir 1.0, para ve ödeme sistemini temsil etmektedir. Kripto paralar, blokzincir teknolojisinin temel elemanları anlatılmaktadır. Blokzincir 2.0, akıllı sözleşmeler bu aşamada yer almaktadır. Blokzincir 3.0 ise genel olarak ekonomik ve finansal uygulamaların dışındaki kullanımları temsil etmektedir (Tanrıverdi & ark, 2019).

3.3 Blokzincir türleri

Blokzincir sistemlerinin güncel sınıflandırılması şu şekildedir:

1- Genel Blokzincir: Çeşitli kurumlara bağlı ya da bağımsız kişilerin katılmasına, kayıt eklemesine izin veren açık bir platformdur. İnternete erişebilen herkes, blok zinciri platformuna kaydolarak giriş yapabilmektedir (Yang & ark, 2020). Genel blok zincirinin bir parçası olan kullanıcılar (düğümler olarak adlandırılır), kayıtların, işlemlerin veya gelen blokların bozulmasını önleyebilmektedir (Ferdous & ark, 2021). Genel blokzincirler tamamen açık ve şeffaftır. Herhangi bir özel doğrulayıcı düğüm içermemektedir

2- Özel Blokzincir: Bir kişi veya grup tarafından yönetilen, bir veya birden fazla kuruluşta bireyler arasında veri alışverişini ve

paylaşımını sağlayan blokzincirdir. Çoğu durumda, yalnızca katılımcıları seçen bir veya birden fazla kuruluş arasında kullanılmaktadır. Güvenlik, izinler ve erişilebilirlik gibi önemli özelliklerden bazıları yönetim organizasyonunun kontrolü altındadır (Zeba & ark, 2023). Özel bir izne sahip olmayan kişiler zincire katılamadığı için izinli blok zinciri olarak da adlandırılabilmektedir. Bir düğümün ağa katılımı ve erişimi, ağı yöneten grubun belirlediği kurallara göre yapılmaktadır.

3- Konsorsiyum Blokzincir: Önceden belirlenmiş ve seçilmiş bir düğüm grubunun karar verici olduğu, kısmen özel ve izinli bir blok zinciri yapısı olarak tanımlanmaktadır. Bu belirlenmiş düğümler, hangi katılımcıların ağa katılacağına ve hangi katılımcıların veri madenciliği yapabileceğine karar vermektedir. Ağın genel mi yoksa sınırlı mı olduğuna ve ağdaki herkesin veri okuma ve yazma işlemlerine sahip olup olmadığına karar vermektedir. Bu blok zincirleri, bankalar ve diğer devlet kurumları gibi çeşitli sektörlerde kullanılır (Li & ark, 2017).

4- Hibrit Blokzincir: Genel ve özel blok zincirlerini birleştiren bir blok zinciri platformudur. Bu durumda, her iki blok zinciri özelliği de geçerlidir (örneğin, bir kullanıcı hem "özel izin tabanlı bir sisteme" hem de "genel izinsiz bir sisteme" sahip olabilmektedir) (Sagirlar & ark, 2018). Hibrit platformun kullanıcıları, blok zincirinde tutulan verilere kimin erişebileceğine karar verebilmektedir. Özel ağda, kalan blok zinciri kayıtları gizli tutulur ve yalnızca sınırlı sayıda kayıt yayınlanmasına izin verilmektedir (Alkhateeb & ark,.2022). Bu uyarlanabilir yaklaşımla, kullanıcılar özel bir blok zincirini bir dizi genel blok zincirine hızla bağlayabilmektedir (Li & ark,.2018). Bir hibrit blok zinciri özel ağındaki işlemler genellikle o belirli ağ içinde doğrulanmaktadır. Ancak, kullanıcılar bunları doğrulama için genel blok zincirinde serbest bırakabilmektedir (Loghin & ark,.2022).

3.4 Blokzincir teknolojisinin avantajları

Blok zincir teknolojisinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

•Blok zincir, veri tabanının merkezi bir kuruluşa bağlı olmadan paylaşılmasına izin vererek çalışmaktadır. Bu dağıtık yapı, daha az maliyetle işleyebilir ve kontrol edilemez veya iptal edilemez. Şeffaftırlar.

•Sisteme dahil olan katılımcılar, bilgilerini ve işlemlerini kontrol etme yetkisine sahiptir.

•Blok zincirler eksiksiz, tutarlı ve güncel veriler sağlar.

•Güvenlik anlamında saldırılara karşı dirençlidir ve çevrimdışı saldırılara karşı bile dayanıklıdırlar.

•Blok zincirler, dolandırıcılık faaliyetlerini belirlemeye ve dağıtılmış fikir birliği oluşturmaya yardımcı olur, kötü niyetli işlemlerin ortaya çıkmasını veya gerçekleşmesini önler.

•Hassas ve önemli veriler, ağda uçtan uca şifreleme yöntemiyle korunabilir.

•Tüm işlemler dijital olarak damgalandığından ve kopyalandığından, kullanıcılar işlemlerin geçmişine kolayca erişebilir ve izleyebilir.

3.5. Blokzincir teknolojisinin dezavantajları

Blok zincir teknolojisinin birçok avantajının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Monrat & ark, 2019).

•Her düğümün blok zincirindeki fikir birliğine ulaşmak için tekrarlayan görevleri olması sebebiyle maliyetlidirler.

•Bir işlem, sadece zincire bağlı olan düğümler tarafından başarıyla doğrulandığında tamamlanır. Bu süreç vakit alabilmektedir.

•Blok zinciri karmaşık bir yapıya sahip olduğu için, genel bir kullanıcı için anlaşılması zor olabilir. Henüz bir kullanım kılavuzları bulunmamaktadır.

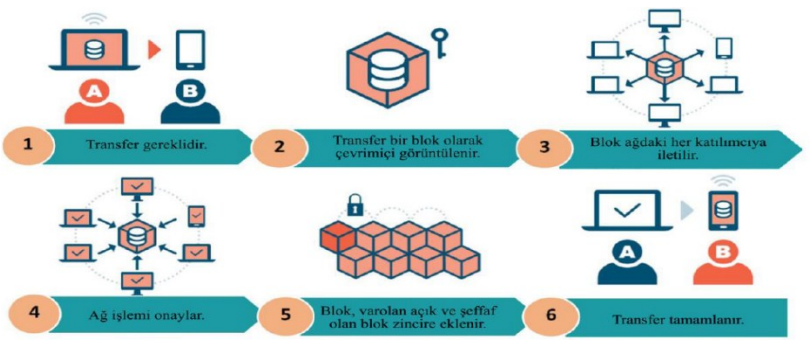
•Blok zincirde, işlemlerle ilgili tüm bilgiler kamuya açıktır ve bu, hassas bilgilerin kullanıldığı dağıtılmış defterler veya devlet verileri gibi ortamlarda büyük bir sorumluluk haline gelir.

•Blok zincir kullanımı enerji yoğundur ve bu nedenle bu teknoloji için daha güçlü ve pahalı bilgisayarlar gerekmektedir.

•Blok zincirinin finansal alanın ötesinde diğer uygulama alanlarındaki gelişmelere nasıl katkıda bulunduğuna dair çok az çalışma ve sınırlı bilgi vardır (Tandon & ark, 2021).

3.6 Blokzincir teknolojisinin çalışma sistemi

Bilgisyar teknolojilerinin gelişmesiyle, mühendislik problemlerinin çözümü hız kazanmaktadır. Çözüm teknikleri matris yöntemler, sonlu elemanlar metodu, istatistiksel analiz programlarının kullanımı, görüntü işleme teknolojileri gibi yeniliklerle artmaktadır. Literatürde bu çözüm tekniklerinin tek başına veya beraber kullanımına ilişkin pek çok çalışma bulunmaktadır (Ertenli & Köseoğlu, 2024), (Ertenli ve Esen, 2024), (Olabi & ark, 2018), (Battal Şal & Çubuk, 2022). Blok zincir, sürekli olarak artan verilerin toplandığı ve saklandığı bir kayıt defteridir. Zincirde yer alan her bir blok, bir önceki bloğa şifreleme ile bağlanmaktadır. Defterler bu işlemlerin toplandığı depolarıdır. Defterlere yeni bloklar eklenebilir ama değişiklik yapılması mümkün değildir. Bu durum işlemlerin ve verilerin güvenli bir şekilde kaydının tutulmasını sağlamaktadır (Suliman Eissa Mohammed & Jamal Salem Alharthi, 2022).



Şekil 3: Bir blokzincir defterine yeni işlem verileri ekleme yöntemi

(Suliman Eissa Mohammed & Jamal Salem Alharthi, 2022).

Şekil 3'de görüldüğü gibi blok zincir üzerinde işlem yapılmak istendiğinde, işlem ağ üzerindeki tüm düğümlere ulaşmaktadır. İşlemin gerçekleşmesi bloğun zincire eklenmesinde gerekli olan şifrenin çözümlenmesi için tüm düğümler çalışmaktadır. Şifreyi çözen düğüm bunu, ağ üzerindeki kullanıcılara yayınlamaktadır. Kullanıcılar işlemi onaylar ve işlem bloğu zincire eklenir.

4. Akıllı Otopark Sistemlerinde Blokzincir Uygulamaları

Akıllı şehir, şehrin yaşam standartlarını iyileştirmek ve kamu hizmetlerinin verimliliğini artırmak için yenilikçi teknolojilerden, yararlanan bir kentsel alandır. Şehirler, vatandaşların yaşam kalitesini iyileştirmek için akıllı teknolojileri kullanmaya başlayarak akıllı şehirler haline gelmektedir. Kötü bir park yönetimi, stresli park yeri aramalarına neden olmaktadır. Bir yandan da sürücülerim güvenliğini etkileyerek trafik sıkışıklığına neden olurken vatandaşların yaşam kalitesini düşürmektedir. Başka bir deyişle, kötü park yönetimi nedeniyle akıllı şehirler ve akıllı teknolojileri kullanan şehirler daha iyi yaşanabilir kentsel ortamlara ulaşamazlar. Artan kentsel nüfus dolayısıyla bireysel araç sahipliliğinin artması ve kent merkezlerindeki sınırlı sayıda park yeri nedeniyle, park yeri halkın en büyük sorunlarından biri haline gelmiştir (Wang & He, 2011). Kentleşmedeki gelişmeler, yaşam alanlarına olan yüksek talepler ve trafikteki araç sayısındaki artış nedeniyle park yeri bulmak, sürücüler için günlük yaşamda önemli bir zorluk haline gelmiştir. Özellikle büyükşehirlerde daha fazla otopark seçeneği bulunmalıdır (Najmi & Rashidi, 2017), (Me & ark, 2019). Şehir merkezlerinde mevcut park yeri sayısı ile trafikteki araç sayısı arasında önemli bir fark vardır. Bu durum trafik sıkışıklığına ve park etmenin yasak olduğu yerlere park etmelere neden olmaktadır. Öte yandan, genellikle mesai saatleri sırasında konutlara ait park yerleri, mesai saatleri dışında ve tatillerde iş yerlerine ait park yerleri gibi özel park yerlerinin çoğu kullanılmamaktadır. Sürdürülebilir ulaşım ve mobilite teknolojileri geliştikçe, yoğunluğun yaşanmadığı dönemlerinde özel park yerleri gibi kaynakların paylaşılması akıllı

şehirlerdeki yasadışı park sorunlarını çözebilir ve trafik sıkışıklığını azaltabilmektedir (Carli & Pellegrino, 2016). Bu park yerlerinin güncel doluluk oranları paylaşılsa, trafik sıkışıklığını ve park sorunlarını azaltmak için büyük bir yardım olacaktır.

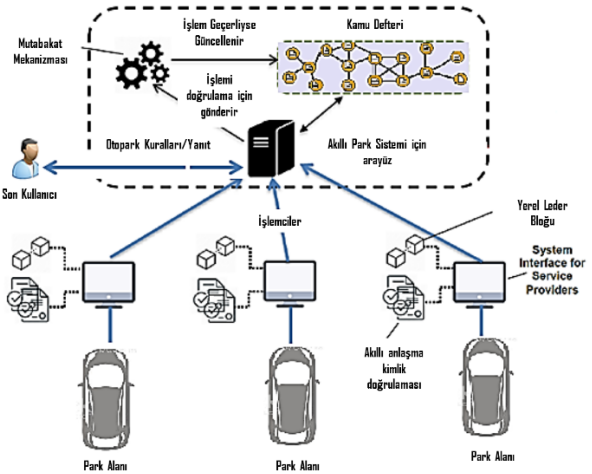
Akıllı nesneler teknolojisi (IoT) ve kablosuz iletişim teknolojisi, park yerlerini arama ve güvenli akıllı park sistemi sayesinde akıllı park için etkili çözümler ortaya çıkarmaktadır. Bu IoT cihazları, sensörlerin park yerlerine kurularak park yerinin müsait olup olmadığını algılar ve durum bilgilerini servis sağlayıcısıyla birlikte depolar. Servis sağlayıcı, sürücüye müsait park yerlerini uygulama üzerinden göstermek ve boş park yerlerini bulma gibi bilgileri sağlar. Akıllı park sistemlerini kullanmanın birçok avantajına rağmen, bunları kurarken dikkate alınması gereken birçok zorluk vardır. En önemlilerinden biri, sürücü akıllı park sisteminden destek almak istediğinde kişisel bilgilerini sisteme yüklerken bilgi gizliliğini sağlanamamasıdır. Park hizmeti sağlayıcısı sürücülerin kişisel bilgileri, ev ve iş adresleri vb. gibi bilgilerini toplayabilir ve elde ettiği verileri ilgili başkalarıyla birlikte inceleyebilir (Yang & ark, 2015). Bu kadar önemli bilgilere güvenlik sağlamak büyük bir zorluktur. Telefon numarası ve e-posta adresi gibi sürücülerin hassas verilerine güvenlik sağlamak gibi birçok sınırlama vardır, düzenli park verileri güvenli akıllı park sistemlerine kaydolarak saklanmaktadır. Bu da gizlilik ihlali ve bilgi yanlışlığı oluşma ihtimali taşımaktadır. Ayrıca park yerlerini kullanılamaz hale getirebilen, sistemi kilitleyebilecek siber saldırılarına karşı hassastırlar. Bu sunucu modelinin aksine, blokzincir bu hizmete bir güvenlik katmanı ekleyebilir. Blokzincir modeli, madenci adı verilen blokzincir ağının her üyesine dağıtılan bir işlem defterini içermektedir. Defterdeki işlemler, gelişmiş kriptografik algoritmalar aracılığıyla kötü niyetli dağlayıcıların hatalı işlemler göndermediğinden emin olan bir fikir birliği protokolünün yürütülmesiyle doğrulanmaktadır (Lv & ark, 2002), (Abdulkader & ark, 2018). Bu uygulamaların iş mantığı, blokzincir ağında yaşayan ve yürütülen kod olan akıllı sözleşmeler aracılığıyla uygulanmaktadır (Lv & ark, 2002).

Literatürde, bazı çalışmalar akıllı park sistemleri geliştirmek için blokzincir teknolojisini benimsemiştir. Singh ve arkadaşları [10], sürücülere varış noktalarına yakın en iyi park alanını sağlamak için verileri analiz etmek üzere blokzincir ve derin öğrenme tekniklerini birleştiren bir çerçeve önermiştir. Bununla birlikte, (Yang & ark, 2015), (Obaidat & Boudriga, 2007) ve (Jain & Li, 2011)'de önerilen diğer çalışmalar, sürücüler ve park yeri sahipleri arasında doğru bir eşleşme olmaması ve bunun yerine sürücü, talebine yönelik uygun bir yer bulmak için o bölgedeki kullanılabilir park yerlerini araştırmak, bulmak ve kontrol etmek gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu da hatalı ve güncel olmayan bilgiler sunmasına veya çift rezervasyon sorunlarına yol açabilmektedir. Sonuç olarak sürücünün bir yer bulmak için yeniden park yerlerini kontrol edip bilgi doğruluğunu teyit etmesi gerekmektedir. IoT cihazları, ortaya çıkan tekniklerle birlikte park alanını aramak için kullanılmaktadır. Sürücü en yakın park alanını ararken gerçek zamanlı trafik kayıtları ile güncel veriler sisteme dahil edilmektedir. Sürücü, cihaz ve park alanı arasındaki haberleşmeyle en iyi park yerini bulmak için blokzincir teknolojisi tabanlı algoritmalar kullanılmalıdır. Gerçek zamanlı bilgi blokzincir teknolojisi kullanılarak elde edilebilir.

Blokzincir tabanlı akıllı park sisteminde blokzincir ağına sürücü ve park hizmeti sağlayıcısı gibi katılımcılar vardır. Park hizmeti sağlayıcısı, park yerlerini, park hizmetini ve ödeme bilgilerini günceller. Blokzincir ağı, bir defterden oluşur ve defteri yasal işlemlerle günceller. İşlemleri doğrulamak için bir fikir birliği mekanizması kullanılır. Sürücü güvenli bir otopark talep eder. Güvenli akıllı otopark sisteminin, her bir kullanıcının kendisiyle iletişim kurması için kendi uygulaması vardır. Şekil 4, blokzincir güvenli akıllı otopark sistemini göstermektedir (Waheed & Krishna, 2020).

Her akıllı park sistemi bir otopark hizmeti sağlayıcısı altındadır. Her park yeri, blokzincir tabanlı güvenli akıllı otopark sistemi ağıyla ilişkilendirilmiştir. Her park yeri, blokzincir teknolojisine ait defterin bir kopyasına sahiptir. Akıllı park

sistemindeki ilk işlem, park sensörü tarafından üretilen veridir. Park alanı, otopark kullanılabilirliğini işlem olarak üretebilen bir IoT cihazıyla entegre edilir.



Şekil 4: Blokzincir tabanlı güvenli akıllı park sistemi

(Waheed & Krishna, 2020)

Her otopark hizmeti sağlayıcısının işlemi üretmek için bir akıllı sözleşmesi vardır. Park yerinin durumu "boş"tan "dolu"ya güncellenirse, IoT cihazı tarafından bir işlem üretilir. Aynı şekilde, park yeri "dolu"dan "boş"a güncellendiğinde IoT cihazı tarafından işlem üretilir. İşlem deftere yönlendirilir. Defteri, kimlik doğrulama için blokzincir tabanlı ağda işlemi sonlandırır. Sonraki işlem, park ücreti ödemesidir. Park hizmeti sağlayıcıları, aracın park edildiği zamana bağlı olarak park ücretinin ödeme maliyetini belirler. Park ücreti ödeme ücretleri için akıllı sözleşmeler oluşturulur. Park ücreti ödeme ücretleri için akıllı sözleşme, blok zinciri tabanlı ağa aktarılır. İşlem oluşturuldukça park ücreti ödeme ücretleri park etme zamanına bağlı olarak otomatik olarak değişir. İşlem, kimlik doğrulaması için blok zinciri tabanlı ağa gönderilir. İşlem, blok zinciri tabanlı ağ tarafından doğrulanır. Geçerli işlem geçerse, defterinde depolanır. Daha sonra, defterdeki bloklar güncellenir (Waheed & Krishna, 2020).

5. Sonuçlar

Kent içi ulaşım konusunda otopark alanları önemli bir bileşendir. Otopark alanlarının planlanması ve yönetilmesi ilgili mevzuat aracılığı ile belirlenmektedir. Araç sayısına bağlı olarak ihtiyaç duyulan otopark alanlarının planlanmasında, arazi durumu, otopark kapasitesi gibi hususlar ile araç sahiplerinin alışkanlıkları dikkate alınarak yönetilmelidir. Kentsel mekânın değerli olması ve toplumsal sürdürülebilirlik için otopark planlanması ve yönetilmesi süreci güncel teknoloji ile sağlanmalıdır. Buradan hareketle birçok alanda kullanılmaya başlanılan blokzincir teknolojisi akıllı otopark sistemlerinde kullanılarak hem sürücüler hem de park hizmeti sağlayıcılar açısından daha güvenli ve şeffaf bir park sistemi sağlamaktadır.

Akıllı bir şehir inşa etmek için temsili bir hizmet olan akıllı otopark sistemi akıllı cihazlarla elde edilen verilerin yönetilmesi şeklindedir. Bu verilerin yönetilmesinde blokzincir teknolojisi kullanılarak büyük miktarda gerçek zamanlı veri toplanabilmektedir. Blokzincir teknolojisi tabanlı algılama teknolojileri, IoT sensörleri kurmak gibi yüksek ilk maliyetler gerektirmemesi ve kamuya ait birçok mobil cihaz aracılığıyla büyük miktarda gerçek zamanlı veri toplayabilmesi gibi bir avantajı vardır. Veriler birbirine bağlanan bloklarda depolanan bir defter olarak çalışır. Bu defter, işlemleri doğrulamak için merkezi bir otoriteye olan ihtiyacı ortadan kaldıran eşler arası bir ağ tarafından tutulur ve böylece tek bir hata noktasından kaçınılmış olur. Merkezi otoriteler olmadan işlem hızları artırılabilir ve ilişkili işlem maliyetleri ortadan kaldırılabilir. Blok zinciri akıllı sözleşmeleri destekler. Akıllı sözleşmeler şeffaf, geri döndürülemez ve izlenebilir işlemlere olanak tanır. Blokzincir teknolojisi şeffaflığı artırabilir ve akıllı park sisteminin bütünlüğünü sağlayabilir. Blok zincirinin merkezi olmayan ve ölçeklenebilir yapısı, her katılımcıya doğrulama yetkisi verirken işlemleri güvence altına almak için umut verici ve sürdürülebilir bir yaklaşım haline getirir. Park yönetim sistemindeki işlemlerin sürekliliği, veri güvenliği ve yönetimi, sisteme kabul edilen hizmet sağlayıcıların

verileri daha güvenli bir şekilde paylaşabilmesi ve yönetebilmesi bakımından da blokzincir teknolojisi yenilikçi bir çözümdür.

Kaynaklar

Abdulkader, O., Bamhdi, A. M., Thayananthan, V., Jambi, K., & Alrasheedi, M. (2018). A novel and secure smart parking management system (SPMS) based on integration of WSN, RFID, and IoT. In *2018 15th Learning and Technology Conference (L&T)* (pp. 102-106). IEEE.

Alkhateeb, A., Catal, C., Kar, G., & Mishra, A. (2022). Hybrid blockchain platforms for the internet of things (IoT): A systematic literature review. *Sensors*, *22*(4), 1304.

Axhausen, K. W., & Polak, J. W. (1991). Choice of parking: Stated preference approach. *Transportation*, *18*, 59-81.

Battal Şal, Ö., & Çubuk, K. (2022). Ulaştırma projeleri fizibilite etütlerinde bulanık çok kriterli bir değerlendirme modeli. *Politeknik Dergisi*, 1-1. https://doi.org/10.2339/politeknik.881067

Bitcoin, B. (2015). BlockChain Technology. *Tech. Rep2015*.

Carli, R., Dotoli, M., & Pellegrino, R. (2016). A hierarchical decision-making strategy for the energy management of smart cities. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *14*(2), 505-523.

Ertenli, M. F., & Esen, İ. (2024). The effect of the various porous layers on thermomechanical buckling of FGM sandwich plates. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 31(28), 10935–10961. https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2299934

Ertenli, M. F., & Köseoğlu, E. M. (2024). Geleneksel Bir Yapıdaki Ahşap Taşıyıcı Sistem Panelinin Yanal Yük Kapasitesinin Analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, *16*(1), 448-460. https://doi.org/10.29137/umagd.1409739

Ferdous, M. S., Chowdhury, M. J. M., & Hoque, M. A. (2021). A survey of consensus algorithms in public blockchain

systems for crypto-currencies. *Journal of Network and Computer Applications*, *182*, 103035.

Ge, Z., Loghin, D., Ooi, B. C., Ruan, P., & Wang, T. (2022). Hybrid blockchain database systems: design and performance. *Proceedings of the VLDB Endowment*, *15*(5), 1092-1104.

Haber, S., & Stornetta, W. S. (1991). *How to time-stamp a digital document* (pp. 437-455). Springer Berlin Heidelberg.

Hughes, A., Park, A., Kietzmann, J., & Archer-Brown, C. (2019). Beyond Bitcoin: What blockchain and distributed ledger technologies mean for firms. *Business Horizons*, *62*(3), 273-281.

Ibeas, A., Dell'Olio, L., Bordagaray, M., & Ortúzar, J. D. D. (2014). Modelling parking choices considering user heterogeneity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *70*, 41-49.

Jain, A. K., & Li, S. Z. (2011). *Handbook of face recognition* (Vol. 1, p. 699). New York: springer.

Jin, J., Gubbi, J., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2014). An information framework for creating a smart city through internet of things. *IEEE Internet of Things journal*, *1*(2), 112-121.

Kardi, T. K. H. (1997). Parking Behavior in Central Business District A Study Case of Surabaya. *EASTS journal*, *2*(2), 551-570.

Kobus, M. B., Gutiérrez-i-Puigarnau, E., Rietveld, P., & Van Ommeren, J. N. (2013). The on-street parking premium and car drivers' choice between street and garage parking. *Regional Science and Urban Economics*, *43*(2), 395-403.

Kuo, T. T., Gabriel, R. A., & Ohno-Machado, L. (2019). Fair compute loads enabled by blockchain: sharing models by alternating client and server roles. *Journal of the American Medical Informatics Association*, *26*(5), 392-403.

Lemieux, V. L., Hofman, D., Batista, D., & Joo, A. (2019). *Blockchain technology & recordkeeping. ARMA International Education Foundation*.

Li, H., Han, D., & Tang, M. (2021). Logisticschain: a blockchain-based secure storage scheme for logistics data. *Mobile Information Systems*, *2021*(1), 8840399.

Li, Z., Wu, H., King, B., Miled, Z. B., Wassick, J., & Tazelaar, J. (2018, June). A hybrid blockchain ledger for supply chain visibility. In *2018 17th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC)* (pp. 118-125). IEEE.

Li, Z., Kang, J., Yu, R., Ye, D., Deng, Q., & Zhang, Y. (2017). Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things. *IEEE transactions on industrial informatics*, *14*(8), 3690-3700.

Litman, T. (2016). *Parking management: strategies, evaluation and planning* (p. 2). Victoria, BC, Canada: Victoria Transport Policy Institute.

Lv, Q., Cao, P., Cohen, E., Li, K., & Shenker, S. (2002). Search and replication in unstructured peer-to-peer networks. In *Proceedings of the 16th international conference on Supercomputing* (pp. 84-95).

Ma, X., Sun, X., He, Y., & Chen, Y. (2013). Parking choice behavior investigation: A case study at Beijing Lama Temple. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *96*, 2635-2642.

Mei, Z., Feng, C., Ding, W., Zhang, L., & Wang, D. (2019). Better lucky than rich? Comparative analysis of parking reservation and parking charge. *Transport Policy*, *75*, 47-56.

Monrat, A. A., Schelén, O., & Andersson, K. (2019). A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *Ieee Access*, *7*, 117134-117151.

Najmi, A., Rey, D., & Rashidi, T. H. (2017). Novel dynamic formulations for real-time ride-sharing systems. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, *108*, 122-140.

Suliman Eissa Mohammed, H., & Jamal Salem Alharthi, W. (2022). Blockchain technology and the future of construction industry in the Arab region: applications, challenges, and future opportunities. *Engineering Research Journal*, *173*, 411-441.

Sümer, G. (2021). Dünyada ve Türkiye'de blok zincir teknolojisinin gelişimi ve kripto paralar. *Hitit Sosyal Bilimler Dergisi*, *14*(1), 191-207.

Obaidat, M., & Boudriga, N. (2007). *Security of E-systems and Computer Networks*. Cambridge University Press.

Olabi, M. N., Çağlar, N., Kısa, M. H., & Yüksel, S. B. (2018). Kompozit Perde Duvarların Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışlarının İrdelenmesi. *Academic Perspective Procedia*, *1*(1), 1330-1337. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102069

Perera, L. P., & Czachorowski, K. (2019, June). Decentralized system intelligence in data driven networks for shipping industrial applications: digital models to blockchain technologies. In *OCEANS 2019-Marseille* (pp. 1-6). IEEE.

Rahaman, M. S., Hamilton, M., & Salim, F. D. (2017, January). Predicting Imbalanced Taxi and Passenger Queue Contexts in Airport. In *PACIS* (p. 172).

Sagirlar, G., Carminati, B., Ferrari, E., Sheehan, J. D., & Ragnoli, E. (2018, July). Hybrid-iot: Hybrid blockchain architecture for internet of things-pow sub-blockchains. In *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)* (pp. 1007-1016). IEEE.

Taherkhani, M. A., Kawaguchi, R., Shirmohammad, N., & Sato, M. (2016, May). BlueParking: An IoT based parking

reservation service for smart cities. In *Proceedings of the second international conference on IoT in urban space* (pp. 86-88).

Tandon, A., Kaur, P., Mäntymäki, M., & Dhir, A. (2021). Blockchain applications in management: A bibliometric analysis and literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, *166*, 120649.

Tanrıverdi, M., Uysal, M., & Üstündağ, M. T. (2019). Blokzinciri teknolojisi nedir? ne değildir?: alanyazın incelemesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, *12*(3), 203-217.

Taskinsoy, J. (2019). Blockchain: a misunderstood digital revolution. Things you need to know about blockchain. *Things You Need to Know about Blockchain (October 8, 2019)*.

The Knowledge Academy (2023). *A Brief History of Blockchain Technology* (14/11/2024 tarihinde https://www.theknowledgeacademy.com/blog/history-of-blockchain adresinden ulaşılmıştır).

Wang, H., & He, W. (2011, April). A reservation-based smart parking system. In *2011 IEEE conference on computer communications workshops (INFOCOM WKSHPS)* (pp. 690-695). IEEE.

Waheed, A., & Krishna, P. V. (2020). Comparing biometric and blockchain security mechanisms in smart parking system. In *2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 634-638). IEEE.

Yang, K., Zhang, K., Ren, J., & Shen, X. (2015). Security and privacy in mobile crowdsourcing networks: challenges and opportunities. *IEEE communications magazine*, *53*(8), 75-81.

Yetişkul, E., & Şenbil, M. (2018). Ankara'da Otopark Sorunu ve Çözüm Önerileri. *Megaron*, *13*(2).

Yang, R., Wakefield, R., Lyu, S., Jayasuriya, S., Han, F., Yi, X., ... & Chen, S. (2020). Public and private blockchain in

construction business process and information integration. *Automation in construction*, *118*, 103276.

Zeba, S., Suman, P., & Tyagi, K. (2023). Types of blockchain. In *Distributed Computing to Blockchain* (pp. 55-68). Academic Press.

BÖLÜM XIII

Kentsel Altyapı Sistemlerinde Etkin Su Kayıp Yönetimi için Aktif Sızıntı Kontrolü: Temel Kavramlar ve Kazanımlar

Cansu BOZKURT[1]
Mahmut FIRAT[2]

Giriş

Kentsel su ve atıksu altyapı sistemleri kentsel su döngüsünün en önemli bileşenleridir. Su kaynağından son kullanıcıya kadar güvenli, kaliteli ve istenilen miktarda suyun iletilmesinde içmesuyu temin, iletim ve dağıtım sistemleri kritik rol oynamaktadır. Bu sistemler bölgenin özelliğine göre farklı karakteristiklere sahip olmaktadır. Ayrıca bu sistemler bölgenin gelişimi, nüfus artışı ve sanayileşmeye bağlı olarak dinamik bir şekilde büyümekte ve zamanla yaşlanmaktadır. İletim ve dağıtım sistemlerinde hizmet veren boru ve bağlantı elemanlarının yaşlanması, sistemdeki yüksek basınç veya basınçtaki dalgalanmalar, çevresel faktörler ve zemin

[1] Dr. Öğr. Üyesi., Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Ardahan/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0987-1297, cansubozkurt@ardahan.edu.tr
[2] Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-8010-9289, mahmut.firat@inonu.edu.tr

özellikleri sistemin işletme koşullarının bozulmasına neden olmaktadır. İşletme koşullarının bozulmasına bağlı olarak sistemde arıza oranının ve sızıntıların artması, su kesinti sıklığının artması, abone şikayetlerinin artması, abone memnuniyet düzeyinin azalması ve yönetim maliyetlerinin artması gibi en temel olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Yilmaz et al., 2021). İçmesuyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızaların belli bir kısmı yüzeye çıkmakta ve rapor edilen arızalar olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte sistemdeki arızaların önemli bir kısmı çeşitli faktörlere bağlı olarak zemin yüzeyine çıkmamakta ve rapor edilmeyen arızalar olarak tanımlanmaktadır (Lambert et al., 1999; Pearson, 2019).

İçme suyu dağıtım sistemlerinde rapor edilen ve rapor edilmeyen arızalara bağlı olarak farklı düzeylerde sızıntılar meydana gelmektedir. Bu sızıntılar su kaynağından son kullanıcıya kadar her noktada meydana gelebilmektedir. Özellikle isale hatlarında boru gövdesinde ya da bağlantı noktalarında arıza nadir meydana gelmekle birlikte, yüksek basınç ve yüksek debiye bağlı olarak bir arızadaki birim sızıntı debisi çok yüksek seviyede olmaktadır. Diğer taraftan dağıtım sistemlerinde hat uzunluğunun ve servis bağlantı sayısının fazla olmasına bağlı olarak arıza oranları çok daha fazla olmaktadır. Ancak dağıtım sisteminde basınç genel olarak 25 m ile 65 m arasında olması ve boru çaplarının daha küçük olmasına bağlı olarak birim zamanda kaybolan su miktarı isale hat arızalarına göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Ancak arıza oranın yüksek olmasından dolayı yıllık sızıntı hacminin önemli bir kısmını dağıtım sistemlerindeki sızıntılar oluşturmaktadır (Bozkurt, 2022).

Kaynağından alınıp yasal kayıtlı abonelere iletilen ancak tüketildiği halde ücreti alınamayan su gelir getirmeyen su (GGS) olarak tanımlanmaktadır (Lambert et al., 1999). GGS hacmi, sızıntılar, idari (ticari) kayıplar ve yasal faturalandırılmamış kullanımlardan oluşmaktadır (Pearson, 2019). Dağıtım sistemlerinde yıllık sızıntı oranları % 25 ile 30 aralığında (Avrupa Komisyonu,

2014; Liemberger ve Wyatt, 2019). Su kaynaklarının önemli bir kısmı su, şebekedeki sızıntılar nedeniyle kaybolmaktadır. Gelişmiş ülkelerde sızıntı oranları yaklaşık %3 ile 7 arasında iken gelişmekte olan ülkelerde %50'den fazla olduğu tahmin edilmektedir (Moslehi et al., 2021). Türkiye'de, Türkiye Su Enstitüsü (SUEN) ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) belli dönemlerde su kayıp oranlarını yayınlamaktadır. Bu SUEN tarafından 2020 yılında yayınlanan raporda Türkiye'de Su ve Kanalizasyon İdarelerinde ortama su kayıp oranı % 42 olarak ifade edilmiştir (SUEN, 2020). Bu raporda idarelerdeki kayıp oranlarının % 22 ile % 67 arasında değiştiği bildirilmiştir. İçmesuyu temin ve dağıtım sistemlerinde meydana gelen sızıntılar su kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte sızıntı oranının artmasına bağlı olarak ekonomik kayıplar da ciddi seviyelere ulaşabilmektedir. Özellikle pompaların yoğun kullanıldığı ve enerji tüketimlerinin yüksek seviyelerde olduğu iletim sistemlerinde talebin karşılanması için daha fazla su üretilmekte ve enerji tüketilmektedir. Bunun sonucunda su üretim maliyetleri artmaktadır. Benzer şekilde arıza sayısının fazla olduğu sistemlerde arıza onarım maliyetleri de önemli seviyelerde olmaktadır (Yilmaz et al., 2022). Türkiye'de SUEN tarafından yayınlanan raporda idarelerde su temin ve dağıtım sistemlerinde su kayıp oranlarına bağlı olarak meydana gelen toplam yıllık ekonomik kayıp, 2017 yılı fiyatlarıyla 7 milyar TL'yi aşmaktadır (SUEN, 2017).

Literatürde su kayıplarının önemli bir kısmını oluşturan ve su kaynağı verimsizliğine neden olan sızıntıların önlenmesi, azaltılması, kontrol edilmesi ve izlenmesi amacıyla, basınç yönetimi (Kanakoudis ve Gonelas, 2016; Creaco ve Walski, 2017; Muhammetoglu vd., 2018), aktif sızıntı kontrolünün planlanması ve uygulanması (Ferrari ve Savic, 2015; Campbell vd., 2016; Cabral vd., 2019; Lipiwattanakarn vd., 2019), rapor edilen arıza onarım hızının ve kalitesinin iyileştirilmesi süreçlerinin yönetimi (Marchionni vd., 2016; Agathokleous ve Christodoulou, 2017) gibi yöntemler uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler, ekip, ekipman, kurumsal ve personel tecrübesi ve finansal gibi gereksinimlere

ihtiyaç duymaktadır. Özellikle yöntemlerin uygulanmasında yüksek oranlarda ilk yatırım ve işletme maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yöntemler uygulanmadan önce, idarenin mevcut durumu, teknik ve kurumsal tecrübesi, uygulanabilirliği, gerekliliği çerçevesinde detaylı değerlendirme yapılmalıdır (Bozkurt, 2022). Sızıntıların kontrol altına alınması ve yerinin tespit edilmesi amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

(Bosco et al., 2020) bir su dağıtım şebekesinde sızıntıları kontrol altına alabilmek amacıyla rehabilitasyon ve aktif basınç kontrol stratejilerini değerlendirebilmek amacıyla simülasyon modeli kullanılmıştır. Modelde boru rehabilitasyonu, basınç kontrolünün lokal olarak uygulanması ve uzaktan gerçek zamanlı basınç kontrolünün uygulanması olmak üzere üç farklı sızıntı azaltma stratejisi simüle edilmiştir. Simülasyonların sonuçları, kullanılan stratejilerin bir kombinasyonunun, su sızıntısını önemli ölçüde azaltarak şebeke performansını iyileştirebileceğini ortaya koymuştur. (Mathye et al., 2022) çalışmada hacimsel maliyet performansı, sızıntı maliyet endeksleri, sızıntı akış hızı gibi indislerin ölçümünde optimum basınç yönetimi ve verimlilik endekslerinin uygulanabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki aşamalı olmak üzere sabit ve değişken deşarj (FAVAD), patlama ve arka plan tahmini (BABE) basınç yönetimi stratejileri uygulanmıştır. Sonuçlar sistem giriş hacminde 26.272.579 m3'ten 21.915.943 m3'e azalma ve minimum gece akışında (MNF) %14,01'den %12,50'ye bir azalma olmuştur. Bu çalışma ile optimum basınç yönetiminin bir dağıtım sistemi üzerinde suyun nereden ve ne şekilde kaybolduğunun simüle edilmesi, tahmini ve ölçümü için alternatif olabileceği görülmüştür.

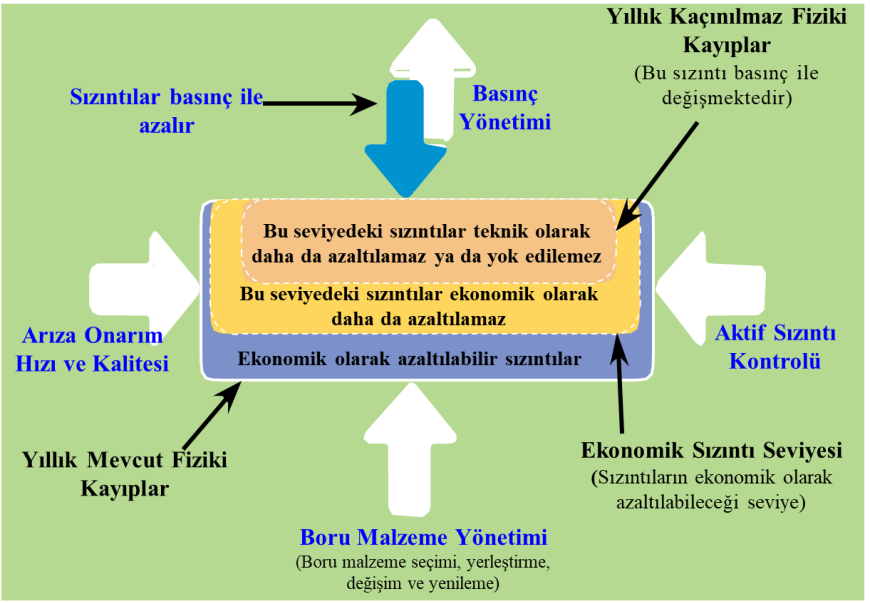
(Galiatsatou et al., 2024) çalışmada mevcut altyapının hidrolik davranışını değerlendirmek ve basınç sensörleri, debimetre, su seviye sensörleri ve basınç düşürücü vanalar gibi gerekli ekipmanların kurulacağı kritik noktaları tespit edebilmek amacıyla hidrolik modelleme yapılmış, küçük bir şebeke üzerine basınç ve akış ölçüm ekipmanları kurulmuştur. Şebekede basıncın yüksek olduğu noktalar tespit edilerek basınç düşürücü vanalar

yerleştirildiğinde fiziki su kayıplarında %23 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir. Su dağıtım şebekelerinde basınç yönetimi en etkili stratejilerden biridir. Farklı yönetim stratejilerine bağlı olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. (Tian et al., 2023) sızıntıları kontrol etmek ve su kaynaklarının verimli kullanımını sağlayabilmek amacıyla belirli bir temin sistemi için en uygun optimizasyon stratejisi araştırılmıştır. Çalışmada basınç yönetim stratejilerini karşılaştırmak üzere iki örnek şebeke için göstergeler hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde farklı basınç kırıcı vana kontrol stratejileri uygulandığında şebekeler arasında önemli farklılıklar oluştuğunu etkili bir biçimde yansıtmıştır.

Bu çalışmada kentsel alt yapı sistemlerinde etkin sızıntı yönetimi için uygulanan en temel yöntemler ve bu yöntemlerin uygulanması ile elde edilen kazanımlar örnek uygulamalar ile tartışılmıştır. Bu kapsamda özellikle sahada yaygın bir şekilde uygulanan ve kısa sürede önemli kazanımlar sağlayan aktif sızıntı kontrolü (ASK) ve basın düzenleme ve kontrol yönetimi (BKDY) yöntemleri göz önüne alınmıştır. Bunun için saha uygulamaları ile elde edilen gerçek veriler ışığında kazanımlar değerlendirilmiştir.

2. Aktif Sızıntı Kontrolü: Temel Kavramlar ve Saha Uygulamaları

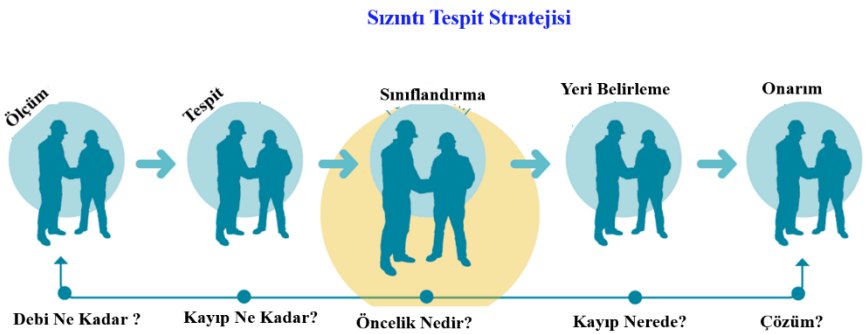
Dağıtım sisteminde veya izole ölçüm bölgelerinde sızıntı hacminin azaltılması ve yönetilmesi amacıyla uygulanan, basınç yönetimi, boru malzemesi yönetimi, arıza onarım hızı ve kalitesi ve aktif sızıntı kontrolü gibi temel yöntemler uygulanmaktadır (Şekil 1) (Pearson, 2019). Bu yöntemlerin uygulama düzeyine bağlı olarak sızıntı hacmi azalmakta veya artmaktadır.



Şekil 1. Sızıntı yönetimi için önerilen ve uygulanan temel yöntemler (Pearson, 2019)

Dağıtım sisteminde meydana gelen arızaların ve sızıntıların kontrolü ve yönetilmesi için uygulanan pasif sızıntı kontrolü ve aktif sızıntı kontrolü gibi iki farklı müdahale türünü ifade etmektedir. *Aktif sızıntı kontrolü*, izole ölçüm bölgelerinde yüzeye çıkmayan (rapor edilmeyen) sızıntıların tespit edilmesi, azaltılması ve önlenmesini kapsamaktadır (Lambert vd., 1999). Aktif sızıntı kontrolü için dağıtım sisteminde izole ölçüm bölgelerinin oluşturulması, minimum gece debisinin (MNF) analizinin yapılması, debi-basınç değişiminin izlenmesi, farkına varılan sızıntı yerlerinin tespit edilmesi ve sızıntı onarımlarının yapılması gerekir. Ayrıca izole ölçüm bölgesinde debi-basınç değişimi sürekli izlenerek yeni sızıntı oluşumlarına anlık müdahale edilmelidir. Aktif sızıntı kontrolü MNF analizi ile belirlenen potansiyel önlenebilir sızıntıların yerinin tespiti ve önlenmesi amacıyla uygulanır. Bu

yöntemin belirsiz sızıntıların azaltılması ve önlenmesi kapsamında etkisi bulunmamaktadır.

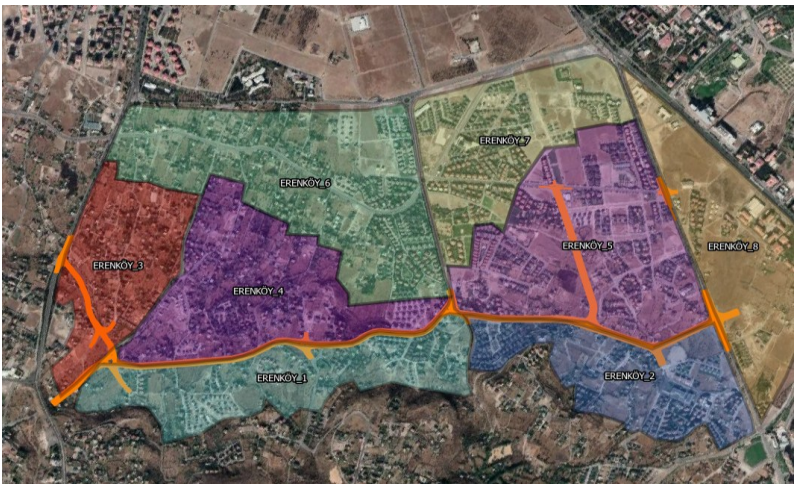


Şekil 2. Sızıntı tespit stratejisi işlem adımları (Sardinha vd., 2017)

Aktif sızıntı kontrolünde en temel aşama sızıntıların farkına varılması gösterilebilir. Bunun için dağıtım sisteminde izole ölçüm bölgelerinin planlanması ve uygulanması, giriş debilerinin ve MNF değişimlerinin izlenmesi, sızıntıların yerinin akustik yöntemlerle tespit edilmesi ve yeri belirlenen arızaların onarılması çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

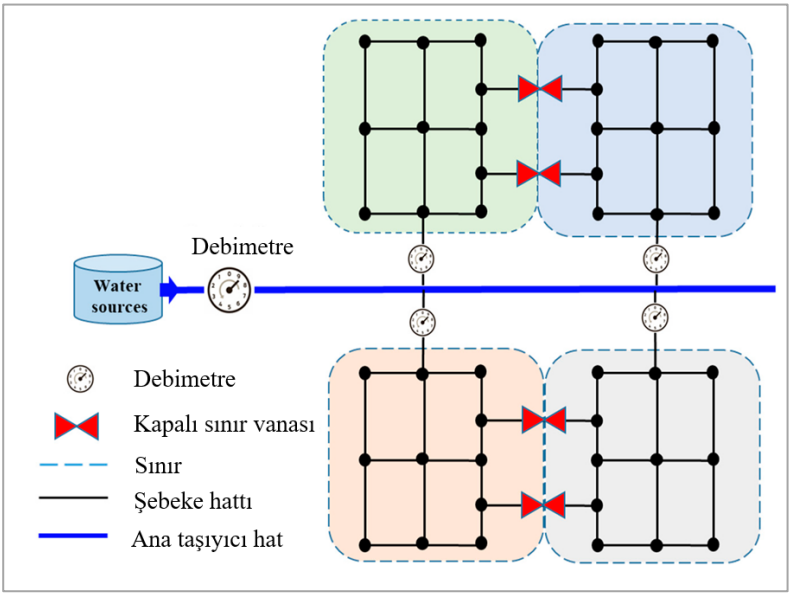
İzole ölçüm bölgesi, dağıtım sistemlerinde etkin ve sürdürülebilir su kayıp yönetimi için planlanan, izolasyon vanaları ile diğer bölgelerden ayrılan, bir veya iki girişe sahip olan, tüm bileşenleri (şebeke, abone, hidrolik parametreler) kendi içinde değerlendirilen alt ölçüm bölgelerini ifade etmektedir (Farley vd., 2008). İzole ölçüm bölgesi yaklaşımında temel amaç, ölçülebilir, izlenebilir ve kontrol edilebilir bir sistem oluşturmaktır (Şekil 3). Bu bölgelerde giriş hacimleri düzenli ölçülmekte, sınırlı sayıdaki abonelerin tüketimleri okunmakta, minimum gece debisi izlenerek potansiyel önlenebilir sızıntı hacmi belirlenmekte, akustik yöntemlerle sızıntıların yeri belirlenerek onarılmakta ve sistem bileşenleri sürekli ve düzenli olarak izlenmektedir. İzole ölçüm

bölgelerinde sızıntıların ve diğer kayıpların daha kısa sürede farkına varılması ve önlenmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3. Dağıtım sisteminde uygulanan izole ölçüm bölgelerinin yerleşimi (KASKİ, 2021)

İzole ölçüm bölge planlama ve tasarım, dağıtım sisteminde CBS şebeke planı üzerinde izole ölçüm bölgelerinin taslak sınırlarının ve büyüklüklerinin belirlenmesi, izolasyon vana sayısı ve yerlerinin plan üzerinde tanımlanması, bölge giriş noktalarının yeri ve sayısının şebeke planına göre belirlenmesi, ölçüm ekipmanlarının sayısı, yeri ve özelliklerinin tanımlanması çalışmalarını ifade etmektedir (Şekil 4) (Pearson, 2019). Özellikle CBS şebeke ve vana veri tabanı güncel olan, beslenim hatları düzenli olan ve imar planına göre cadde sokak yerleşimleri düzenli olan dağıtım sistemlerinde planlama ve tasarım daha kolay olmaktadır.

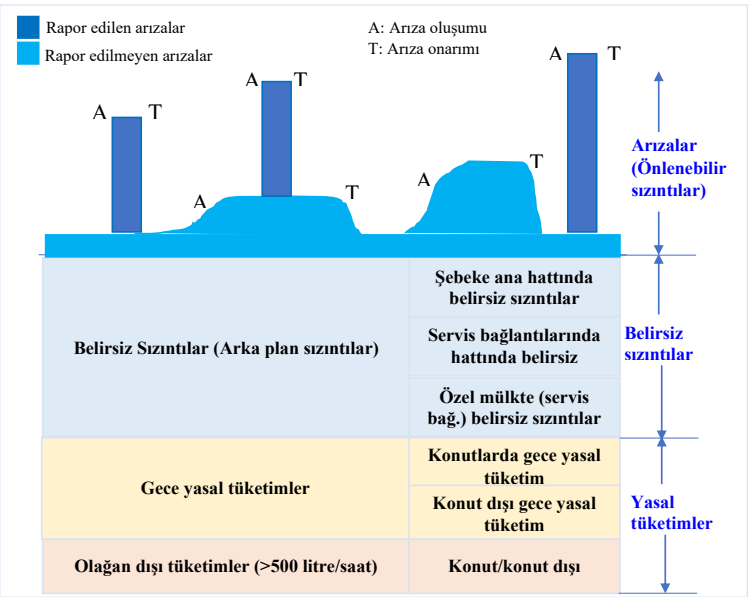


Şekil 4. İzole ölçüm bölgelerinin planlanması ve bileşenleri (Di Nardo vd., 2013)

Dağıtım sistemlerinde planlanan izole ölçüm bölgelerinin sahada uygulanması zaman alıcı ve maliyetlidir. *İzole ölçüm bölgesinin sahada uygulanması*, dağıtım sisteminde planlanan ve tasarımı yapılan izole ölçüm bölgesinin giriş odasının, izolasyon çalışmalarının, veri ölçüm ve izleme ekipmanlarının sahada yapılan çalışmalar ile tamamlanmasını ve işletmeye hazır hale getirilmesini ifade etmektedir (Şekil 5). Bu kapsamda giriş odasının yapımı, ekipmanların yerleştirilmesi, hidrolik verilerin izlenmesi için SCADA sistemine entegre edilmesi, izolasyon vanalarının belirlenmesi ve kapatılması, sıfır basınç testinin uygulanması gibi çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

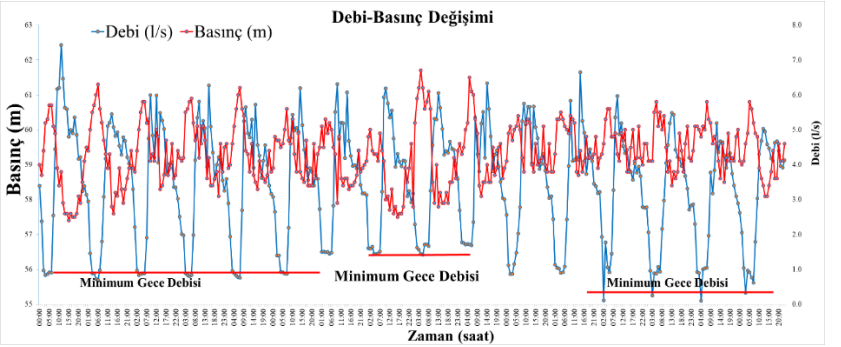
Şekil 5. İzole ölçüm bölgeleri için saha uygulamaları (KASKİ, 2021)

Dağıtım sisteminde planlanan ve sahada uygulanan izole ölçüm bölgelerinin giriş noktalarına yerleştirilen debimetre ile sisteme giren debiler 24 saat boyunca izlenmektedir. Debimetre okumalarına göre sızıntı analizi yapılmaktadır. Sızıntıların etkin yönetiminde gece debisinin izlenmesi en etkin araçlardan biridir. *Minimum gece debisi*, izole ölçüm bölgelerinde gece tüketiminin en az olduğu saatlerde (genelde gece 02:00-04:00 arası) bölge girişinde debimetre ile ölçülen debiyi ifade etmektedir. Bu debi gece yasal tüketimleri (konut ve/veya konut dışı), belirsiz sızıntıları ve potansiyel önlenebilir sızıntıları içermektedir (Şekil 6).



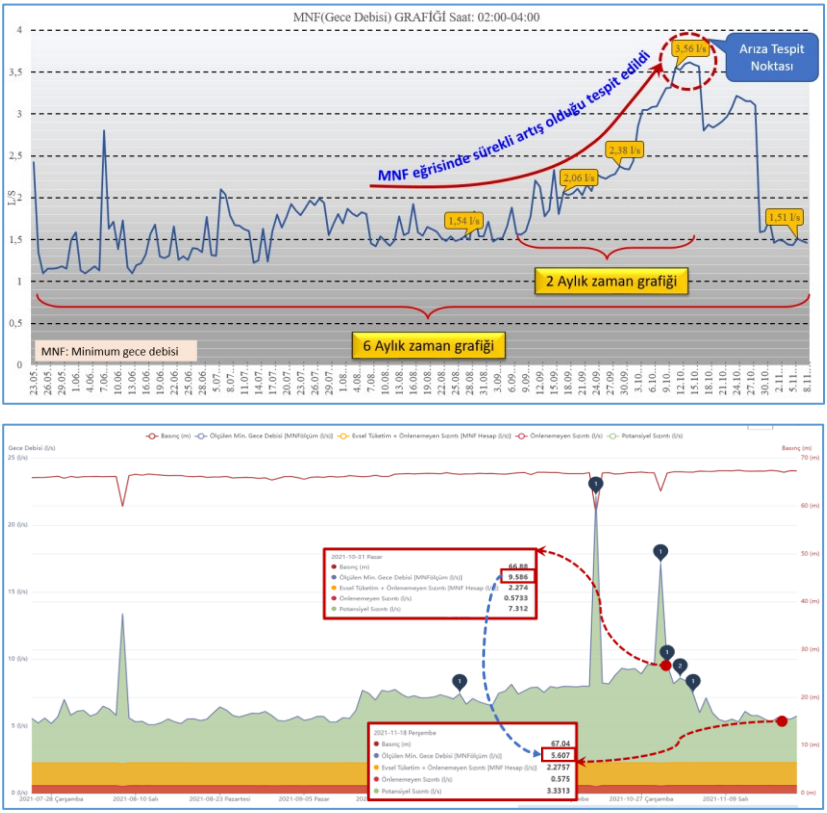
Şekil 6. İzole ölçüm bölgelerinde gece saatlerinde ölçülen debinin alt bileşenleri (Farley vd., 2008; Pearson, 2019)

Minimum gece debisinin sağladığı en temel fayda sızıntıların kısa sürede fark edilmesidir. Bunun için her bir izole ölçüm bölgesinde debi değişiminin ve MNF değişiminin düzenli izlenmesi gerekmektedir. *Gece debisinin izlenmesi*, bir dağıtım sisteminde su kayıplarının kontrolü ve tespit edilmesi amacıyla uygulanan esas yöntemlerden biridir (Şekil 7).



Şekil 7. İzole ölçüm bölgesinde basınç ve debi değişimi (MASKİ, 2021)

Sürekli beslenen bir dağıtım sisteminde, tüketimin en düşük seviyede olduğu gece saatlerinde sızıntılar en doğru şekilde izlenmekte ve hesaplanmaktadır. Bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilir olması için öncelikli olarak sınırları izole edilmiş bölgelerin tanımlanmış olması gerekir. *Sızıntının farkına varılması*, dağıtım sistemlerinde veya izole ölçüm bölgelerinde rapor edilmeyen sızıntıların varlığının anlaşılmasını ifade etmektedir (Şekil 8). Rapor edilen sızıntılar zemin yüzeyine çıktığı için kısa sürede farkına varılmakta ve yeri bilinmektedir. Ancak rapor edilmeyen sızıntılar zemin yüzeyine çıkmadığı için farkına varılması oldukça güçtür. Bunun için aktif sızıntı kontrolü yöntemi uygulanmalıdır. İzole ölçüm bölgesinde MNF analizi yapılarak toplam sızıntıların farkına varılması ve bunların alt bileşenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Farkına varılmayan sızıntıların yerinin tespiti ve önlenmesi mümkün değildir.



Şekil 8. İzole ölçüm bölgelerinde MNF değişimi ve sızıntının farkına varılması (KASKİ, 2021)

İzole ölçüm bölgelerinde gece saatlerinde ölçülen debinin alt bileşenlerinin belirlenmesi için MNF analizi yapılmaktadır. *Minimum gece debisi analizi*, izole ölçüm bölgelerinde, gece yasal tüketimlerin ve belirsiz sızıntıların hesaplanmasını, toplam sızıntıların belirlenmesini ve potansiyel önlenebilir sızıntıların belirlenmesini kapsamaktadır (Şekil 8). İzole ölçüm bölge girişinde debimetre ile ölçülen minimum gece debisi değerinden gece yasal tüketimlerin çıkarılması ile potansiyel önlenebilir sızıntılar hesaplanmaktadır. Böylece, bölgede yüzeye çıkmayan sızıntıların farkına varılması (yüzeye çıkmayan ancak tespit edilebilir-önlenebilir sızıntılar), aktif sızıntı kontrolü ve diğer sızıntı tespit ve

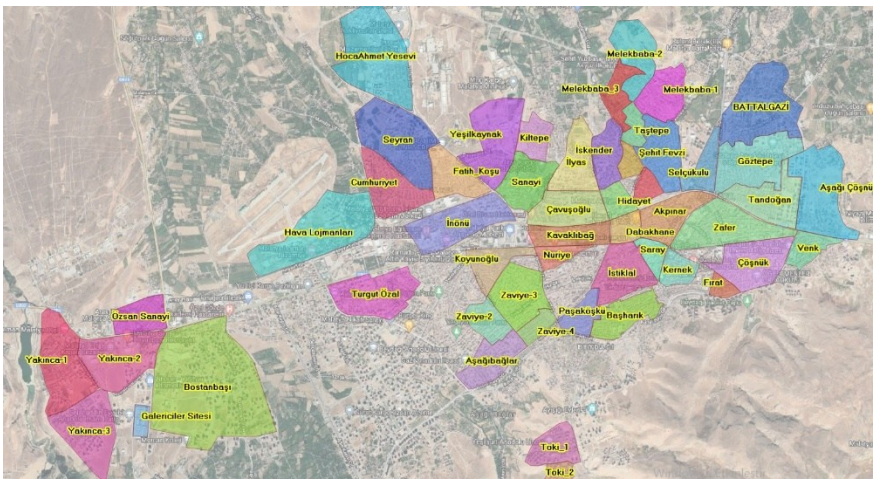
önleme stratejilerinin önceliklendirilmesi, sızıntılardaki değişimlerin izlenmesi (özellikle önleme faaliyetleri uygulandıktan sonraki değişimler) ve yüzeye çıkmayan kayıp hacimlerinin zamanla azaltılması mümkün olmaktadır. İzole ölçüm bölgelerinde aktif sızıntı kontrolünde farkına varılan rapor edilmeyen arızaların yerinin tespit edilmesi ve onarılması gerekmektedir. *Sızıntı yeri tespiti*, izole ölçüm bölgelerinde MNF analizi ile farkına varılan potansiyel önlenebilir sızıntıların şebekedeki yerinin (sokak bazlı hangi boruda olduğunu) tespitini ifade etmektedir. Sızıntı yerinin tespit edilmesi için lokal, bölgesel ve anlık izleme sistemleri kullanılmaktadır (Şekil 9). Sızıntı yerinin tespiti, sızıntı hacminin azaltılması ve su verimliliğinin sağlanması için oldukça önemlidir.

Şekil 9. İzole ölçüm bölgelerinde sızıntı yerinin belirlenmesi (MASKİ, 2017)

3. Aktif Sızıntı Kontrolünün Uygulanması ve Kazanımlar

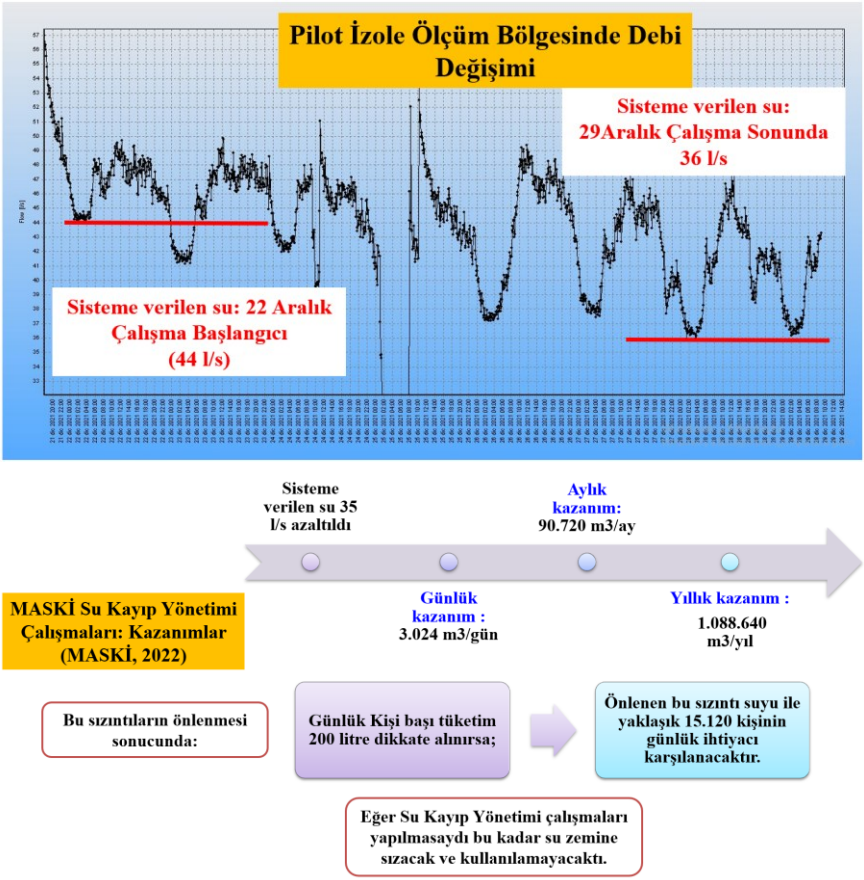
Değişen iklim koşulları, su kaynakları üzerindeki baskılar (kaynak kapasitesinin azalması, kirlilik), artan nüfus ve talep debisi ve kentleşme idarelerde sızıntı kontrolü ve yönetimi çalışmalarını

zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda idareler farklı düzeylerde çalışmaları gerçekleştirmektedir. Bu bölümde iki farklı idarede (Malatya MASKİ, Kayseri KASKİ) yapılan aktif sızıntı kontrolü çalışmaları uygulanmıştır. Bu çalışmaların detayları ve elde edilen kazanımlar tartışılmıştır. Malatya MASKİ Genel Müdürlüğü tarafından sızıntı yönetimi kapsamında izole ölçüm bölgeleri planlanarak sahada uygulanmıştır (MASKİ, 2022). Bu çalışmalar kapsamında toplam 53 izole bölge sayısal şebeke planına göre tasarlanmıştır (Şekil 10). İzole bölge tasarımı ve uygulaması zaman alan süreç olduğu için gerçekçi hedefler konularak çalışmalar planlanmıştır.



Şekil 10. Malatya merkez dağıtım sisteminde izole ölçüm bölgelerinin uygulanması (MASKİ, 2022)

İzole ölçüm bölgelerinde giriş debilerinin düzenli ölçülmesi ve SCADA ile yönetilmesi, sahada abonelerin denetimi-güncellenmesi-kayıtsız abonelerin tespiti, şebeke verilerinin sahaya göre güncellenmesi, yüzeye çıkmayan sızıntı miktarının ve yerinin belirlenmesi ve sızıntıların onarılması ve su tasarrufunun sağlanması hedeflenmiştir. Sahada yapılan çalışmalarda belirli bir zaman aralığında sadece 5 izole ölçüm bölgesinde elde edilen kazanımlar hesaplanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. İzole ölçüm bölgelerinde aktif sızıntı kontrolü ile elde edilen kazanımlar (MASKİ, 2022)

Su kayıp yönetimi çalışmaları ile sisteme verilen su 35 l/s azaltılarak günlük 3.024 m^3, aylık 90.720 m^3 ve yılda 1.088.640 m^3 kazanım olduğu görülmüştür. Günlük kişi başı tüketimin 200 litre olduğu varsayıldığında önlenen bu sızıntı hacminin yaklaşık 15.120 kişinin günlük su ihtiyacını karşılayacağı görülmektedir. Şebekelerdeki sızıntıların tespit edilmesi ve önlenmesi ile su kaynaklarının korunması ve suyun sürdürülebilirliğinin sağlanmasının yanı sıra suyun üretimi, arıtılması, taşınması, pompa ile iletilmesi gibi birçok aşamada ekonomik kazanımlar da

sağlamaktadır. GGS'nin azalması ile artan gelirler ve azalan enerji, rehabilitasyon, bakım-onarım faaliyetleri ile ekonomik anlamda sürdürülebilirliği sağlaması bakımından Su İdareleri için önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Kentsel altyapı sistemlerindeki su kayıpları, dünya çapında Su İdareleri için hem temiz, kaliteli suya sürdürülebilir erişimi hem de kamu hizmetlerinin finansal uygulanabilirliğini etkileyen önemli zorlukları oluşturmaktadır. Su İdarelerinin hizmet kalitesi su kesintilerinin sıklığı, şebekedeki belirsiz sızıntı miktarı gibi konularla ilişkilidir. Bu tür sorunlar şebeke borularında basınç düşüşlerine yol açmakta ve bu da abonelerin su talebini yeterli şekilde karşılamasına engel olmaktadır. Su iletim ve dağıtım sistemlerinde oluşan sızıntıların sonuçları sızıntı miktarı ile orantılıdır. Bu nedenle sızıntıları kontrol altına almak için hızlı bir şekilde tespit edilmesi ve yerinin belirlenmesi gerekmektedir. Şebekeleri izlemek ve sızıntı bileşenlerinin etkilerini azaltmak amacıyla sızıntı tespit sistemleri oluşturulmalıdır. Bu çalışmada su iletim ve dağıtım sistemlerinde etkin sızıntı yönetimini sağlamak amacıyla uygulanan temel yöntemler ve elde edilen kazanımlar örnek saha çalışmaları ile desteklenerek açıklanmıştır. Çalışmada KASKİ ve MASKİ idarelerinde uygulanan aktif sızıntı kontrolü çalışmaları incelenmiş ve çalışma sonucunda elde edilen kazanımlar tartışılmıştır. Malatya'da sızıntıların kontrol altına alınması ve yönetilebilmesi amacıyla toplam 53 izole bölge sayısal şebeke planına göre tasarlanmıştır. Belirli bir zaman aralığında yapılan saha çalışmasına göre 5 izole bölgede elde edilen kazanımlar incelendiğinde sistem giriş hacminde 35 l/s azalma olduğu ve bu kazanımın yılda 1.088.640 m^3 su hacmine tekabül ettiği görülmektedir.

Bulgular, su idarelerinin su kayıp yönetimindeki performansını değerlendirmek ve kıyaslamak, kayıpları azaltmayı ve operasyonel verimliliği artırmayı amaçlayan politika kararlarını belirleyebilmek için ölçümler sağlamaktadır. Çalışmalardan elde

edilen kazanımlar Su İdarelerinde su kayıp yönetimi ve finansal performans ile ilgili literatüre katkıda bulunarak, politika yapıcılar, su idareleri yöneticileri ve paydaşlara finansal sürdürülebilirliği geliştirmek ve su kayıplarını azaltmak için rehberlik edecektir.

Kaynaklar

Agathokleous A. & Christodoulou S. 2017 Component-holistic condition assessment of water distribution networks. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA, 64(7), 509–519.

Avrupa Komisyonu (2014) LEAKCURE project, focus on reducing urban water leakage. http://cordis.europa.eu/news/rcn/36134_en.html. Access 3 May 2021.

Bosco, C., Campisano, A., Modica, C., & Pezzinga, G. (2020). Application of rehabilitation and active pressure control strategies for leakage reduction in a case-study network. *Water (Switzerland)*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/w12082215

Bozkurt, C. (2022). *Su Kayıp Yönetimi Ve Kontrolü İçin Optimizasyon Tabanlı En Uygun Strateji Modelinin Geliştirilmesi*. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cabral M, Loureiro D, Almeida M. & Covas D. 2019 Estimation of costs for monitoring urban water and wastewater networks. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, 68(2), 87–97.

Campbell E, Izquierdo J, Montalvo I. & Pérez-García R. 2016 A novel water supply network sectorization methodology based on a complete economic analysis, including uncertainties. Water (Switzerland), 8 (5).

Creaco, E., & Walski, T. (2017). Economic analysis of pressure controlfor leakage and pipe burst reduction. Journal of

Water ResourcesPlanning and Management, 143(12), 04017074. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000846.

Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F., Tzatchkov, V.g., Alcocer-Yamanaka, V.H. (2013) Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths Water Sci. Technol. Water Supply, 13 (2013), 951-957.

Farley, M, G Wyeth, Z B M Ghazali, A Istandar, and S Sigh. 2008. "The Manager's Non-Revenue Water Handbook." A Guide to Understanding Water Losses, Ranhill Utilities Bernhad and USAID, Malaysia.

Ferrari G. & Savic D. 2015 Economic performance of DMAs in water distribution systems. Procedia Engineering, 119 (1), 189–195.

Galiatsatou, P., Ganoulis, P., Malamataris, D., & Prinos, P. (2024). Estimating and Reducing Leakages in the Water Distribution Networks of Small Settlements: The Case of Agios Germanos in the Prespes Municipality. *Water (Switzerland)*, *16*(15). https://doi.org/10.3390/w16152127

Kanakoudis V. & Gonelas K. 2016 Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: from theory to practice. Desalination and Water Treatment, 57 (25), 11436–11446.

Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from

water supply systems. In *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*. https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025

Liemberger R, Wyatt A (2019) Quantifying the global non-revenue water problem. Water Supply, 19(3), 831-837.

Lipiwattanakarn S, Kaewsang S, Pornprommin A. & Wongwiset T. 2019 Real benefits of leak repair and increasing the number of inlets to energy. Water Science&Technology, 14(3), 714–725.

Marchionni V, Cabral M, Amado C. & Covas D. 2016 Estimating water supply infrastructure cost using regression techniques. Journal of Water Resources Planning and Management, 142 (4).

Mathye, R. P., Scholz, M., & Nyende-Byakika, S. (2022). Optimal Pressure Management in Water Distribution Systems: Efficiency Indexes for Volumetric Cost Performance, Consumption and Linear Leakage Measurements. *Water (Switzerland)*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/w14050805

Moslehi, I., Jalili-Ghazizadeh, M., & Yousefi-Khoshqalb, E. (2021). Developing a Framework for Leakage Target Setting in Water Distribution Networks from an Economic Perspective. Structure and Infrastructure Engineering 17(6): 821–37. https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777568

Muhammetoglu A, Nursen C, Karadirek IE. & Muhammetoglu H. 2018 Evaluation of performance and environmental benefits of a full-scale pump as turbine system in

Antalya water distribution network. Water Science & Technology: Water Supply., 18.1, 130–142.

Pearson, D. (2019). Standard Definitions for Water Losses. In *Standard Definitions for Water Losses*. ttps://doi.org/10.2166/9781789060881

Sardinha, J., Serranito, F., Donnelly, A., Marmelo, V., Saraiva, P., Dias, N., Guimarães, R., Morais, D., Rocha, V. (2017). Active Water Loss Control. EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A., Lisbon. 95pp. ISBN 978-989-8490-02-5.

SUEN (2017). Turkey Water Institute 2017 Water Loss Rates Report.

SUEN (2020). Turkey Water Institute 2020 Water Loss Rates Report.

Tian, Y., Gao, J., Chen, J., Xie, J., Que, Q., Munthali, R. M., & Zhang, T. (2023). Optimization of Pressure Management in Water Distribution Systems Based on Pressure-Reducing Valve Control: Evaluation and Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(14). https://doi.org/10.3390/su151411086

Yilmaz, S., Firat, M., Ates, A., & Ozdemir, O. (2021). *Analyzing the Effect of Pressure Management on Infrastructure Leakage Index in Distribution Systems based on Field Data*. 1–15.

Yilmaz, S., Firat, M., & Özdemir, Ö. (2022). Using the Infrastructure Leakage Index (ILI) indicator for effective and sustainable leakage management: importance, advantages and challenges. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *40*(4), 715–723. https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00087.

BÖLÜM XIV

Malzemelerdeki Gözenekliliğin Ses Yutuculuk Performansı Üzerine Bir İnceleme

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU[1]

Giriş

Ses kirliliği modern yaşamın en önemli çevresel sorunlarından biridir. Günümüzde insanlar zamanlarının büyük bir kısmını kapalı mekanlarda geçirmekte ve bu süreçte istenmeyen seslerden olumsuz şekilde etkilenmektedir (Dünya Sağlık Örgütü [WHO], 2018). İstenmeyen sesler, çalışma verimliliği, eğitim ortamlarında gürültülerin, ilgilerinin ve bilgi işleme kapasitelerinin düşmesi ve genel yaşam kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açmasının yanı sıra fiziksel ve zihinsel sağlığa da zarar vermektedir. (Shield ve Dockrell, 2003, Jahncke & ark., 2013). Yapılan çalışmalar, uzun süreli gürültü maruziyetinin işitsel sağlık sorunlarının yanı sıra, uyku bozuklukları, stres seviyesindeki artış ve

[1] Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Yozgat/Türkiye, Orcid: 0000-0003-4077-9779 e.tugce.kocabeyoglu@yobu.edu.tr

maruz kalma gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabileceğini ortaya koymuştur (Basner & ark., 2014).

Kapalı alanlardaki gürültünün azaltılmasını ve akustik sesin arttırılması için çeşitli tasarım ve mühendislik çözümleri sunulmaktadır. Ses yalıtımı, akustik panellerin kullanımı ve yapı malzemelerinin akustik seçeneklerinin uygun şekilde seçilmesi, bu çözümler arasında yer almaktadır (Long, 2014). Kullanılan malzeme seçimi, akustik performansın dağılımı ve kritik unsurlardan biridir. Gözenekli özellikler, ses yutma özellikleri sayesinde ses kontrolü ve akustik düzenleme uygulamaları öne çıkan bir çözüm sunmaktadır (Cox ve D'Antonio, 2009).

Malzeme yapısı, ses yutma performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Farklı yapısal özellikler, sesin malzeme içindeki yayılımını ve sönümlenmesini doğrudan etkilemektedir.

Fiber yapılı malzemeler, yüksek gözeneklilik ve ses yutma özellikleri nedeniyle akustik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında doğal lifler (koyun lifleri, hindistan cevizi, çay lifi ve kenevir lifleri) ve sentetik lifler öne çıkmaktadır (Öz & Köse, 2020).

Özellikle akrilik lifler, yapısı itibariyle diğer liflere göre daha gözenekli yapıya sahip olduğundan, ses absorpsiyonunda üstün performans göstermektedir (Öz & Köse, 2020).

Köpük yapılı malzemeler, içerdikleri hava boşlukları sayesinde etkili ses yutumu sağlarlar. Bu malzemelerin performansı, hücre yapısının açık veya kapalı olmasına göre değişiklik gösterir. Melamin köpükler gibi açık hücreli yapılar, düşük yoğunlukta yüksek ses yutum katsayısına sahiptir (Aksa Akustik, t.y.).

Granüler malzemeler, taneli yapıları sayesinde ses dalgalarının sönümlenmesinde etkili rol oynar. Genişletilmiş kil

agregaları ve vermikülit gibi granüler malzemeler, yüksek ses yutma katsayıları ile karakterize edilir (Arslan & Aktaş, 2018).

Granüler malzemelerde tane boyutu ses yutma performansını önemli ölçüde etkiler. Karakteristik çapı 3.5 mm olan tanelerle hazırlanan örneklerin maksimum ses yutma katsayısı en yüksek değere ulaşırken, tane boyutu arttıkça ses yutma değeri azalmaktadır (Körük, 2020). Ayrıca, 9.5 - 12.5 mm arasındaki tane boyutuna sahip agregalar, 4.75 - 9.5 mm veya 2.36 - 4.75 mm boyutundaki agregalara göre daha düşük ses yutma performansı göstermektedir (Körük, 2020). Metalik köpükler gibi özel granüler yapılar, düşük yoğunluk ve yüksek enerji absorpsiyonu özellikleri sayesinde otomotiv, demiryolu ve havacılık endüstrilerinde tercih edilmektedir (Beköz Üllen & Karabulut, 2020). Bu malzemelerin gözenek oranı %47.8 ile %69.2 arasında değişmekte olup, yoğunlukları 2.41 - 4.07 g/cm³ aralığındadır (Beköz Üllen & Karabulut, 2020).

Gözenekli malzemelerin ses yutuculuk performansı, malzemenin iç yapısı ve gözeneklilik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu konudaki bilimsel araştırmalar, gözeneklilik parametrelerinin optimize edilmesiyle ses yutma performansının önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir. Bu bölümde, gözenekli malzemelerin ses yutuculuk mekanizmaları, gözeneklilik parametrelerinin etkileri ve ölçüm yöntemleri detaylı olarak incelenecektir.

Ses Yutma Mekanizması

Ses dalgalarının gözenekli malzemelerle etkileşimi, karmaşık bir fiziksel süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu etkileşim, malzemenin akustik performansını belirleyen temel mekanizmadır.

Ses dalgası gözenekli bir malzemeyle karşılaştığında, enerjisinin bir kısmı yüzeyden yansırken, diğer kısmı malzemenin iç kısmına nüfuz ederek ilerler (Foam Metal, 2024). Gözenekli malzemelerde çok sayıda birbirine bağlı mikro gözenekler bulunur ve bu gözenekler malzemenin içinde eşit olarak dağılarak dışa doğru açılır (Foam Metal, 2024). Bu yapı, ses dalgalarının malzeme içinde etkili bir şekilde ilerlemesini sağlar.

Ses enerjisinin gözenekli malzemelerde dönüşümü üç temel mekanizma ile gerçekleşir:

- *Viskoz kayıplar:* Ses dalgaları gözenek duvarlarında sürtünmeye uğrayarak ısı enerjisine dönüşür [6]
- *Termal kayıplar:* Hava parçacıklarının titreşimi sonucu ısı alışverişi gerçekleşir (Foam Metal, 2024).
- *Yapısal kayıplar:* Malzeme iskeletinin titreşimi ile enerji sönümlenir (Dahil, Başpınar & Karabulut, 2011).

Gözenekli malzemelerde sönümleme katsayısı gözenek miktarına bağlıdır ve gözenek arttıkça sönümleme artmaktadır (Dahil, Başpınar & Karabulut, 2011). Örneğin, gözenekli magnezyumun sönümleme katsayısı, gözenekli olmayan magnezyuma göre daha yüksektir (Dahil, Başpınar & Karabulut, 2011).

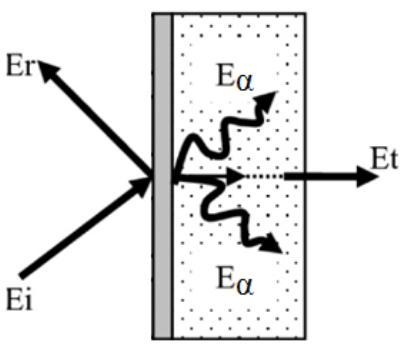
Gözenekli malzemelerin ses yutma performansı frekansa bağlı olarak değişiklik gösterir. Yüksek frekanslı ses dalgaları, gözeneklerdeki hava parçacıklarının titreşimini hızlandırarak ısı alışverişini artırır (Foam Metal, 2024). Bu durum, gözenekli malzemelerin yüksek frekanslarda daha iyi ses yutma özelliği göstermesini sağlar.

Ses yutma mekanizmasının etkinliği, malzemenin yoğunluğu, hava akış direnci ve et kalınlığı gibi parametrelere bağlıdır (Özgül, 2013). Bu parametrelerin optimizasyonu, malzemenin akustik performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Akustik malzemelerin performansını değerlendirmek için kullanılan ölçütler, ses kontrolü ve yalıtım uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Bu ölçütler, malzemelerin ses dalgalarıyla etkileşimini farklı açılardan karakterize eder.

Ses yutma katsayısı

Ses yutma katsayısı (α), bir malzemenin üzerine gelen ses enerjisinin ne kadarını yuttuğunu gösteren temel bir parametredir (Kuttruff, 2006; Gao & ark., 2016; Del Sorbo & ark., 2019).. Bu katsayı 0 ile 1 arasında değişir ve frekansa bağlı olarak farklılık gösterir (Cox & D'Antonio, 2017)



Şekil 2.1. Malzeme üzerine gelen sesin yutum mekanizması

$$E_i = E_r + E_\alpha + E_t$$

$$\alpha = \frac{E_r + E_t}{E_i} = \frac{E_\alpha}{E_i}$$

Burada:

α : ses yutum katsayısı

E_i : ortamdaki ses enerjisi

E_r : yansıyan ses enerjisi

E_α : yutulan ses enerjisi

E_t : iletilen ses enerjisi

ifade etmektedir (Kuttruff, 2006; Gao & ark., 2016; Del Sorbo & ark., 2019).

Malzemelerin ses yutma performansı şu faktörlere bağlıdır:

- Malzeme kalınlığı ve yoğunluğu
- Gözenek yapısı ve dağılımı
- Yüzey özellikleri
- Frekans aralığı

Deneysel çalışmalar, gözenekli malzemelerin 500 Hz'in üzerindeki frekanslarda 30-50 mm kalınlıkta etkili ses yutumu sağladığını göstermiştir (Prima Akustik., t.y.).

Ses iletim kaybı

Ses iletim kaybı (TL), malzemenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine ses enerjisinin geçişi sırasındaki azalmayı ifade eder. Bu parametre, özellikle yalıtım malzemelerinin performansının değerlendirilmesinde kullanılır. Ses iletim kaybının karakteristik

özellikleri, malzeme kütlesi ile doğrudan ilişkilidir ve frekansa bağlı değişim gösterir (DTA, t.y. a).

2.3. Gözeneklilik Parametrelerinin Ses Yutumuna Etkisi

Gözenekli malzemeler, içyapılarında bulunan boşluklar sayesinde benzersiz özellikler sergileyen yapılardır. Bu malzemelerin en temel karakteristiği olan gözeneklilik, malzemenin boşluk hacminin toplam hacmine oranı olarak tanımlanır (Öz & Köse, 2020).

Gözenekli yapıların optimizasyonunda, malzemenin akustik performansını etkileyen temel parametreler sistematik olarak incelenir. Genleştirilmiş perlit kullanılarak yapılan araştırmalar, 1200°C sıcaklıkta işlem gören malzemelerin gözenekli yapısının ses yutucu özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Çalış, 2014).

Deneysel çalışmalar, perlit esaslı kaplamalarda farklı boyutlardaki parçacıkların katmanlar halinde kullanılmasının, geniş frekans aralığında yutum kapasitesini artırdığını ortaya koymuştur (Çalış, 2014).

Malzemelerin gözeneklilik parametreleri, ses yutma performansını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Bu parametrelerin optimize edilmesi, akustik performansın iyileştirilmesinde temel rol oynar.

2.3.1. Gözenek oluşum mekanizması

Gözenekler, oluşum mekanizmalarına göre iki temel gruba ayrılır:

2.3.1.1. Birincil Gözeneklilik

Malzemenin ilk oluşumu sırasında meydana gelen gözeneklerdir. Bu tip gözenekler genellikle malzemenin doğal yapısının bir parçasıdır (Marmatek, 2015).

2.3.1.2. İkincil Gözeneklilik

Malzeme oluştuktan sonra çeşitli süreçler sonucunda ortaya çıkan gözeneklerdir. Bu gözenekler üç alt kategoride incelenir:

- Ögenetik (sığ oluşum)
- Mezogenetik (derin oluşum)
- Telegenetik (gerileyici oluşum) (Marmatek, 2015)

2.3.2. Gözenek boyutu

Gözenek boyutu, bir malzemenin iç yapısındaki boşlukların fiziksel büyüklüğünü tanımlar (Basu & ark., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Zhou & Cheng, 2012; Aslan & Turan 2019). IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) sınıflandırmasına göre, gözenekler boyutlarına göre üç ana kategoriye ayrılır: mikro gözenekler (yarıçapı 1 nm'den küçük), mezo gözenekler (yarıçapı 1-25 nm arası), ve makro gözenekler (yarıçapı 25 nm'den büyük) (Mays, 2007; Yılmaz, 2021). Araştırmalar, gözenek boyutunun gözeneklerin farklı frekanslarda ses yutma özelliklerini etkilediğini göstermiştir (SFFoundry, t.y.).

Farklı gözenek boyutlarının ses yutumu üzerindeki etkisi bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda malzeme seçiminde gözenek yapısının önemi vurgulanmaktadır. Küçük gözenek boyutlarının

yüksek frekanslı ses dalgalarında daha iyi, büyük gözeneklerin ise düşük frekanslı seslerde daha etkili ses yutum performansı gösterdiği gözlemlenmiştir (Kang 2011, De Almeida ve de Lima, 2014; Meyer, 2015; van der Kooij & Van der Veen, 2016). Taş yünü gibi ince yapılı malzemeler yüksek frekanslı sesleri daha etkili bir şekilde absorbe etmektedir. Bu tür malzemelerde, ses dalgaları gözeneklerden geçerken daha fazla sürtünme meydana gelir ve enerji kaybı yaşanır (Kang, 2011). Akustik panellerde kullanılan büyük gözenekli malzemelerde ise düşük frekanslı seslerin yutulması daha etkilidir (Meyer, 2015).

Tablo. 2.1. Yapılan çalışmalardaki gözenek boyutu-ses yutum katsayısı arasındaki ilişki.

Gözenek Türü	Malzeme Türü	Ses Yutum Katsayısı (α)
Mikro Gözenekler (Dasyam & ark., 2022)	Silika Aerojel	0.6-0.9
Mezo Gözenekler (Soltani & ark., 2022)	Granüler Aerojel	0.5-0.8
Makro Gözenekler (Soltani & ark., 2022)	Aluminosilikat Lifler	0.4-0.7

2.3.2.1. Mikro gözenekler

Mikro gözenekler, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından çapı 2 nanometreden daha küçük olan boşluk yapıları olarak tanımlanmıştır.

2.3.2.2. Mezo gözenekler

Mezo gözenekler, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından 2 ile 50 nanometre arasında değişen çapa sahip boşluk yapıları olarak tanımlanmıştır.

2.3.2.3. Makro gözenekler

Makro gözenekler, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından çapı 50 nanometreden büyük olan boşluk yapıları olarak tanımlanmıştır.

2.3.3. Gözenek yapısı (Hücre Formu)

Gözenekli malzemelerin ses yalıtımında, gözenek yapıları önemli rol oynamaktadır (Cox & D'Antonio, 2009). Malzemelerde gözenek yapısı üç temel formda bulunabilir:

a. Sürekli gözenekler (açık gözenekler)

b. İzole gözenekler (kapalı gözenekler)

c. Yarı sürekli gözenekler (açık ve kapalı, karma gözenekler)

Açık gözeneklilik, malzeme dış yüzeyine açık ve birbirleriyle bağlantılı gözenek hacminin, malzemenin toplam hacmine oranını ifade eder (Meriç, Tavukçuoğlu & Çalışkan, 2014; Aslan & Turan 2019). Gözeneklerin açık olması ses dalgalarının malzemeye nüfuz etmesine ve enerjiyi dağıtmasına olanak tanır (Cox & D'Antonio, 2009). Deneysel çalışmalar, açık gözenekliliğin artmasıyla maksimum ses yutum katsayısının yükseldiğini göstermiştir (Meriç, Tavukçuoğlu & Çalışkan, 2014). Kapalı gözeneklilik de ise gözenekler izole edilmiştir ve malzemenin sesi emme kapasitesini sınırlı tutar (Kuttruff, 2009). Açık hücreli gözenekli yapıların kapalı hücreli yapılara göre ses yutma kapasitelerinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Aslan & Turan 2019).

a. Sürekli Gözenek (Açık Gözenek)

Sürekli gözenekler, ses dalgalarının malzemesinin içine girmesine ve malzemenin içindeki duvarlarıyla etkileşime girerek enerjisini kaybetmesine izin verir. Sürekli gözenek yapısı ses dalgalarını içeri alır, ses enerjisini arttırır ve viskoz kayıplarla sesi

yutarak, sesin zayıflamasını sağlar. Açık gözenekler ses yalıtımında genellikle akustik paneller, duvar kaplamalarında kullanılır (Kropp, 2011).

b. İzole Gözenek (Kapalı Gözenek)

Kapalı gözenek, ses dalgalarının malzemenin içine girişini engeller ve böylece sesin büyümesini arttırır. Bu tür gözenekler, genellikle ses iletim kaybını artırmak için kullanılır. Açık gözenekler hava akışına ve ses dalgalarına karşı direnç gösterir, bu da onları genellikle inşaat sektöründe ses kalitesi için vazgeçilmez olarak sunar (Kuttruff, 2007).

c. Karma Gözenek (Açık ve Kapalı Gözeneklerin Kombinasyonu)

Karma gözenekler, hem açık hem de kapalı gözenek formunu bir arada bulundurur. Karma yapıdaki gözenekler, geniş bir ses frekans aralığı ve ses yutumu sağlayarak, hem ses iletim kaybı hem devses yutumunu optimize edebilir (Bies ve Hansen, 2009).

2.3.4. Gözenek bağlantı yapısı

Gözenek bağlantı yapısı, yapı faktörü (structure factor, ks) olarak adlandırılan parametre ile karakterize edilir (Meriç, Tavukçuoğlu & Çalışkan, 2014). Bu yapının önemli bir özelliği olan bükümlülük, malzeme içindeki birbirine bağlı gözeneklerin oluşturduğu ses yayılım kanallarının uzunluğunun malzeme kalınlığına oranıdır (Meriç, Tavukçuoğlu & Çalışkan, 2014).

2.3.5. Akış direnci

Yapı içerisine giren havanın karşılaştığı dirençtir. Gözenekliliğin artmasıyla akış direncinin düşmesi, ses yutma performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, optimum

performans için gözeneklilik parametrelerinin dengeli bir şekilde tasarlanması gerekmektedir (Aslan & Turan 2019).

2.4. Gözeneklilik ölçüm yöntemleri

Gözeneklilik karakterizasyonunda çeşitli modern teknikler kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemler şunlardır:

a. **BET (Brunauer-Emmett-Teller) Analizi**: 77 K sıcaklıkta azot adsorpsiyonu tekniğiyle yüzey alanı ve gözeneklilik ölçümü yapılır (Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarları., t.y.).
b. **Cıva Porozimetresi**: Düşük ve yüksek basınç altında gözenek boyut dağılımı ve toplam porozite ölçümleri gerçekleştirilir (Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarları., t.y.).
c. **Helyum Piknometresi**: Malzemelerin gerçek yoğunluğunu ve gözenek hacmini belirlemede kullanılır (Bayazıt, O., & Bayazıt, N. 2024).

Bu ölçüm teknikleri, malzemelerin gözenek karakterizasyonunu farklı basınç ve sıcaklık koşullarında inceleme imkanı sağlar. Özellikle yüzey alanı, gözenek boyut dağılımı ve toplam gözenek hacmi gibi parametrelerin belirlenmesinde kullanılır (Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, ArtMer Laboratuvarı. t.y.).

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE MODELLEME YÖNTEMLERİ

Akustik malzemelerin karakterizasyonu, standartlaştırılmış test yöntemleri ve özel ölçüm sistemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu testler, malzemelerin ses yutma ve iletim özelliklerinin belirlenmesinde kritik rol oynar.

3.1. Akustik Ölçüm Yöntemleri

3.1.1. Empedans tüpü ölçümleri

Empedans tüpü, malzemelerin akustik özelliklerini belirlemede kullanılan temel test sistemlerinden biridir. Modern empedans tüpü sistemleri, 50-5700 Hz frekans aralığında ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybı değerlerini tek bir numune üzerinden ölçebilmektedir (DTA, t.y. b). Sistem, aşağıdaki temel bileşenlerden oluşur:

- İki farklı çapta ölçüm tüpü (100mm ve 29mm)
- Faz uyumlu ölçüm mikrofonları
- Ses kalibratörü
- 25W ses güç yükselticisi (BİAS, t.y.).

Test prosedürü, ISO 10534-2 ve ASTM E1050 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Ölçümler sırasında, numuneye etkiyen ve numuneden yansıyan ses dalgaları ölçülerek yüzey empedansından yutum katsayısı hesaplanır (Marmatek, 2015).

3.1.2. Çınlama odası testleri

Çınlama odaları, makina ve ekipmanların ses gücü düzeyi belgelendirme testleri için özel olarak tasarlanmış ortamlardır (Dilmen, t.y.). Bu test ortamları iki ana kategoride incelenir:

***Standart Çınlama Odaları**:*

- ISO 354 standardına uygun tasarım
- Geniş frekans aralığında ölçüm imkanı
- Yüksek hassasiyetli sonuçlar

***Mini Çınlama Kabinleri**:*

- 400-10000 Hz frekans aralığında ölçüm
- ISO 354 standardına uygun sonuçlar
- Otomotiv uygulamaları için özel tasarım (DTA, t.y. c).

3.2. Sayısal Modelleme Yaklaşımları

Sayısal modelleme yaklaşımları, gözenekli malzemelerin akustik performansının tahmininde ve optimizasyonunda güçlü araçlar sunmaktadır. Modern bilgisayar teknolojileri ve gelişmiş yazılımlar, karmaşık akustik sistemlerin analizini mümkün kılmaktadır.

Akustik modelleme, ses dalgalarının gözenekli malzemelerle etkileşimini matematiksel olarak tanımlar. Delany-Bazley, Qunli, Miki, Mechel, Allard ve Champoux gibi araştırmacılar tarafından geliştirilen empedans tahmin yöntemleri, malzemelerin akustik davranışını karakterize etmek için kullanılmaktadır (Can, 2018). Bu modellerde temel parametreler: akış direnci, malzeme kalınlığı, gözeneklilik oranı, yapısal faktörlerdir.

Karşılaştırmalı çalışmalar, Allard ve Champoux modelinin en yüksek tahmin doğruluğuna ulaştığını göstermiştir (Can, 2018).

Gözenekli ortamların modellenmesinde, malzemenin makroskopik özellikleri temel alınır. Comet Trim gibi özel akustik malzeme modelleme yazılımları, tek ve çok katmanlı gözenekli malzemelerin ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Vidinlimen, 2010).

Yapılan çalışmalar, modelleme sonuçlarının empedans tüpü test sonuçlarıyla karşılaştırıldığında mühendislik açısından yeterli yakınsaklığı sağladığını göstermiştir (Vidinlimen, 2010).

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), akustik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan güçlü bir sayısal analiz tekniğidir. ANSYS gibi ticari yazılımlar, empedans tüpü ölçümlerinin simülasyonunda kullanılmaktadır (Arslan & Çalışkan, 2017).

Sonlu elemanlar analizinde, gözenekli malzemeler için Miki modeli tercih edilmektedir. Test sonuçlarıyla yapılan karşılaştırmalar, sayısal modelin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini göstermiştir (Arslan & Çalışkan, 2017). Özellikle 13885 $N.s/m^4$ akış direnci değeri atanan 50 mm'lik numunelerde mükemmel seviyede uyum elde edilmiştir (Vidinlimen, 2010).

Sayısal yaklaşımlar, özellikle otomotiv sektöründe kabin içi gürültü ve titreşimin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır (Vidinlimen, 2010). Malzeme özelliklerinin çokluğu ve test süreçlerinin uzunluğu gibi zorluklar, sayısal modelleme teknikleriyle aşılabilmektedir.

Çok katmanlı akustik paneller, farklı malzemelerin avantajlarını birleştirerek optimize edilmiş ses yutum performansı sağlar. Modern tasarım yaklaşımları, Cantor ve Fibonacci serilerine dayalı yenilikçi katman düzenlemeleri sunmaktadır (Kaya, 2022). Bu yapıların karakteristik özellikleri:

Akustik tasarım, mekanın fonksiyonuna ve kullanım amacına göre özelleştirilmelidir. Mimari akustik projelerde, fonksiyona göre en ideal akustik şartların sağlanması hedeflenir (Dünya Sağlık Örgütü - WHO, 2018).

Modern tasarım yaklaşımları, simülasyon ve programlama araçlarını kullanarak optimum çözümler sunar. Bu süreçte:

- Akustik konfor gereksinimleri

- İklimlendirme entegrasyonu
- Aydınlatma sistemleri
- Enerji verimliliği

gibi parametreler bütünsel olarak değerlendirilir (Bayazıt, O., & Bayazıt, N. 2024). Özellikle havalimanı terminalleri, oteller ve konutlar gibi farklı fonksiyonlara sahip mekanlarda, akustik konforun sağlanması için özel tasarım çözümleri geliştirilir (Dünya Sağlık Örgütü - WHO, 2018).

SONUÇ

Gözenekli malzemelerin ses yutuculuk performansı, malzeme yapısı ve gözeneklilik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bilimsel araştırmalar ve deneysel çalışmalar, gözeneklilik parametrelerinin optimize edilmesiyle ses yutma performansının önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir.

Fiber yapılı, köpük yapılı ve granüler malzemeler, farklı gözenek yapıları sayesinde çeşitli akustik uygulamalarda etkili çözümler sunmaktadır. Modern karakterizasyon teknikleri ve sayısal modelleme yaklaşımları, malzemelerin akustik özelliklerinin detaylı analizine ve optimizasyonuna imkan sağlamaktadır.

Gözenekli malzemelerin ses kontrolündeki rolü, sürdürülebilir ve konforlu yaşam alanları oluşturmada kritik öneme sahiptir. Teknolojik gelişmeler ve artan çevresel farkındalık, gözenekli malzemelerin akustik performansının daha da iyileştirilmesi için yeni fırsatlar sunmaktadır. Malzeme bilimi ve akustik mühendisliği alanlarındaki ilerlemeler, gelecekte daha etkili ses kontrol çözümlerinin geliştirilmesine öncülük edecektir.

KAYNAKÇA

Aksa Akustik. (t.y.). Melamin akustik köpük. Aksa Akustik. https://www.aksaakustik.com/melamin-akustik-kopuk/

Arslan, E., & Çalışkan, M. (2017, 14-15 Eylül). Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayıları için ampirik ve sayısal yöntemlerle tahmin. In *12. Ulusal Akustik Kongresi ve Sergisi*. İzmir, Türkiye: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Arslan, M. A., & Aktaş, M. (2018). İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 299-320. https://doi.org/10.2339/politeknik.407257

Aslan, R., & Turan, O. (2019). Bağlayıcı püskürtme tekniği ile üretilmiş gözenekli alçı yapıların ses yutma katsayılarının incelenmesi. In *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*. Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Gürültünün sağlık üzerindeki işitsel ve işitsel olmayan etkileri. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332.

Bayazıt, O., & Bayazıt, N. (2024). Konsept projeler. Oğuz Bayazıt. https://oguzbayazit.com.tr/?lng=tr&p=blog_detay&id=31

Beköz Üllen, N., & Karabulut, G. (2020, 07-09 Ekim). Gözenekli metalik malzeme üretiminde gözenek oranı ve küresellik arası ilişkinin incelenmesi. In *2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2020)*. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye. https://www.EurasianSciEnTech.org

BİAS. (t.y.). Testsens empedans tüpü. BİAS. https://bias.com.tr/urun/testolcum/olcum-sistemleri/testsens-empedans-tupu

Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2009). *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. CRC Press.

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, ArtMer Laboratuvarı. (t.y.). Yüzey ve kendi kendine karakterizasyon laboratuvarı. https://artmer.beun.edu.tr/yuzey-ve-gozenek-karakterizasyon-laboratuvari.html

Can, H. (2018). Gözenekli malzemelerin ses yutma katsayılarının deneysel ve sayısal yöntemlerle bulunması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 1-10. https://doi.org/10.25092/baunfbed.429386

Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2005). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. Spon Press; Taylor and Francis. ISBN 0-203-49299-4.

Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. Spon Press.

Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2017). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. CRC Press. https://www.crcpress.com/Sound-Absorption-Materials/Antonio-Cox/p/book/9780415429161

Çalış, M. (2014). Betonarme gürültü bariyerleri için ses yutucu perlit esaslı kaplama tasarımı yapılarak fiziksel performansının ve maliyetinin araştırılması (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Programı).

Dahil, L., Başpınar, S., & Karabulut, A. (2011). Gözenekli malzemelerin sönümlemeye etkisi. *AKÜ-FEBİD*, 11, 015701(1-7).

Dasyam, A., Xue, Y., Bolton, J. S., & Sharma, B. (2022). Effect of particle size on sound absorption behavior of granular aerogel agglomerates. *Journal of Sound and Vibration.* Retrieved fromhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309322005373

De Almeida, M. F. P., De Oliveira, A. A. F., & De Lima, R. A. (2014). *Influence of Pore Size on the Acoustic Properties of Porous Materials*. Materials Science and Engineering.

Del Sorbo, G., Martellotta, F., & Ricciardi, P. (2019). Acoustic characterization of porous materials using impedance tube measurements and pore size distribution. *Materials & Design, 179*, 107937. https:/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107937

Dilmen, H. (t.y.). Akustik ölçüm odaları ve endüstriyel kullanımları. TÜBİTAK UME. https://www.ume.tubitak.gov.tr/sites/images/ume/akustik_olcum_odalari_ve_endustriyel_kullanimlari-h.dilmen.pdf

DTA. (t.y. a). DTA akustik malzeme test sistemleri. DTA. https://www.dta.com.tr/dta_akustik_malzeme_test_sistemleri.html

DTA. (t.y. b). DTA empedans tüpü ölçüm sistemi. DTA. https://www.dta.com.tr/dta_empedans_tupu_olcum_sistemi.html

DTA. (t.y. c). Ses yutum katsayısı. DTA. https://www.dta.com.tr/test_merkezi_ses_yutum_katsayisi.html

Dünya Sağlık Örgütü (WHO). (2018). Avrupa bölgesi için çevresel gürültü yönergeleri. WHO Avrupa Bölge Ofisi.

Foam Metal. (2024, 10 Aralık). Development of porous sound absorbing material. *Foam Metal News*. https://tr.foam-metal.net/news/development-of-porous-sound-absorbing-material-55986995.html

Gao, Q., Shen, W., Zhou, C., Zheng, W., & Wang, L. (2016). Optimization of porous materials for sound absorption and noise control. *Construction and Building Materials, 122*, 1 https://d.org/10.1016//j.conbuildmat.2016.03.086

Jahncke, H., Hygge, S., Halin, N., Green, A. M., & Dimberg, K. (2013). Açık ofis gürültüsü: Bilişsel performans ve restorasyon. *Çevresel Psikoloji Dergisi*, 33, 30-40.

Kaya, İ. (2022). Sualtı uygulamaları için çok katmanlı akustik yüzey tasarımı (Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı). https://openaccess.hacettepe.edu.tr/xmlui/handle/11655/26046?show=full&locale-attribute=en

Kılavuz Ses Yalıtımı. (2023). Ses emilimi. Kılavuz Ses Yalıtımı. https://www.kilavuzsesyalitimi.com/wp-content/uploads/2023/03/Ses-Emilimi-2.pdf

Körük, H. (2020). Biyomalzemelerin akustik ve mekanik özelliklerinin araştırılması (Proje No: 119M115). TÜBİTAK.

Long, M. (2014). *Mimari akustik*. Akademik Basın.

Kropp, W. (2011). *Sound Insulation*. Springer.

Kuttruff, H. (2006). *Room acoustics* (5thttps://doi.or/1/978-3-540-92706-8

Kuttruff, H. (2007). *Room Acoustics*. Taylor & Francis

Marmatek. (2015, 23 Mart). Akustik empedans tüpü (Kundt tüpü). https://marmatek.co/2015/03/23/akustik-emped-tupu-kundtlar-tüp/

Mays, T. (2007). A new classification of pore sizes. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 160, 57-62. https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80009-7

Meriç, I., Tavukçuoğlu, A., & Çalışkan, M. (2014, 13-14 Mart). Malzemelerin mikro yapı özelliklerinin akustik performansa etkisi: Gözeneklilik yapısı ile ses yutma özellikleri arasındaki ilişki. *1. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi* (s. 1-7). ODTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.

Öz, H. M., & Köse, E. (2020). Bileşenin akustik bileşenlerinin performans düzeyinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 1-10. https://doi.org/10.31590/ejosat.679628

Özgül, V. (2013, 7 Ekim). Ses yalıtım ve ses yutumu hesaplama yazılımları. *Yalitim.net*, 115(Ekim 2013). https://www.yalitim.net/yayin/475/ses-yalitim-ve-ses-yutumu-hesaplama-yazilimlari_14006.html

Prima Akustik. (t.y.). Ses akustiği. Prima Akustik. https://primaakustik.com/blog-ses-akustigi-48

Seçgin, A., Kara, M., İhtiyaroğlu, Y., & Ozankan, A. (2017, 5-7 Temmuz). Empedans tüpü ile malzemelerin farklı geliş açılarındaki ses yutma katsayısının belirlenmesi. In *18. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*. Trabzon, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi.

SFFoundry. (t.y.). Porous materials nedir? SFFoundry Material. https://tr.sffoundrymaterial.com/info/what-are-porous-materials-80100721.html

Shield, B. M., & Dockrell, J. E. (2003). Okuldaki çocuklar üzerindeki gürültünün etkileri: Bir inceleme. *Bina Akustiği*, 10(2), 97-116.

Soltani, P., Mirzaei, R., & Samaei, E. (2022). Sound absorption characteristics of aluminosilicate fibers. *International Journal of Environmental Science and Technology.* Retrieved from https://www.academia.edu/download/86255842/13762_2022_4229_OnlinePDF.pdf

Van der Kooij, H. J. K., & van der Veen, J. D. (2016). *Acoustic Absorption of Porous Materials: A Review*. Journal of Building Physics.

Vidinlimen, G. T. (2010). Otomotiv endüstrisinde kullanılan gözenekli malzemelerin akustik özellikleri ve analizi (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). http://hdl.handle.net/11527/8439

Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarları. (t.y.). Yüzey ve kişisel karakterizasyonu laboratuvarı. https://merkezlab.yildiz.edu.tr/yuzey-ve-gozenek-karakterizasyonu-laboratuvari.html