

DEPREM VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Editör
ATILA KUMBASAROĞLU



BİDGE Yayınları

**DEPREM VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ
YAKLAŞIMLAR**

Editör: ATİLA KUMBASAROGLU

ISBN: 978-625-372-717-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

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.

Güzeltpe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Bu kitap, inşaat mühendisliğinin en kritik alt disiplinlerinden biri olan geoteknik mühendisliği ve deprem mühendisliği alanlarında gerçekleştirilen güncel akademik çalışmaları içermektedir. Kitap kapsamında yer alan bölümler, zemin davranışı, sıvılaşma potansiyeli, sismik izolasyon sistemleri ve demiryolu altyapılarında kayaçların kullanımı gibi çeşitli konulara odaklanmakta ve bu sayede hem kuramsal hem de uygulamalı mühendislik birikimine katkı sağlamaktadır.

Deprem etkisinin yapı ve zemin etkileşimindeki rolünü irdeleyen bu derleme, hem akademisyenler hem de uygulayıcı mühendisler için önemli bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

Kitabın oluşumuna katkı sunan tüm yazarlara, değerlendirme sürecinde emeği geçen hakemlere ve yayına hazırlık aşamasında destek veren yayınevi ekibine teşekkür ederiz.

Doç. Dr. ATİLA KUMBASAROĞLU

ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN SIVILAŞMASI: MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI	1
--	---

BAYRAM ATEŞ

YENİLİKÇİ BİR DEPREM KORUMA YAKLAŞIMI: GEOTEKNİK SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİ	32
--	----

BAYRAM ATEŞ, MOHAMMAD AZİM EİRGASH

SAMSUN VE CİVARINDAKİ BAZI KAYAÇLARIN DEMİRYOLU BALASTI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI	62
--	----

ARİF HİKMET ÇAKOĞLU, FAHRİ BİRİNCİ

BÖLÜM 1

DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİN SIVILAŞMASI: MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Bayram ATEŞ¹

Giriş

Kıtasal levhaların birbirlerine göre hareketi sonucunda, yer kabuğu içerisinde sıkışma ve genleşme gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bu gerilmeler, zamanla yer kabuğunda “fay” olarak adlandırılan zayıf yapı düzlemlerinin oluşumuna neden olur. Bu fay düzlemleri boyunca yer alan kayaç kütleleri, çoğu durumda bu düzlemler boyunca kayarak hareket eder. Ancak bazı durumlarda, kütleler arasındaki sürtünme veya blokaj nedeniyle bu hareket gerçekleşemez. Bu durumda, söz konusu zayıf düzlem boyunca gerilmeler giderek artar ve belirli bir eşik değerinin aşılması durumunda, bu düzlem üzerinde bir kırılma meydana gelir. Kırılmanın gerçekleştiği anda, zayıf düzlem boyunca birikmiş olan elastik enerji ani bir şekilde açığa çıkar ve bu enerji transferi depremleri meydana getirir. Bu ani enerji salımı, sismik dalgalar olarak adlandırılan dalga hareketlerinin oluşumuna neden olur.

¹ Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1251-7053

Sismik dalgalar, kayaç ortam içerisinde yayılarak hem yıkıcı etkilere yol açar hem de yer hareketlerinin gözlemlenmesini sağlar. Bu dalgalar, özelliklerine göre genel olarak cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Atabey, 2000).

Cisim Dalgaları

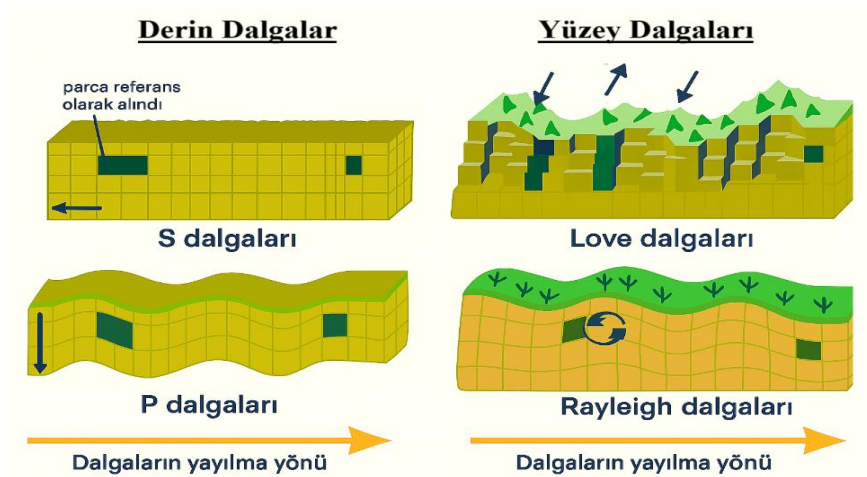
Cisim dalgaları, deprem kaynaklı sismik dalgalar arasında yer almakta olup; birincil (P) dalgalar ve ikincil (S) dalgalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (bkz. Şekil 1). Deprem odağından itibaren yayılan bu dalgalar, farklı fiziksel özelliklere ve yayılım davranışlarına sahiptir. P dalgaları, boylamasına dalga ya da basınç dalgası olarak tanımlanır. Yayılma esnasında, ortamın parçacıklarını dalganın hareket yönünde ileri-geri iterek enerjiyi iletir. Bu yönlü hareket tarzı, bir yayın gerilerek bırakılmasıyla oluşan hareketi andırır. Bu özelliği sayesinde, katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılım gösterebilir. Ayrıca, P dalgaları, sismik kayıt istasyonlarına ulaşan ilk dalga olmaları nedeniyle erken uyarı sistemleri açısından kritik öneme sahiptir. Yayılma hızları, ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak 1,5 km/s ile 8 km/s arasında değişkenlik gösterebilir. S dalgaları ise, enlemesine dalga ya da kayma dalgası olarak bilinir. P dalgalarının yaklaşık yarısı kadar hıza sahiptir ve bu nedenle kayıt istasyonlarına ikinci sırada ulaşır. S dalgaları yalnızca katı ortamlarda yayılabilir; sıvı ve gaz ortamlarda ilerleyemez. Yayılma sırasında, ortamın parçacıklarını dalga yönüne dik doğrultuda; yukarı-aşağı ya da sağa-sola hareket ettirir (Atabey, 2000; Tonaroğlu, 2006). Bu özelliği, özellikle yüzeyde meydana gelen yıkıcı etkilerin başlıca sebebidir. Kayma dalgası hızı (S dalga hızı) (V_s), yer altı zemin ortamlarının dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahip bir parametre olup, deprem mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu parametre sayesinde zeminler; gevşek veya yumuşak, orta sıkı ya da orta katı ve sıkı ile çok katı sınıflandırmalarıyla tanımlanabilmektedir. Yapılan ölçümlerde, saniyede 700 metreyi

aşan hız değerlerine ulaşılan zeminler genellikle kaya ortamı olarak kabul edilmektedir (Tonaroğlu, 2006). Kayma dalgası hızı, doğrudan arazi ölçümleri ile elde edilebilse de bu yöntem her lokasyonda uygulanabilir olmayabilir; özellikle ekonomik ve teknik sınırlamalar sebebiyle bazı bölgelerde ölçüm alınması mümkün olamamaktadır. Bu gibi durumlarda, penetrasyon direnci ile kayma dalgası hızı arasında geliştirilen ampirik ilişkiler büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sayede, sahada yapılacak doğrudan ölçüm sayısı azaltılmakta ve daha yaygın veri üretimi sağlanmaktadır (Hasançebi & Ulusay, 2007). Bu bağlamda, birçok araştırmacı tarafından geliştirilen ampirik modeller aracılığıyla, özellikle Standart Penetrasyon Testi (SPT) sonucu elde edilen N değerleri ile kayma dalgası hızı arasında güçlü korelasyonlar kurulmuştur.

Yüzey Dalgaları

Depremi odak noktasında meydana gelen cisim dalgaları, yüzeye doğru ilerledikçe, yüzeye yakın bölgelerde bulunan gevşek veya yumuşak zemin katmanlarıyla etkileşime girerek yüzey dalgalarını oluşturur (bkz. Şekil1). Yüzey dalgaları, sismik dalgalar arasında en düşük yayılma hızına sahip olan türdür. Ancak buna rağmen, taşıdıkları yüksek genlikli enerji nedeniyle zemin üzerinde yer alan gevşek yapıdaki zemin danelerinde hem düşey hem de yatay yönlü hareketlere yol açarak yapılar üzerinde ciddi hasar riskleri yaratırlar. Bu dalgalar genellikle iki temel başlık altında incelenir: Rayleigh dalgaları ve Love dalgaları. Her iki dalga tipi de yer yüzeyine yakın katmanlarda büyük genlikli salınımlara neden oldukları için, deprem etkilerinin en yıkıcı olanlarını oluştururlar (Tonaroğlu, 2006).

Şekil 1 Sismik dalga türleri



Kaynak: Grotzinger & Jordan, 2010

Sıvılaşıma Kavramı

Depremler sırasında meydana gelen zemin sıvılaşması, özellikle yüzeye yakın konumda yer alan yapı temelleri üzerinde ciddi yapısal hasarlara yol açabilmektedir. Sıvılaşıma, zemin tabakalarında dinamik etkiler, özellikle deprem kaynaklı sarsıntılar sonucunda, gözenek suyu basıncının artmasıyla birlikte zeminin mukavemet, rijitlik ve sıkılık özelliklerinde belirgin bir azalma meydana gelmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Shahir & Pak, 2010; Alpaslan, 2013). Bu durum, özellikle sıkı temellerin oturduğu zeminlerde daha belirgin hale gelmekte ve yapısal sistemin tamamını etkileyebilecek düzeyde deformasyonlara neden olmaktadır. Zemin sıvılaştığında, taşıma kapasitesinde ani bir düşüş meydana gelir; bu da zemin üzerine oturan yapıların ağırlığını artık taşıyamamasına yol açar. Sonuç olarak, yapılar yer değiştirmeye, oturmaya, eğilmeye veya tamamen devrilmeye başlar (bkz. Şekil 2 ve Şekil 3). Yakın geçmişte yaşanan birçok büyük depremin ardından yapılan gözlemler, sıvılaşıma kaynaklı zemin taşıma gücü kaybının, yapıların hasar görmesinde temel etkenlerden biri olduğunu ortaya koymuştur.

Bu tür zemin davranışları, deprem sonrası ortaya çıkan yapısal hasarın en yaygın ve yıkıcı nedenleri arasında yer almaktadır (Shahir & Pak, 2010; Kaya, 2008).

Şekil 2 1964 Niigata depreminde sıvılaşma kaynaklı yapı devrilmeleri



Kaynak: Wu, 2025

Şekil 3 Sıvılaşma mekanizmasının yüzeyde yarattığı sonuçlar



Kaynak: Britannica, 2025

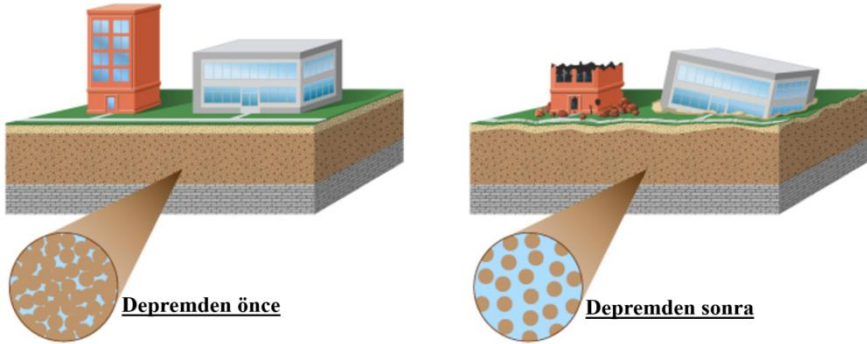
Deprem esnasında meydana gelen zemin sıvılaşması kavramı, ilk kez Terzaghi (1925) tarafından efektif gerilme prensibi temel alınarak açıklanmıştır. Bu yaklaşıma göre, drenajsız koşullarda konsolide olmuş zeminlerde, sismik yükleme nedeniyle gözenek suyu basıncının artması ve bunun sonucunda efektif gerilmenin sıfıra yaklaşması, zeminin katıdan sıvı benzeri bir davranışa geçmesine, yani sıvılaşmasına yol açmaktadır (Wang & Manga, 2010). Benzer şekilde, Mogami & Kubo (1953) tarafından yapılan çalışmalarda da sismik titreşimler sonucunda zeminlerin kayma dayanımını kaybetmesi durumu sıvılaşma olarak tanımlanmıştır (Unutmaz, 2008). Sıvılaşma olgusunun önemi, 1964 yılında yaşanan Niigata (Japonya) ve Alaska (ABD) depremleri sonrasında daha net anlaşılmıştır (Kaya, 2008). Özellikle 1964 Niigata depremi sırasında, yoğun şekilde bozunmuş kumlu zeminler üzerinde yer alan yapıların yana yatması, batması ve devrilmesi sonucunda ciddi yapısal hasarlar meydana gelmiştir (Unutmaz, 2008). Türkiye özelinde ise, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ardından Adapazarı bölgesinde gözlemlenen sıvılaşma kaynaklı zemin davranışları, yapıların önemli ölçüde hasar görmesine neden olmuş ve hem maddi hem de manevi kayıplara yol açmıştır. Bu tür olaylar, sıvılaşmanın özellikle son yarım yüzyılda Geoteknik Mühendisliği içerisinde oldukça kritik bir çalışma alanı olarak önem kazanmasına neden olmuştur. İlk araştırmalar genellikle kohezyonsuz kumlu zeminler üzerinde yoğunlaşmış olsa da ilerleyen yıllarda yapılan çalışmalarla birlikte kohezyonlu zeminler (siltli ve killi yapılar) de değerlendirme kapsamına alınmıştır. Kohezyonlu zeminler, özellikle gevşek yapılı ve duyarlılığı yüksek olduklarında, yeterli düzeyde dinamik kayma gerilmesine ve yoğun sismik uyarıya maruz kalmaları durumunda önemli miktarda deformasyon gösterebilmektedir. Bu davranış farklılığı nedeniyle, kohezyonsuz zeminlerde (kum ve düşük plastisiteli siltler) ortaya çıkan deformasyonlar doğrudan sıvılaşma olarak tanımlanırken, kohezyonlu zeminlerde (kil ve plastik siltler) benzer davranış biçimi

çevrimsel gevşeme terimi ile ifade edilmektedir (Idriss & Boulanger, 2008).

Zemin Sıvılaşma Mekanizması

Yeraltı su seviyesinin altında yer alan bir zemin tabakası, zemin daneleri arasındaki temas kuvvetlerinden kaynaklanan belirli bir dayanım değerine sahiptir. Bu temas kuvvetleri, daneleri bir arada tutarak zemin yapısına direnç kazandırır. Bu durum sonucunda, daneler arasında efektif gerilme olarak adlandırılan gerilmeler oluşur. Öte yandan, zemin içerisindeki boşluklarda yer alan su, daneler üzerinde bir boşluk suyu basıncı yaratır ve bu basınç, zemin içindeki efektif gerilme düzeyini doğrudan etkiler. Deprem gibi yüksek enerjili ve ani gelişen dinamik yüklemeler sırasında, oluşan kayma dalgaları, suya doymun halde bulunan daneli zeminlerin tane yapısında yeniden düzenlenmelere, sıkışmalara ve yer değiştirmelere neden olur (bkz. Şekil 4).

Şekil 4 Zemin yapısının sıvılaşma öncesi ve sonrası karşılaştırılması



Kaynak: SwRI, 2025

Bu hızlı yeniden düzenlenme süreci sırasında, daneler arasındaki boşluk suyu dışarıya drene olamaz ve bu durum, boşluk suyu basıncında ani bir artışa yol açar. Boşluk suyu basıncının artmasıyla birlikte efektif gerilme değeri sıfıra yaklaşır ve bu da zeminin kayma dayanımını önemli ölçüde kaybetmesine neden olur. Böylece, zemin

katı formdan akışkan benzeri bir davranışa geçerek sıvılaşma meydana gelir (Özener, 2007). Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemeye yönelik analizlerin ilk aşaması, mevcut zemin türünün sıvılaşmaya karşı ne ölçüde duyarlılık gösterdiğinin belirlenmesidir. Tüm zeminlerin sıvılaşmaya eğilimli olmadığı dikkate alındığında, her projede öncelikle saha bazlı sıvılaşma potansiyeli analiz edilmeli ve buna bağlı olarak sıvılaşma tehlikesi değerlendirmeleri yapılmalıdır (Kramer, 1996).

Zemin Özellikleri

Deprem anında veya sonrasında zeminlerin taşıma kapasitesinde meydana gelebilecek kayıplar ve zemin deformasyonları, yapıların güvenliğini ciddi biçimde tehdit edebilmektedir. Bu bağlamda hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışlarının önceden değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Kohezyonlu zeminler (örneğin, kil ve plastik siltler) ile kohezyonsuz zeminler (örneğin, kumlar ve düşük plastisiteli siltler), deprem etkisiyle farklı deformasyon türleri ve taşıma gücü kayıpları sergilemektedir. Bu farklılıklar esasen zeminin sıkışabilirlik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Boulanger & Idriss (2004) tarafından zeminler, davranış özelliklerine göre genel olarak “kum benzeri” ve “kil benzeri” olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmıştır. Kum benzeri zeminler, özellikle rölatif sıkılık ve çevresel gerilmeye duyarlıdır. Rölatif sıkılık değerleri efektif gerilme ile önemli ölçüde değişmediği için sıkışabilirlikleri düşüktür. Bu zeminlerde penetrasyon testleri (SPT ve CPT) ile yapılan değerlendirmeler, zeminin içsel sürtünme açısı ve dinamik direnci gibi mühendislik parametreleri hakkında bilgi verir. Bununla birlikte, bu tür zeminlerden örselenmemiş numune almak oldukça zordur ve alınan örneklerdeki doğal yapı bozulduğundan, laboratuvar ortamında sıvılaşma davranışı tam anlamıyla temsil edilemeyebilir. Kil benzeri zeminler ise, genellikle efektif gerilme geçmişine bağlı olarak daha

yüksek sıkışabilirlik sergiler ve boşluk oranı ile efektif gerilme arasında anlamlı bir ilişki bulunur. Bu zeminler örselenmeye karşı daha az duyarlı olduklarından, sondajla örnek alma işlemi daha sağlıklı yapılabilir. Özellikle geçirimsiz yapılarına bağlı olarak drenaj kaybı yaşanmadan alınan örneklerde, yerindeki efektif gerilmeler korunabilir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen drenajsız kayma dayanımı testleriyle bu zeminlerin dayanım karakteristikleri belirlenebilir. Zemin davranışları değerlendirilirken, dane şekli, dane boyutu ve dağılımı gibi fiziksel özellikler ile plastisite indeksi gibi mühendislik parametreleri oldukça belirleyici olmaktadır (Kramer, 1996; Boulanger & Idriss, 2004). Sıvılaşma olayları çoğunlukla kum ve düşük plastisiteli siltli zeminlerde gözlemlenmiş olmakla birlikte, iri daneli ve iyi derecelenmiş çakıllı zeminlerde de sıvılaşma olasılığı tespit edilmiştir (Wang & Manga, 2010). Özellikle geçirimsiz tabakaların etkisiyle drenajın kısıtlandığı durumlarda, bu tür iri daneli zeminlerde gözenek suyu basıncında ani artışlar gözlenebilmekte ve bu durum sıvılaşmayı tetikleyebilmektedir (Kramer, 1996). Zeminlerin derecelenmesi de sıvılaşma açısından kritik bir faktördür. İyi derecelenmiş zeminlerde, büyük taneler arasındaki boşlukların daha küçük tanelerle doldurulması, boşluk oranını ve sıkışabilirliği azaltarak sıvılaşma duyarlılığını düşürmektedir. Bu nedenle, drenajsız koşullar altında iyi derecelenmiş zeminlerin daha düşük gözenek suyu basıncına ve hacimsel değişim potansiyeline sahip olduğu bilinmektedir (Kramer, 1996). Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarında, özellikle plastik olmayan ya da çok düşük plastisiteye sahip siltli zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlı olduğu belirlenmiştir (Ishihara, 1984; 1985). Bu doğrultuda, düşük plastisiteli siltli zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri dikkatle değerlendirilmelidir. Örneğin, Çin kriteri (Wang, 1979), kil oranı ($\% < 0.005$ mm), likit limit ve likidite indeksi gibi parametrelere dayanarak bu tür zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmekte kullanılmaktadır. Önalp & Arel (2002), Adapazarı

bölgesindeki zeminler için bu kriterin $LL < \%30$, kil oranı $< \%10$, su muhtevası $> LL$ ve $LI < 1$ koşullarında geçerli olduğunu; Önalp & vd. (2006) ise $LL < \%33$, kil oranı $< \%10$, $LI < 0.90$ ve $D_{50} < 0.02$ mm değerlerinin daha anlamlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Sıvılaşmaya karşı zemin duyarlılığını etkileyen bir diğer önemli unsur da dane şeklidir. Yuvarlak yapılı taneler içeren zeminler, köşeli tanelere kıyasla daha kolay sıkışmakta ve bu nedenle sıvılaşmaya daha duyarlı hale gelmektedir (Kramer, 1996). İlk sıvılaşma analizleri kohezyonsuz kumlu zeminler üzerinde yoğunlaşmış olsa da daha sonra yapılan çalışmalar, düşük kohezyonlu siltli ve iri taneli zeminlerin de sıvılaşmaya karşı hassas olabileceğini ortaya koymuştur (Ishihara, 1984; Youd & vd., 1985; Evans & Seed, 1987; Yegian & vd., 1991). Sıvılaşmaya duyarlılığı tanımlamak amacıyla kullanılan parametreler arasında dane boyutu, uniformluk katsayısı, relatif sıkılık derecesi (D_r) ve penetrasyon dirençleri yer almaktadır. Genellikle, doygun, düşük plastisiteli ve drene olamayan siltli veya kumlu zeminler; ortalama dane boyutu 0.02–1.00 mm arasında olan, ince dane oranı $\%10$ 'u geçmeyen, uniformluk katsayısı 10'dan küçük ve relatif sıkılığı $\%75$ 'in altında olan zeminler sıvılaşmaya karşı duyarlıdır (Şişman, 2006). Mollamahmutoğlu & Babuçcu (2006) ise, relatif sıkılık oranı $\%65$ 'ten fazla olan zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, SPT-N değeri 30'un üzerinde olan zeminlerin yüksek sıkılık düzeyi nedeniyle sıvılaşma riskinin düşük olduğu ifade edilmiştir (Youd & Idriss, 2001).

Sıvılaşma Potansiyelini Belirleyen Temel Parametreler

Saha gözlemleri ve laboratuvar deneylerine dayalı çalışmalar göstermektedir ki, zeminlerde sıvılaşma olayının meydana gelip gelmeyeceğini öngörebilmek adına, söz konusu zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını etkileyen faktörlerin detaylı ve çok boyutlu olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda; zemin tipi (kohezyonlu veya kohezyonsuz), dane boyutu ve dağılımı, gözenek

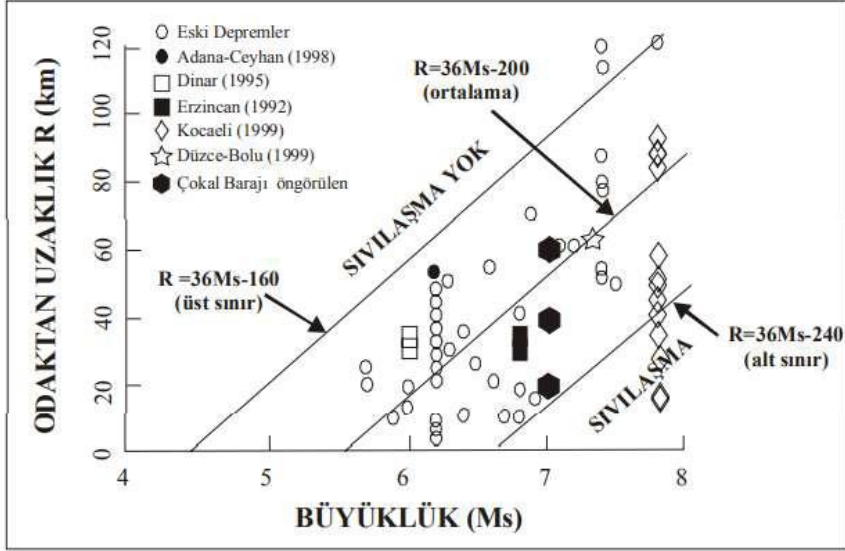
suyu basıncının gelişim hızı, yeraltı su seviyesi, plastisite özellikleri, relatif sıkılık, yoğunluk, drenaj koşulları, geçmiş gerilme durumu ve deprem karakteristikleri (süresi, şiddeti, ivme düzeyi) gibi jeoteknik ve sismik parametrelerin birlikte analiz edilmesi, sıvılaşma potansiyelinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu faktörlerin bütüncül bir yaklaşımla incelenmesi, özellikle kritik öneme sahip yapıların zemin emniyetinin sağlanması ve deprem sonrası oluşabilecek yapısal hasarların önlenmesi açısından vazgeçilmez bir mühendislik gerekliliğidir.

Deprem Kaynak Özelliklerinin Sıvılaşma Potansiyeline Yansıması

Depremın büyüklüğü ve etkisinin süresi arttıkça, ortaya çıkan dinamik enerjide de belirgin bir artış meydana gelir. Bu artış, yer hareketlerinin şiddetlenmesine ve yüksek düzeyde yer ivmesi ile sarsıntıların oluşmasına neden olmaktadır. Deprem süresinin ve büyüklüğünün artmasına bağlı olarak zemin içerisinde gelişen kayma deformasyonları, zemin danelerinde yer değiştirmelere yol açmakta ve bu durum sonucunda sıvılaşma olayı meydana gelmektedir (Mert, 2018). Sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminlerde, meydana gelen depremin oluşturacağı yer hareketlerinin büyüklüğü yalnızca deprem parametrelerine değil, aynı zamanda depremin odak noktasına olan mesafeye de bağlıdır. Deprem sonrası gerçekleştirilen saha gözlemleri ve arazi çalışmaları, sıvılaşma olayının olduğu bölgeler ile depremin merkez üssü arasındaki mesafenin önemli bir faktör olduğunu açıkça göstermektedir. Bu bağlamda, depremin odağına yakın mesafelerde sıvılaşma olasılığının daha yüksek olduğu, uzaklaştıkça ise bu olasılığın azaldığı tespit edilmiştir. Ündül & Gürpınar (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, deprem büyüklüğü ile sıvılaşmanın gözlemlendiği alanların odak noktasına olan uzaklıkları arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve bu ilişki Şekil 5'te grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, odak

noktasından uzaklaştıkça sıvılaşma oluşma ihtimalinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, yerel ivme düzeyi ile odak uzaklığı arasında bulunan ters orantılı ilişkiyle açıklanabilmektedir.

Şekil 5 Deprem büyüklüğü ve merkez uzaklığına göre sıvılaşma eğilimlerinin analizi



Kaynak: Ündül & Gürpınar 2003

Zeminin Rölatif Sıklığı

Seed & Idriss (1971) tarafından geliştirilen ve zeminlerin relatif sıklığına dayanan sınıflandırma esas alınarak yapılan değerlendirmeler, zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençlerinin sıklık derecesiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sınıflamaya ilişkin detaylar Tablo 1’de sunulmuştur. İlgili tablo incelendiğinde, relatif sıklığı %65’in üzerinde olan zeminlerin yani “sıkı” ve “çok sıkı” olarak nitelendirilen zeminlerin sismik yüklemeler altında sıvılaşma potansiyelinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, sıkı zeminlerin yüksek içsel sürtünme açısı ve düşük boşluk oranı nedeniyle, boşluk suyu basıncı artışına

karşı daha dirençli olmalarıyla açıklanabilir. Nitekim Mollamahmutoğlu & Babuçcu (2006) tarafından yapılan çalışmalarda da sıkı ve çok sıkı sınıfına giren zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığının oldukça düşük olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde relatif sıkılık parametresi, kritik öneme sahip bir mühendislik göstergesi olarak öne çıkmaktadır

Tablo 1 Geoteknik açıdan rölatif sıklığa göre zeminlerin tanımlanması

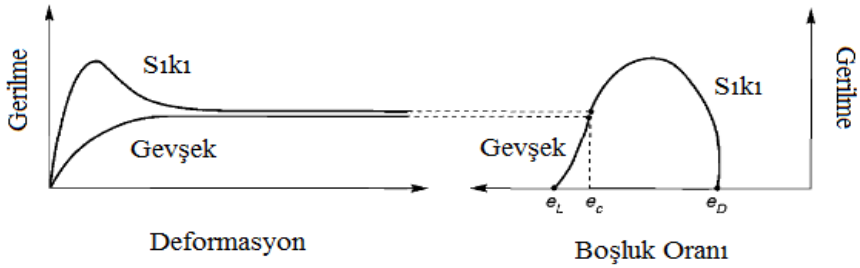
Rölatif Sıklık (D_r)	Açıklama
0 – 15	Çok gevşek
15 – 35	Gevşek
35 – 65	Orta sıkı
65 – 85	Sıkı
85 – 100	Çok sıkı

Kaynak: Mollamahmutoğlu & Babuçcu, 2006

Zeminin Boşluk Oranı

Casagrande (1936), aynı efektif gerilme düzeyinde ve drenajın gerçekleştiği koşullarda, gevşek ve sıkı kumlu zemin numuneleri üzerinde birim deformasyon kontrollü üç eksenli deneyler gerçekleştirmiştir. Bu deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, başlangıçta gevşek yapıda olan zemin numuneleri uygulanan yükleme etkisiyle sıkılaşma eğilimi gösterirken, sıkı numuneler önce hacim küçülmesi (büzülme) yaşamış, ardından ise ani bir şekilde hacim artışı (genişleme) sergilemiştir. Şekil 6'da sunulan bulgular doğrultusunda Casagrande, her iki zemin tipinin belirli bir sıkılık düzeyinde dengeye ulaştığını gözlemlemiş ve bu dengeye ulaşılan noktadaki boşluk oranını “kritik boşluk oranı” olarak tanımlamıştır. Bu bağlamda, zeminin mevcut boşluk oranının kritik değerin altında olması halinde sıvılaşma oluşmadığı, ancak boşluk oranının bu kritik değerin üzerinde olduğu ve drenajın engellendiği koşullarda sıvılaşma potansiyelinin ortaya çıkabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Casagrande, 1936; Kramer, 1996).

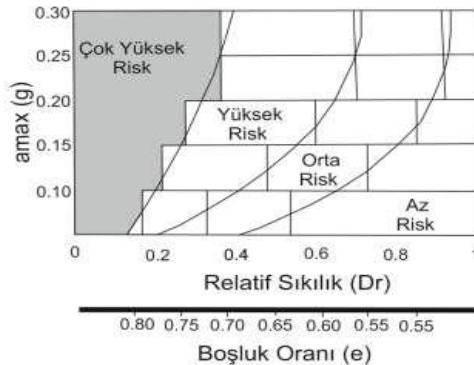
Şekil 6 Gevşek ve sıkı kum zeminlerin birim deformasyon kontrollü üç eksenli deney sırasındaki davranışları



Kaynak: Kramer, 1996

Seed & Idriss (1971), zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde yalnızca boşluk oranını değil, ayrıca rölatif sıkılık ile en büyük yer ivmesi (PGA) arasındaki etkileşimi de dikkate alarak bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Şekil 7 incelendiğinde, özellikle yüksek boşluk oranına sahip ve düşük rölatif sıkılık düzeyindeki zeminlerde, deprem sırasında sıvılaşma meydana gelme olasılığının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, zemin yapısının gevşekliği ve boşluk hacminin büyüklüğünün, sismik yüklemeler altında dayanımı azaltarak sıvılaşmayı tetikleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Şekil 7 Boşluk oranı, rölatif sıkılık ve yer ivmesi arasındaki ilişki



Kaynak: Seed & Idriss, 1971

Yeraltı Su Seviyesi

Sıvılaşma, genellikle kohezyonsuz (granüler) zeminlerin tamamen suya doymun olduğu durumlarda, tekrarlayan dinamik yükler (örneğin deprem dalgaları) altında meydana gelen ve zemin tanecikleri arasındaki efektif gerilmenin ani şekilde sıfırlanmasıyla oluşan önemli bir zemin davranış problemidir. Bu olgu, özellikle yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu alanlarda daha kritik hale gelmektedir; çünkü bu koşullarda, zeminin üst tabakaları da suya doymun hale gelmekte ve sıvılaşma potansiyeli artmaktadır. Sığ derinlikte bulunan yeraltı su seviyesi, zemin içerisindeki boşlukların su ile dolmasına neden olarak, boşluk suyu basıncının dinamik yükleme sırasında hızla artmasına ve buna bağılı olarak efektif gerilmenin kaybolmasına yol açmaktadır. Bu mekanizma sonucunda, zemin tanecikleri arasında kohezyon bulunmadığı durumlarda, taşıma kapasitesi geçici olarak tamamen kaybolmakta ve zemin sıvı gibi davranmaktadır. Öte yandan, yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan zeminler doymunluk açısından yetersiz olduğu için, boşluk suyu basıncında ani artışlar meydana gelmez ve efektif gerilme korunur. Bu nedenle, doymun olmayan zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençli olduğu kabul edilmekte ve bu tür zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmasına gerek duyulmamaktadır. Mollamahmutoğlu & Babuçcu (2006) da çalışmalarında, sıvılaşmanın yalnızca suya doymun kohezyonsuz zeminlerde meydana geldiğini ve analizlerin bu koşullarla sınırlı tutulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Örtü Basıncı ve Tabakalanma Özellikleri

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kapsamında, yeraltı su seviyesinin altında kalan ve yüzeyden itibaren 20 metre derinliğe kadar uzanan zeminlerin, deprem sırasında meydana gelen dinamik etkiler nedeniyle sıvılaşma potansiyeline sahip olduğu kabul edilmektedir. Genel bir

değerlendirme yapıldığında, sıvılaşmaya duyarlılığın zemin üzerindeki örtü katmanı kalınlığı ile ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Ancak bu genel eğilime rağmen, bazı mühendislik uygulamalarında daha derin konumlanan ve teorik olarak sıvılaşma riski taşımadığı varsayılan zemin tabakaları için de sıvılaşma analizleri yapılabilmektedir (Mollamahmutoğlu & Babuçcu, 2006). Zemin profilinde, suya doygun kohezyonsuz bir katmanın üzerinde düşük geçirgenliğe sahip bir tabakanın bulunması halinde, deprem sırasında boşluk suyu basıncı yeterli sürede drene olamaz. Bu durum, efektif gerilmenin hızlı bir şekilde azalmasına yol açar ve zeminlerin sıvılaşmaya karşı dirençlerini zayıflatır (Çavuş, 2015). Öte yandan, zemin içerisindeki suyun boşluklardan kolaylıkla dışarı çıkabildiği, yani drenajın sağlandığı koşullarda, efektif gerilme büyük ölçüde korunmakta ve bu da zeminlerin sıvılaşmaya karşı daha az duyarlı hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

Zemin Sıvılaşma Türleri

Zemin sıvılaşması, farklı mekanizmalarla gelişebilen karmaşık bir davranış biçimi olup, literatürde genellikle üç ana sınıfta incelenmektedir: akma sıvılaşması, devirsel (sıklık) hareketlilik ve düz yüzey sıvılaşması (Aydın, 2008). Akma sıvılaşması, genellikle düşük yoğunlukta, gevşek yapıdaki suya doygun kohezyonsuz zeminlerde meydana gelir. Bu tür sıvılaşmada, zemin dayanımını tamamen kaybederek viskoz bir akışkan gibi davranır ve genellikle eğimli arazilerde büyük kütle hareketlerine neden olur. Devirsel hareketlilik (sıklık sıvılaşma) ise tekrarlayan dinamik yükler (örneğin deprem dalgaları) altında, zemin tanecikleri arasındaki yerleşmenin artmasıyla birlikte boşluk suyu basıncının yükselmesi sonucu oluşur. Bu mekanizma sonucunda efektif gerilme geçici olarak sıfırlanabilir ve zemin kesme dayanımını kaybederek plastik deformasyonlar gösterir. Bu durum, yüzeyde yaygın oturma, çatlama ve taşıma gücü kaybı gibi etkilerle kendini gösterebilir. Düz yüzey sıvılaşması ise, genellikle yer altı su seviyesine yakın

konumlanan gevşek kumlu zeminlerde, yatay ve düzgün stratigrafik yapıların bulunduğu alanlarda meydana gelir. Yüzeyin altındaki sıvılaştıran tabaka, üstteki daha rijit tabakaları taşıyamaz hale geldiğinde, yüzeyde çökme ve çatlaklara yol açabilir. Bu tür sıvılaşma, geniş alanlara yayılan zemin deformasyonlarıyla karakterizedir ve altyapı sistemleri üzerinde ciddi hasarlara neden olabilir. Söz konusu sınıflandırma, farklı zemin profillerinde ve saha koşullarında sıvılaşmanın oluşum biçimlerini ayırt edebilmek ve uygun mühendislik önlemlerini planlamak açısından büyük önem taşımaktadır (Kramer, 1996).

Zemin Sıvılaşması Sonucu Oluştan Hasar Türleri

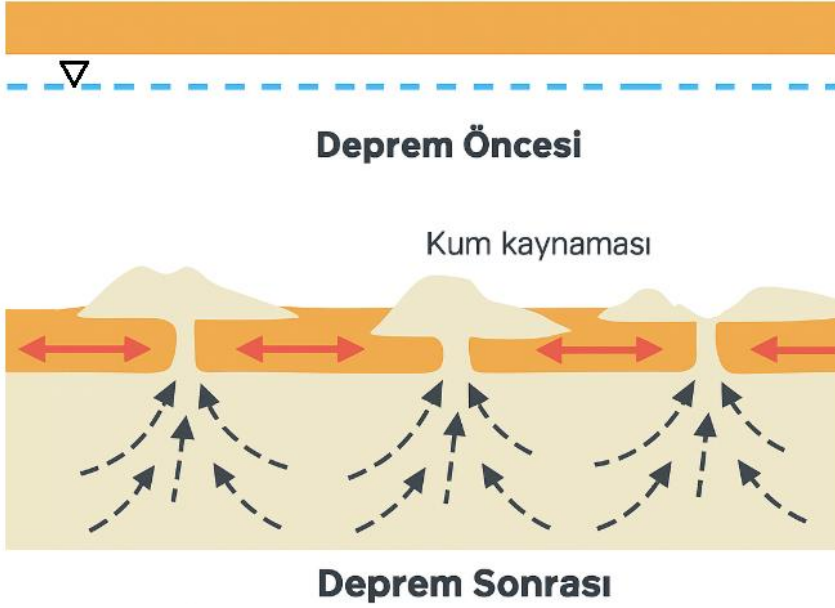
Zemin sıvılaşması, doygun kohezyonsuz (çoğunlukla kumlu) zeminlerin dinamik yükler (özellikle deprem) altında geçici olarak taşıma kapasitesini kaybetmesiyle ortaya çıkan ve ciddi mühendislik problemlerine yol açabilen bir jeoteknik olgudur. Sıvılaşma meydana geldiğinde, zemindeki efektif gerilme büyük ölçüde azalır veya tamamen sıfırlanır. Bu durum çeşitli yapısal ve geoteknik hasar türlerinin oluşmasına neden olur. Aşağıda bu hasar türleri teknik yönleriyle açıklanmıştır.

Kum Konileri

Zeminde meydana gelen sıvılaşma olaylarından biri de boşluk suyu basıncının ani artışı sonucu kum ve su karışımının boru benzeri bir yol izleyerek yer yüzeyine fıskırması şeklinde gözlemlenen oluşumdur (Wang & Manga, 2010). Özellikle deprem gibi kısa sürede yüksek enerjili dinamik yüklemelerin etkisiyle, zeminde biriken boşluk suyu basıncı kritik seviyelere ulaşmakta ve bu basınç, suyun yukarıya doğru yönelmesine neden olmaktadır. Bu süreçte, su hareketine eşlik eden zemin daneleri de yüzeye taşınmakta ve bu taşınım sonucunda, genellikle huni şeklinde gelişen kum konileri oluşmaktadır (bkz. Şekil 8) (Alpaslan, 2013). Bu tür yüzey deformasyonları, sıvılaşmanın görsel ve tanısal belirtilerinden

biri olarak değerlendirilmekte ve zemin davranışının yerinde izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 8 Deprem sonrası meydana gelen kum konileri



Kaynak: Alpaslan, 2013

Akma Sıvılaşması

Zemin sıvılaşmasının en yıkıcı sonuçlara yol açan türlerinden biri olan akma sıvılaşması, özellikle yüksek eğimli zemin kütlelerinde gözlemlenen ani stabilite kayıplarıyla ilişkilendirilmektedir. Bu yenilme türü, genellikle eğimi %5'ten (yaklaşık 3 derece) fazla olan şevlerde veya doğal yamaçlarda yer alan, suya doymun ve kohezyonsuz gevşek zeminlerin, ani bir şekilde kesme dayanımını kaybetmesiyle ortaya çıkar. Deprem gibi kısa süreli, yüksek genlikli dinamik yüklemeler sırasında zeminin boşluk suyu basıncı hızla artar ve bu durum efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasına neden olur. Eğer zemin başlangıçta düşük bir kesme mukavemetine sahipse ve deformasyona karşı zayıf bir iç yapıya sahipse, bu zayıflık ani bir şekilde kütsel kayma davranışıyla

sonuçlanabilir. Bu tür bir kayma, akışkan benzeri davranış gösteren zemin kütlesinin ani, hızlı ve geniş alanlara yayılan yer değiştirmesine neden olur. Akma sıvılaşmasının en karakteristik özelliği, zeminin bir bütün halinde kayması ve taşıma kapasitesinin neredeyse tamamen ortadan kalkmasıdır. Bu durum gerek yüzey yapıları gerekse altyapı sistemleri açısından son derece tehlikeli olup, mühendislik yapılarının bütünlüğünü doğrudan tehdit eder. Ayrıca, akma sıvılaşması genellikle önceden belirgin bir yüzey deformasyonu oluşturmaksızın meydana geldiği için, erken uyarı sistemleri açısından tespiti güçtür. Şekil 9’da akma sıvılaşmasına ilişkin tipik bir zemin davranışı kesiti sunulmakta olup, sıvılaşma sonrası zemin hareketlerinin yönü, deformasyon mekanizması ve oluşan kütle kayması görsel olarak açıklanmaktadır (Alpaslan, 2013; Mert, 2018).

Şekil 9 1971 San Fernando depreminde Lower San Fernando barajında oluşan akma sıvılaşması



Kaynak: Lopez, 2008

Yanal Yayılma

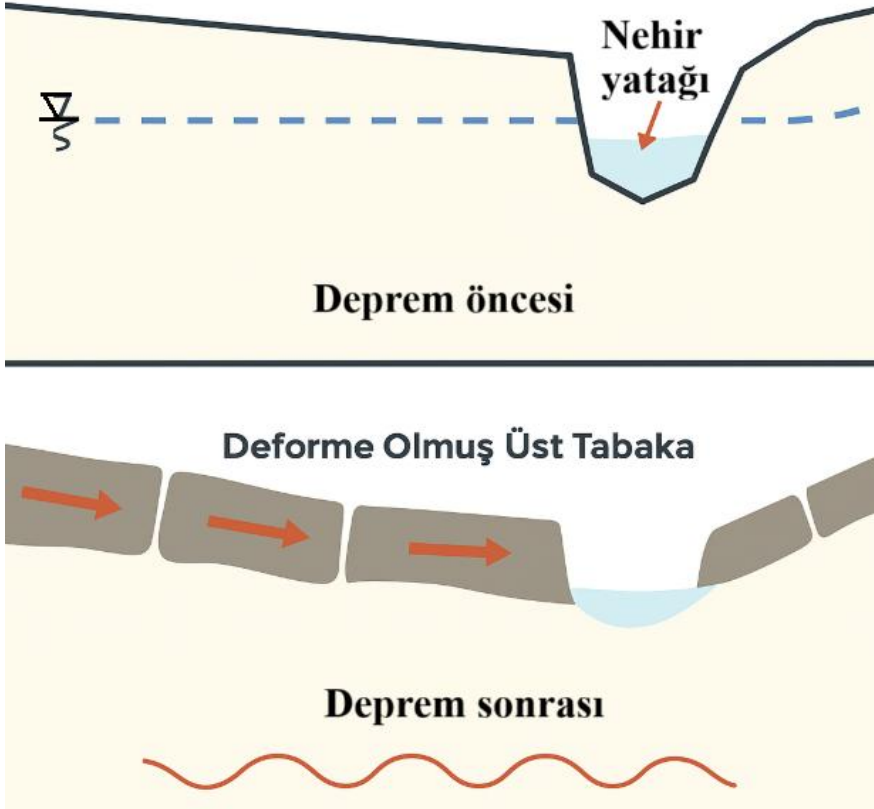
Yanal yayılma, genellikle eğimi yaklaşık %0,5 ile %5 (yaklaşık $0,3^{\circ}$ – 3°) arasında değişen düşük eğimli yamaçlar ile suya yakın alüvyal düzlüklerde meydana gelen zemin deformasyonu türlerinden biridir. Bu tür yenilme mekanizmasında, yüzeyin altındaki suya doymuş, kohezyonsuz zemin tabakaları deprem gibi dinamik yükler altında sıvılaşmakta; bunun sonucunda üstte yer alan daha rijit zemin kütleleri yatay doğrultuda blok halinde yer değiştirme eğilimi göstermektedir. Yanal yayılmalar, genellikle belirgin bir eğim gerektirmeksizin büyük mesafelerde deformasyon oluşturabilen, oldukça sinsi ve yaygın bir sıvılaşma etkisidir. Yüzeydeki yapıların maruz kaldığı diferansiyel yer değiştirmeler, temellerde oturma, eğilme ve kayma gibi hasarların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Şekil 10 ve 11’de bu tür deformasyonların oluşum mekanizması şematik olarak sunulmakta olup, bu olaylar sonucunda liman yapıları, köprü ayakları, yer altı ve yer üstü boru hatları, istinat duvarları gibi inşaat mühendisliği yapılarında ciddi düzeyde yapısal ve işlevsel bozulmalar meydana gelebilmektedir (Alpaslan, 2013).

Şekil 10 Loma Prieta depreminde devlet parkı yakınında oluşan yanal yayılmalar sonucu oluşan deformasyonlar



Kaynak: UCDAVIS, 2025

Şekil 11 Yanal yayılma sonucu oluşan göçme mekanizması

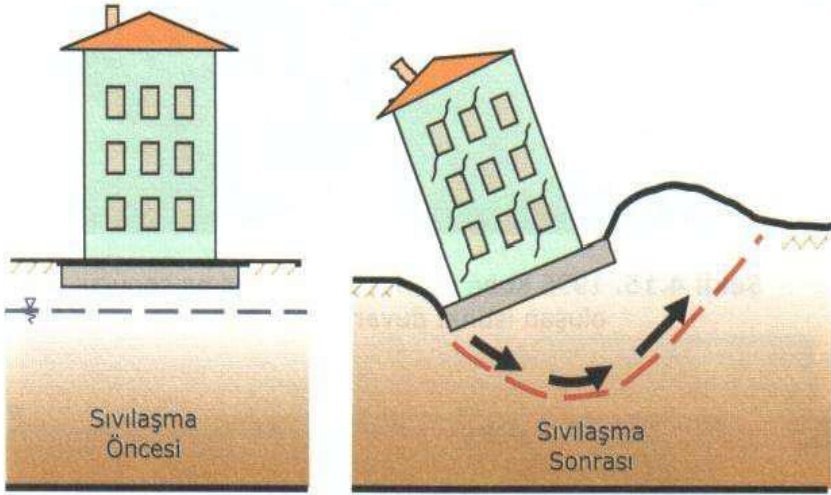


Taşıma Gücü Kaybı

Deprem etkisiyle zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncındaki ani artış, zeminin efektif gerilmesini düşürerek kesme dayanımının önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu süreç sonucunda, zeminin sıvılaşmasıyla birlikte taşıma kapasitesi zayıflamakta ve zemin yapısal olarak yumuşak bir davranış sergilemeye başlamaktadır (Cooke, 2000). Bu durum, özellikle suya doygun, kohezyonsuz ve gevşek zeminlerde sıklıkla karşılaşılan bir yenilme mekanizmasıdır. Zeminde gelişen sıvılaşma olayı, zemin kütlelerinde düzensiz oturma, göçme, yayılma veya kayma gibi deformasyonların oluşmasına neden olur. Bu deformasyonlara bağlı

olarak, yüzeyde yer alan yapılar taşıyıcı zeminlerinden yeterli destek alamaz hale gelir ve sonuç olarak yapısal bütünlükleri bozulur. Bu tür durumlarda binalarda diferansiyel oturmalar, kısmi ya da tam batma, yan yatma ve depreme bağlı devrilme gibi ciddi hasar mekanizmaları ortaya çıkabilmektedir (bkz. Şekil 12) (Mert, 2018).

Şekil 12 Taşıma gücü kaybı nedeniyle oluşan göçme



Kaynak: Alpaslan, 2013

Bu tür hasarlara örnek olarak, 1999 Marmara Depremi sırasında Adapazarı'nda meydana gelen olayda, sıvılaşma nedeniyle taşıma gücünü kaybeden zemin üzerinde yer alan bir yapının tamamen devrilmesi gösterilebilir. Söz konusu olay, Şekil 13'te yer alan saha görüntüsünde açıkça gözlemlenmektedir. Bu örnek, sıvılaşmanın yapılar üzerindeki doğrudan ve yıkıcı etkilerine dair önemli bir saha verisi niteliğindedir.

Şekil 13 1999 Adapazarı depreminde sıvılaşma sonucu binanın devrilmesi



Kaynak: Alpaslan, 2013

İstinat Yapı Göçmesi

İstinat yapılarında gözlemlenen en önemli yapısal sorunlardan biri, temel zeminin veya istinat duvarı arkasında yer alan dolgu malzemesinin sıvılaşması sonucu oluşan ani taşıma gücü kaybına bağlı olarak meydana gelen yanal göçme türüdür. Bu yenilme mekanizmasında, zemin sıvılaştığında içsel kesme direncini büyük ölçüde yitirir ve bu durum istinat duvarına etki eden toplam yanal toprak basıncında ani ve büyük bir artışa yol açar. Sıvılaşma sonucu gelişen bu yanal kuvvetler, özellikle zeminle etkileşimli rijit veya yarı rijit istinat yapılarında ciddi boyutta düşey yer değiştirme (oturma) ve yatay yer değiştirme (öteleme) oluşturabilmektedir. Bu deformasyonlar zamanla artarak yapının taşıyıcı işlevini kaybetmesine ve nihai olarak kısmi veya tamamen göçmesine neden olabilir. Ayrıca, sıvılaşan zeminin drenaj özelliği azalacağından dolayı, göçme süreci sırasında zemin içinde yüksek boşluk suyu basıncı da kalıcı hale gelebilir; bu da duvarın arkasında ek hidrostatik basınç oluşturarak göçme riskini daha da artırır.

Sıvılaşmaya bağılı bu tür göçmeler, genellikle deprem sırasında ya da hemen sonrasında meydana gelmekte olup; istinat yapılarının tasarımında, sıvılaşma potansiyeli olan zemin koşullarının mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Söz konusu yenilme mekanizmasının şematik temsili Şekil 14'te sunulmakta ve sıvılaşmanın istinat yapı stabilitesi üzerindeki etkisi görsel olarak ortaya konmaktadır.

Şekil 14 1995 Kobe depreminde sıvılaşma nedeniyle istinat yapısının göçmesi



Kaynak: WU, 2025

Zemin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesine Yönelik Deneysel Yaklaşımlar

Depremler sırasında meydana gelen ani ve yüksek genlikli dinamik yüklemeler, suya doymun kohezyonsuz zeminlerin kesme dayanımlarında ani bir azalmaya neden olmakta ve bu zeminlerin akışkan bir ortam gibi davranmasına yol açmaktadır. Bu durum, zemin üzerinde yer alan yapıların stabilitesini olumsuz etkileyerek ciddi yapısal hasarlara ve dolayısıyla can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Özellikle gevşek kumlu zeminlerde sıklıkla karşılaşılan bu sıvılaşma olgusunun önceden tespit edilmesi, mühendislik önlemlerinin planlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla hem laboratuvar hem de arazi ortamlarında çeşitli deneysel yöntemlere başvurulmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma eğilimlerinin belirlenmesinde laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, kontrollü ortamda dinamik davranışın analiz edilmesini sağlar. Bu kapsamda en sık kullanılan başlıca laboratuvar deneyleri şunlardır:

- Dinamik üç eksenli deney
- Burulmalı dinamik deney seti
- Sarsma tablası deneyi

Bu deneylerin doğruluğu ve güvenilirliği, büyük ölçüde araziden alınan numunelerin örselenmeden elde edilmesine bağlıdır. Özellikle örnek alma sürecinde karşılaşılan bozulmalar, laboratuvar sonuçlarının sahadaki gerçek zemin davranışını tam olarak yansıtmamasını engelleyebilmektedir (Ateş, 2003; Yatman, 2006).

Arazi deneyleri, zemin davranışının yerinde değerlendirilmesine olanak tanıyan pratik yöntemlerdir. Bu yöntemlerden elde edilen veriler, sıvılaşma potansiyelinin

belirlenmesinde kullanılan çeşitli ampirik korelasyonlar için temel teşkil eder. Sahada uygulanan başlıca deney yöntemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Standart penetrasyon deneyi (SPT)
- Koni penetrasyon deneyi (CPT)
- Sismik koni penetrasyon deneyi
- Dilatometre deneyi

Zemin türüne bağlı olarak, katı ve kohezyonsuz zeminler için genellikle SPT, yumuşak ve ince taneli zeminler için ise CPT deneyinden faydalanılmaktadır (Yatman, 2006).

Kaynakça

Alpaslan, N. (2013). Zemin sıvılaşması ve mekanizması, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 3(2):67-89.

Atabey, E. (2000). Deprem, Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim Serisi No:34, Ankara, 71 s.

Ateş, A. (2003). Zeminlerin Sıvılaşması ve Sıvılaşma Metotlarının İrdelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 102 s.

Aydın, C., 2008. Sıvılaşma Analizi ile İlgili Bir İnceleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi, 98 s.

Boulanger, R.W., & Idriss, I.M. (2004). Evaluating The Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays, Report NO.UCD/CGM-04/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering University of California, Davis, California, 131 p.

Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/soil-liquefaction/imagesvideos>, (Erişim tarihi: Haziran 2025).

Casagrande, A. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, reprinted in Contributions to Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, 1940, pp. 257-276.

Cooke, H.G. (2000). Ground Improvement for Liquefaction Mitigation at Existing Highway Bridges, Virginia Polytechnic Institute and State University, Doctor of Philosophy Thesis, 372 p.

Çavuş, U.Ş. (2015). Zeminlerin Sıvılaşması ve Barajların Alüvyon Temellerinin Sıvılaşma Riskinin Pratik Değerlendirilmesi, DSİ Teknik Bülteni, 119: 32-33.

Evans, M.D., & Seed, H.B. (1987). Undrained Cyclic Triaxial Testing of Gravel: The Effect of Membrane Compliance, Report UCB/EERC-87/08, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Grotzinger, J., & Jordan, T.H. (2010). Understanding earth. Macmillan.

Hasançebi, N., & Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. Bulletin Engineering Geology and Environment, 66:203-213.

Idriss, I.M., & Boulanger, R.W. (2008). Soil Liquefaction During Earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, MNO-12, USA, 235 p.

Ishihara, K. (1984). Post-earthquake failure of a tailing dam due to liquefaction of the pond deposit, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, University of Missouri, St. Louis, USA, 3:1129-1143.

Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1:321-376.

Kaya, Z. (2008). Depremler Sırasında Zeminlerin Davranışına Bağlı Olarak Meydana Gelen Zemin Deplasmanlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Mühendisliği Programı, 399 s.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.653 p.

Lopez, S. (2008). Application of Numerical Tools for the Modelling of Granular Soil Behaviour under Earthquakes: the state of the art, International Earthquake Engineering, pp. 255-294.

Mert, M. (2018). Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, inşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 121 s.

Mogami, H., & Kubo, T. (1953). The Behavior of Soil during Vibration, Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1:152-153.

Mollamahmutoğlu, M., & Babuçcu, F. (2006). Zeminlerde Sıvılaşma: Analiz ve iyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., ISBN 975-6009-70-5, Ankara, 263 s.

Önalp, A., & Arel, E. (2002). Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı kriteri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 1:363-372.

Önalp, A., Bol, E., & Ural, N. (2006). Siltlerin sıvılaşabilirliği: Adapazarı kriterinin geliştirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On birinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Özener, P.T. (2007). Depremde Tabakalı Kum Zeminde Oluşan Sıvılaşma ve Sıvılaşma Sonrası Davranışın Model Deneylerle Araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı, Doktora Tezi, İstanbul, 444 s.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, 97(SM9): 1249-1273.

Shahir, H., & Pak, A. (2010). Estimating Liquefaction-induced Settlement of Shallow Foundations by Numerical Approach, Computer and Geotechnics, 37:267-279.

SwRI. (2025). Southwest Research Institute, <https://www.swri.org/technologytoday/liquefaction-consortium-earthquake-models> (Erişim Tarihi: Haziran 2025).

şişman, E. (2006). Fethiye Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Kayma Dalga Hızı Verileriyle Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, inşaat Mühendisliği, Ankara, 220 s.

Terzaghi, K. (1925). Erdbaummechanic, Vienna: Franz Deuticke.

Tonaroğlu, M. (2006). Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı, Doktora Tezi, İstanbul, 134 s.

UCDAVIS. (2025). UCDAVIS Civil and Enviromental Engineering, <https://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/earthquake-hazards/liquefaction-at-moss-landing/>, (Erişim Tarihi: Haziran 2025).

Unutmaz, B. (2008). Assessment of Soil-Structure-Earthquake Interaction Induced Soil Liquefaction Triggering, Middle East Technical University, Natural and Applied Science, Civil Engineering, Doctor of Philosophy Thesis, Ankara, 252 p.

Ündül, Ö., & Gürpınar, O. (2003). Çokak Vadisindeki (Gelibolu) Alüvyal Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyeli, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 16(1):67-80.

Wang. W. (1979). Some findings in soil liquefaction, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, Chiana.

Wang, C.Y., & Mang, M. (2010). Earthquakes and Water, Lecture Notes in Earth Sciences, LNEARTH, 14, Springer, Switzerland, 225 p.

WU. (2025). University of Washington, <https://depts.washington.edu/liquefy/html/quakes/niigata/niigata.html>, (Erişim tarihi: Haziran 2025).

Yatman, Z.Ö. (2006). Sıvılaşma Sonucu Oluşan Zemin Yetersizliklerinin İrdelenmesi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 102 s.

Yegian, M.K., Marciano, E.A., & Ghahraman, V.G., 1991. Earthquake Induced Permanent Deformations: Probabilistic Approach, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1):35-50.

Youd, T.L., Harp, E.L., Keefer, D.K., & Wilson, R.C. (1985). The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-liquefaction, Earthquake Spectra, 2(1):71-89.

Youd, T.L., & Idriss, I.M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4): 297-313.

BÖLÜM 2

YENİLİKÇİ BİR DEPREM KORUMA YAKLAŞIMI: GEOTEKNİK SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİ

Bayram ATEŞ¹

Mohammad Azim Eirgash²

Giriş

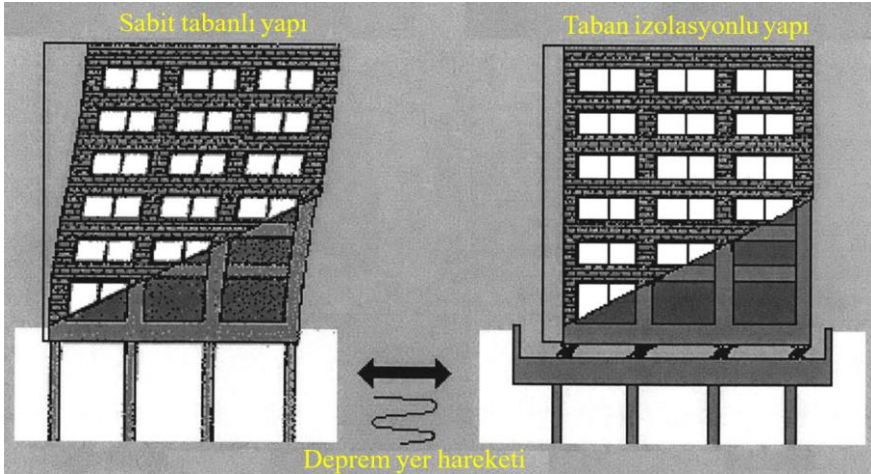
Depremler, her yıl dünya genelinde milyonlarca yapıyı etkileyen en yıkıcı doğal afetlerden biri olarak kabul edilmektedir. Ne zaman ve nerede meydana gelecekleri tam olarak öngörülemediği için, mevcut teknolojik ve bilimsel koşullarda tamamen engellenmeleri mümkün değildir. Ancak, uygun mühendislik yaklaşımları ve koruyucu önlemler sayesinde, depremlerin yol açabileceği can ve mal kayıpları önemli ölçüde azaltılabilir. Bu doğrultuda, yapıların tasarım aşamasında sismik performanslarının iyileştirilmesi, inşaat mühendisliği disiplininin temel hedeflerinden biri haline gelmiştir. Depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında, yapıların taban kesme kuvvetlerini azaltmak amacıyla sismik izolatörlerin kullanımı; ayrıca sismik enerji sönüm

¹ Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1251-7053

² Dr, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5399-115X

kapasitesini artırmak için damper gibi sönümleme elemanlarının entegre edilmesi, etkin çözümler arasında yer almaktadır. İdeal bir sismik tasarım, depremin büyüklüğü veya konumu fark etmeksizin yapının, yapısal bütünlüğünü koruyacak şekilde performans göstermesini hedefler. Geleneksel olarak, yapıların enerji dağılımı kapasiteleri, kullanılan yapı malzemelerinin doğrusal olmayan davranışlarına dayandırılmaktaydı. Ancak son yıllarda, deprem enerjisinin daha etkin şekilde kontrol altına alınabilmesi amacıyla pasif, yarı aktif ve aktif yapısal kontrol sistemlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar, sismik izolatörlerin taban kesme kuvvetlerini, yapısal yer değiştirmeleri ve maksimum ivme değerlerini önemli ölçüde azaltabildiğini ortaya koymuştur (bkz. Şekil 1) Bununla birlikte, bu tür izolatörlerin üretimi, kurulumu ve işletimi özel bilgi birikimi, teknik ekipman ve uzman personel gerektirdiğinden, yüksek maliyetli olmaları nedeniyle şu an için daha çok hastaneler, köprüler ve kritik öneme sahip yapılar gibi özel projelerde uygulama alanı bulmaktadır (Zardari, 2020).

Şekil 1 Taban izolasyonlu ve sabit tabanlı binaların karşılaştırılması



Kaynak: Wu, 2001

Geleneksel izolasyon sistemleri, tasarım ve uygulama süreçlerindeki teknik karmaşıklıkların yanı sıra yüksek maliyetleri nedeniyle genellikle hastaneler, ofis binaları ve eğitim kurumları gibi hayati öneme sahip yapılarda tercih edilmektedir. Ancak, deprem etkilerinin yalnızca bu tür yapılarda değil, sıradan konut ve benzeri yapı tiplerinde de ciddi hasarlara yol açabileceği gerçeği göz ardı edilmemelidir. Pasif kauçuk izolatörler ve sürtünme tipi izolatörler dahil olduğu geleneksel sismik izolasyon sistemleri her ne kadar başarılı performanslar sergilemiş olsa da bu sistemlerin her biri belirli sınırlamalara sahiptir. Özellikle uygulama zorlukları ve yüksek maliyetleri, bu yöntemlerin geniş çapta kullanımını kısıtlayan temel etkenlerdir. Bu bağlamda, araştırmacılar daha düşük maliyetli ve uygulanabilirliği yüksek alternatif çözümler geliştirmeye yönelmişlerdir. Bu arayışın bir sonucu olarak, yapısal sismik izolatörlere kıyasla daha ekonomik ve sade bir yaklaşım sunan “geoteknik sismik izolasyon” kavramı gündeme gelmiştir. Bu yöntemin temel prensibi, deprem dalgalarının yapı üzerine etki ederek atalet kaynaklı tepkiler oluşturmamasından önce, bu enerjinin zemin ortamında sönmülmesini sağlamaktır.

Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) Konsepti

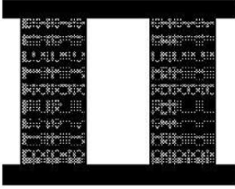
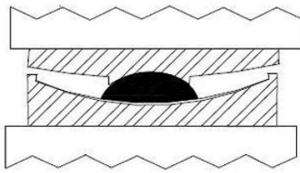
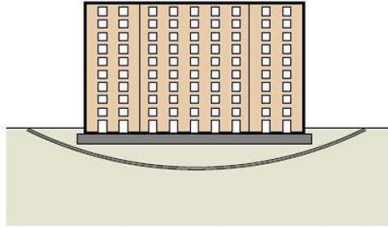
Yapılarda lamine elastomer mesnetler veya kayıcı mesnetler kullanılarak yapılan sismik izolasyon uygulamaları 1960’lardan bu yana yaygındır. Ancak, bu tasarım yaklaşımı zamanla kurallara dayalı bir anlayıştan, daha esnek ve performansa yönelik bir yaklaşıma evrilmiştir ve bu kapsamda, Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) kavramı da dâhil olmak üzere yeni teknolojilerin kullanımı giderek daha belirgin hale gelmeye başlamıştır. Günümüzde Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) sistemlerinde başlıca geosentetik malzemeler (geotekstil, geogrid vb.), kauçuk, bitüm, agrega ve kum karışımları kullanılmaktadır. Geosentetikler, uzun yıllardır zemin mühendisliği uygulamalarında filtrasyon, ayırma, drenaj ve zemin güçlendirme gibi çeşitli işlevler için tercih edilmektedir. Son

dönemlerde ise, bu malzemelerin deprem etkilerini hafifletme potansiyeli üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Geosentetiklerin sismik izolasyon amacıyla kullanımı üzerine yapılan araştırmalar artmakta olup, bu malzemelerin sunduğu mekanizma, temelde Sürtünmeli Sarkaç Sistemi'nin (SSS) çalışma prensibiyle benzerlik göstermektedir.

Geoteknik Sismik İzolasyon (GSİ), kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyetli yapısı sayesinde, son yıllarda deprem etkilerine karşı etkili bir çözüm yöntemi olarak dikkat çekmektedir (Xiong, 2013). Bu sistemin temel tasarım ilkeleri, geleneksel sismik izolasyon sistemlerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Klasik izolasyon sistemleri, yapı temeli ile düşey taşıyıcı sistem arasında yerleştirilen elastik ya da kayıcı arayüz elemanları ile yapının tabandan izole edilmesini esas alır. Bu yaklaşım sayesinde, zemin ve üstyapı arasındaki yatay hareket ayrıştırılarak, yapının maruz kaldığı sismik kuvvetler azaltılır ve böylece olası yapısal hasarlar önlenabilir (Taylor, 2004). GSİ sisteminde ise, yapı ile temel zemini arasında yerleştirilen ve izolasyon görevini üstlenen geoteknik bir ara tabaka mevcuttur. Bu tabaka, çoğunlukla iki farklı prensibe dayalı olarak tasarlanır: sürtünme temelli ve sönümlleme temelli izolasyon. Her iki yöntemde de uygulanan deprem enerjisinin bir kısmı bu geoteknik katman tarafından absorbe edilerek üstyapıya aktarılmadan önce azaltılır. Bu sayede, depremlerin yapıda oluşturabileceği yıkıcı etkiler önemli ölçüde hafifletilmiş olur. Sürtünme esaslı sistemlerde, genellikle sentetik malzemelerden oluşan katmanlar izolatör olarak kullanılır. Bu tür sistemlerin amacı, sismik enerjinin bir bölümünün bu katmanlar arasındaki sürtünme yoluyla, geri kalanının ise kontrollü yer değiştirmeler aracılığıyla dağıtılarak zeminde homojen bir enerji yayılımı sağlanmasıdır. Öte yandan, sönümlleme esaslı sistemlerde temel altındaki zemin özel iyileştirme teknikleriyle güçlendirilerek yüksek sönüm kapasitesine sahip bir geoteknik izolasyon tabakası oluşturulur. Bu tabaka,

deprem esnasında yapıya ulaşan enerjiyi sönümleyerek yapısal tepkileri azaltmada etkin rol oynar. Geoteknik sismik izolasyon sistemleri genel olarak üç ana başlık altında sınıflandırılabilir: temelin salınımına dayalı izolasyon, sönümleyici özelliklere sahip temel zeminleri ve sürtünme temelli izolasyon sistemleri. Bu yöntemlerden özellikle temelin salınımına dayalı izolasyon yaklaşımı, depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, Tsang (2012), geoteknik sismik izolasyon türlerini Şekil 2’de gösterildiği üzere sistematik bir şekilde kategorize etmiştir.

Şekil 2 Sismik izolasyon sistemlerinin tipik gösterim şeması

Geleneksel İzolatör	Rijitlik/Sönüm Katmanlı kauçuk yalıtıcı 	Kayma/Sürtünme Küresel kayıcı yalıtıcı 
Geoteknik Sismik İzolatör	Kauçuk granüler zemin karışımı  Kauçuk /zemin karışımı	Geosentetik gömlek 

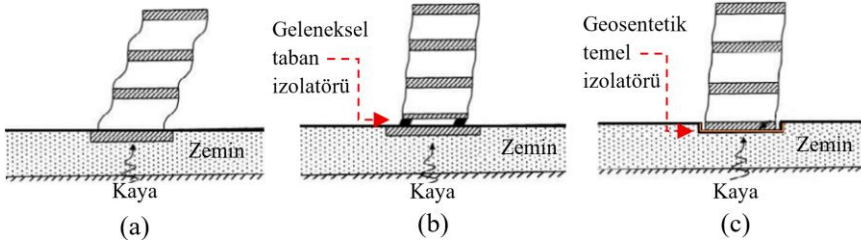
Kaynak: Tsang, 2012

Sürtünme Tabanlı Geoteknik Sismik İzolasyon Sistemleri

Son yıllarda, geosentetik malzemelerin geoteknik sismik izolasyon (GSI) yöntemleri kapsamında değerlendirilmesi giderek

daha fazla önem kazanmaktadır. Polimer esaslı liflerden üretilen ve yapay mühendislik malzemeleri olarak tanımlanan geosentetikler, inşaat mühendisliğinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu malzemeler; farklı zemin türlerini ayırma, zeminlerin taşıma kapasitesini artırma, filtre görevi görerek partikül geçişini engelleme, drenaj sağlama ve sıvı akışını kısıtlama gibi beş temel işlevi yerine getirebilmektedir (Gohil & ark., 2009). Geosentetiklerin potansiyel bir sismik izolasyon malzemesi olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Yegian & ark. (1999), sismik enerjinin zeminde absorbe edilerek yapıya iletimini azaltmayı amaçlayan temelden izolasyon kavramını ilk kez ortaya koymuşlardır (bkz. Şekil 3). Bu çalışmalarda, rijit bloklar ve basitleştirilmiş tek katlı yapı modelleriyle gerçekleştirilen deneysel araştırmalar sonucunda, geosentetik katmanların sismik enerjiyi önemli ölçüde sönmüleyebildiği ve bu nedenle yapıların deprem etkilerine karşı daha iyi korunabileceği ortaya konmuştur.

Şekil 3 Yapı deplasmanları a) doğrudan depreme maruz yapı b) geleneksel taban izolatörlü yapı c) geosentetik temel izolatörlü yapı



Kaynak: Yegian & ark., 1999

Sekman (2016) da benzer şekilde, geosentetiklerin sismik izolasyon amaçlı kullanımına ilişkin olumlu sonuçlara ulaşmıştır. Diğer yandan, Yegian & Lahlaf (1992), Kavazanjian & ark. (1991) ile Zimmie & ark. (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, dinamik kayma yüklemeleri sırasında geosentetik arayüzlerde kayma deformasyonlarının geliştiği ve bu durumun yapıya veya zemine aktarılan ivmeleri azalttığı rapor edilmiştir. Bu bulgular

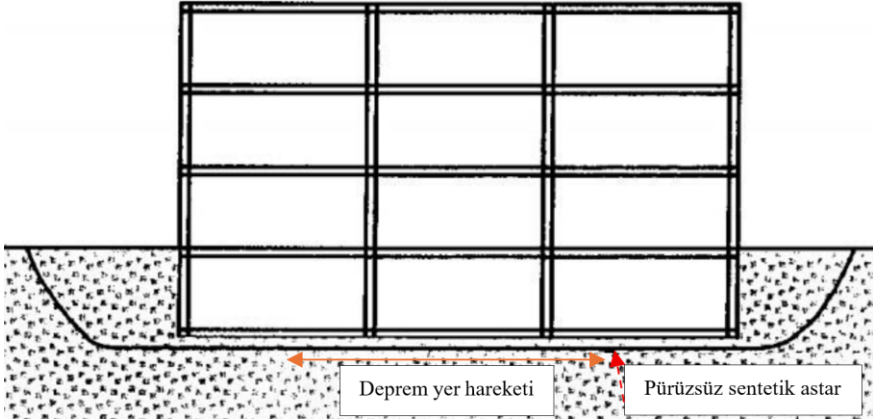
doğrultusunda, geosentetik malzemelerin sismik izolasyon işlevi görebileceği ve yapısal güvenliği artırmak adına etkin bir çözüm sunabileceği önerilmiştir.

Sentetik Astarla Temel İzolasyonu

Temel izolasyonu olarak da adlandırılan bu yöntem, yapıların sismik yükler karşısında daha dayanıklı hale getirilmesini amaçlayan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu sistemde, düşük sürtünme katsayısına sahip, düzgün yüzeyli bir sentetik astar, doğrudan temel tabanına yerleştirilerek zemin ile yapı temeli arasındaki doğrudan etkileşim sınırlandırılır (Yegian & Kadakal, 2004). Bu yaklaşımın temel hedefi, deprem dalgalarının yapıya iletilmeden önce zeminde absorbe edilmesi veya kayma düzlemleri aracılığıyla yön değiştirmesini sağlayarak, yapının maruz kaldığı ivme ve kesme kuvvetlerini azaltmaktır. Yegian & Kadakal tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, temel izolasyonu bulunan ve bulunmayan tek katlı yapı modelleri sarsma tablası üzerinde karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Bu testlerde, iletilen ivmeyi minimize etmek için özel olarak düşük sürtünmeli malzemeler tercih edilmiştir. Kullanılan sistem, yüksek mukavemetli, örgüsüz bir geotekstil katmanının, ultra yüksek moleküler ağırlıklı bir polietilen yüzey üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu bileşimin, farklı kombinasyonlar arasında en düşük sürtünme katsayısını sağladığı belirlenmiştir. Böylece, yapının altındaki zeminle temas eden yüzeyin kayma potansiyeli artırılmış ve deprem etkilerinin üstyapıya doğrudan aktarılması önlenmiştir. Bu sistemin başarısı, özellikle düşük ila orta büyüklükteki yapılarda ekonomik, uygulanabilir ve etkili bir çözüm sunması açısından dikkat çekicidir. Ayrıca, geosentetik malzemelerin hafif olması, kolay taşınabilirliği ve şantiyede hızlı montaja uygunluğu gibi avantajları sayesinde uygulama sürecinde de pratik faydalar sağlamaktadır. Söz konusu temel izolasyon sistemi, özellikle geleneksel sismik izolasyon yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyetli bir alternatif sunması

korunması hedeflenmektedir. Söz konusu zemin izolasyon sistemine ilişkin şematik temsil Şekil 5'te sunulmaktadır.

Şekil 5 Pürüzsüz sentetik astarla gerçekleştirilen zemin izolasyonu mekanizması

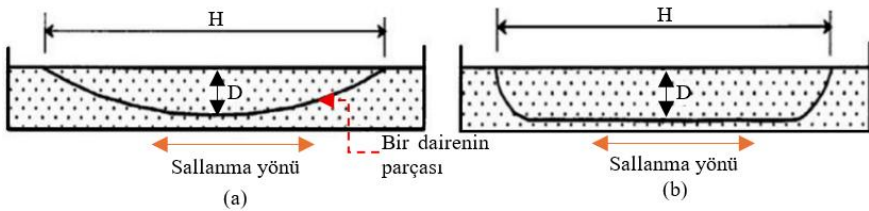


Kaynak: Yegian & Catan, 2004

Yegian ve Catan (2004) tarafından yürütülen deneysel çalışmada, zemin izolasyonu kapsamında farklı geometriye sahip sentetik astar sistemlerinin sismik performansı incelenmiştir. Çalışmada iki farklı geometri tercih edilmiştir: biri silindirik formda yerleştirilmiş astar (bkz. Şekil 6a), diğeri ise küvet biçiminde daha yayvan ve eğimli kenarlara sahip bir yapıdadır (bkz. Şekil 6b). Her iki sistemde de yapı temellerinin altına yerleştirilen bu pürüzsüz sentetik astarlarla izole edilmiş zemin kütleleri üzerinde, sarsma tablası testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel yüklemelerde hem sabit frekanslı harmonik titreşimler hem de gerçek deprem kayıtları kullanılmış ve bu sayede zemin izolasyon sisteminin farklı sismik etkiler altındaki davranışı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sentetik astar tabakasının, izole edilen zemin hacminin üst yüzeyinde oluşan ivme büyüklüklerini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgu, söz konusu malzemenin sismik enerjiyi sönümleyerek yapıya iletilen kuvvetleri azaltma potansiyelini ortaya

koymaktadır. Ancak, bu tür izolasyon sistemlerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, deprem sonrası sentetik yüzey boyunca meydana gelen kalıcı yatay deplasmanlardır. Yegian & Catan (2004), bu problemi azaltmak amacıyla geleneksel yatay astar yerleşimi yerine, kavisli bir yüzey geometrisinin kullanılmasını önermiştir. Bu öneride temel prensip, sistemin potansiyel enerji eğrisi üzerinde istikrarlı bir denge durumuna sahip olmasıdır. Kavisli geometri sayesinde, deprem sırasında ortaya çıkan kayma hareketi sonrasında, yerçekimi kuvveti bir geri kazandırıcı mekanizma gibi davranarak zemin kütlelerinin orijinal konumuna dönmelerine yardımcı olur. Bu geri getirme kuvveti, sistemin pasif yeniden yerleşimini sağladığı için, enerji tüketimi veya harici bir müdahale olmadan zeminin yeniden stabilize olmasına olanak tanır. Böylece, sadece sismik enerji sönmülmüş olmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin servis sonrası davranışı da iyileştirilmiş olur. Bu yaklaşım, geosentetik tabanlı zemin izolasyonu sistemlerinde hem sönmüleme hem de kendini toparlama potansiyeli bakımından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Şekil 6 Farklı geometrik düzenlemelere sahip zemin izolasyon sistemleri a) silindirik yapı, b) küvet formu

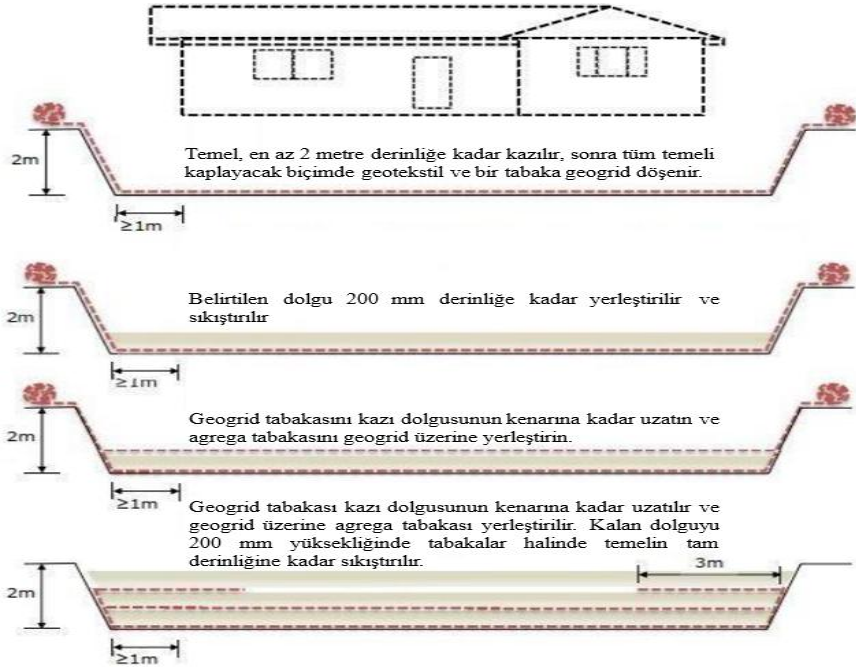


Kaynak: Yegian & Catan, 2004

Yeni Zelanda’da meydana gelen depremler çeşitli geogridlerin sıvılaşmayı ve buna bağlı yapısal hasarları azaltmada etkili olabileceğini göstermiştir. İkinci ve üçüncü depremler sonrasında yapılan incelemelerde, ilk depremden sonra yeniden inşa edilen evlerde kullanılan geogridlerin sismik kuvvetlere karşı fayda sağladığı doğrulanmıştır. Bu nedenle yetkili merciler, daha katı bir

tasarım yaklaşımının benimsenmesine karar vermiştir ve Yeni Zelanda İş, Yenilik ve İstihdam Bakanlığı (MBIE), Aralık 2012’de “Canterbury depremlerinden etkilenen evlerin onarımı ve yeniden inşası” başlıklı bir rehber belge yayımlamıştır (Gültekin, 2023). Bu rehber, teknik kategorilere göre TC2 ve TC3 olarak sınıflandırılan yapı alanları için geçerlidir. TC2, yüksek büyüklükteki depremlerde sivilaşmanın olası olduğunu ifade eder. MBIE rehberine uygun yaygın iyileştirme, temel onarımı ve yeniden inşa seçenekleri bu riski azaltmak için uygundur (bkz. Şekil 7).

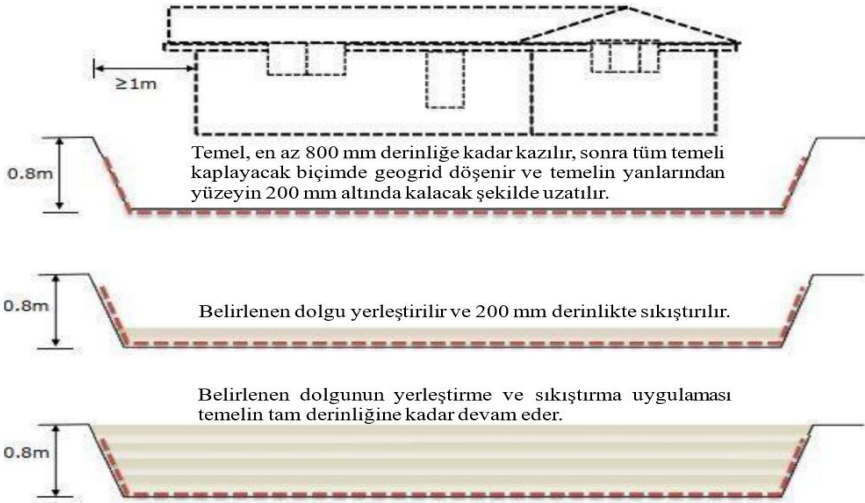
Şekil 7 TC2 yönetmeliğine göre yüzeysel temelin iyileştirilmesi



Kaynak: Gültekin, 2023

TC3 ise, gelecekte meydana gelebilecek yüksek büyüklükteki depremlerde sivilaşmanın gerçekleşme ihtimalinin olduğunu belirtir. Bu alanlarda uygun temel onarımı veya yeniden inşa seçeneğinin belirlenmesi için bireysel mühendislik değerlendirmesi gereklidir (bkz. Şekil 8).

Şekil 8 TC3 yönetmeliğine göre yüzeysel temelin iyileştirilmesi



Kaynak: Gültekin, 2023

Sönümlleme Tipi Geoteknik Sismik İzolasyon

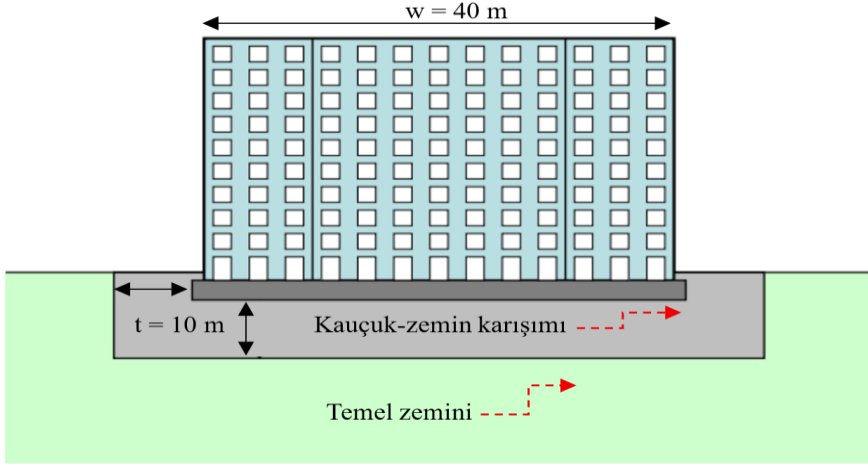
Zemin ortamının geometrik, mekanik ve dinamik özelliklerinin, deprem dalgalarının üstyapıya iletiminde belirleyici bir rol oynadığı açıktır. Ancak bununla birlikte, üstyapının da sahip olduğu benzer özellikler, zemine geri yansıyan sismik dalgaların karakteristiğini etkileyerek, taban kayasından gelen dalgaların davranışını değiştirebilmektedir. Zemin ve yapının karşılıklı olarak birbirlerinin dinamik tepkilerini etkilemesiyle oluşan bu durum, literatürde “zemin-yapı etkileşimi” olarak tanımlanmaktadır. Zemin-yapı etkileşimi, yapı temeli altındaki hareket ile serbest saha hareketi arasındaki farkları ortaya koyar ve özellikle yapı-zemin sistemlerinin dinamik analizlerinde dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Yapı sistemlerinin analitik modellenmesinde yaygın olarak, temelin rijit bir zemin üzerine ankastre şekilde oturduğu varsayımı kullanılmaktadır. Bu kabul, çok rijit kaya birimlerine oturan yapılar için uygun sonuçlar verirken; ayrılmış kayalar, alüvyonlar veya yumuşak kil tabakaları gibi deformasyon kapasitesi

yüksek zeminlerde geçerliliğini yitirmektedir. Özellikle bu tür zeminlerde, üstyapının özellikleri de dikkate alındığında, deprem esnasında yapı ve zemin birbirinden farklı dinamik davranış sergileyerek karşılıklı etkileşim oluşturur (Çakır, 2010). Bu bağlamda zemin-yapı etkileşimi hem eylemsizlik hem de kinematik etkileşim bileşenlerinin birleşimi olarak ortaya çıkar. Zemin-yapı etkileşimi, yapıların doğal titreşim periyotlarında ve sönüm oranlarında artışlara yol açabilmektedir. Bu durum, ankastre temel kabulüyle yapılan analizlerde elde edilen titreşim periyotları ile zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapılan analiz sonuçları arasında, özellikle yumuşak zeminlerde iki kata varan farklara neden olabilmektedir (Mylonakis & Gazetas, 2000). Depremler sonrası oluşan yapısal hasarlara yönelik yapılan incelemelerde, ciddi düzeydeki hasarların çoğunlukla zayıf zemin koşullarına sahip bölgelerde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu tespitler genellikle, sismik dalgaların yumuşak zeminler tarafından doğrusal biçimde büyütüldüğü varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, düşük genlikli hareketler ve küçük deformasyonlar söz konusu olduğunda geçerlidir. Ancak deprem hareketlerinin büyüklüğü arttığında, yüzeysel zeminler doğrusal olmayan davranış sergilemeye başlar. Büyük genlikli depremlerde, yumuşak zeminler önemli miktarda plastik deformasyona uğrayarak gelen sismik enerjinin büyük bir kısmını sönümleyebilir (Gičev & Trifunac, 2012). Ambrosini (2006) tarafından gerçekleştirilen nümerik bir çalışmada, zemin ortamının histeretik kaynaklı sönümleme özelliklerinin yapıların sismik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, %35 oranında sönüm kapasitesine sahip bir zemin ortamında, üstyapıdaki yatay deplasmanların önemli ölçüde azaldığı, ayrıca zeminin histeretik sönüm kapasitesinin, deprem sonrası titreşimlerin daha kısa sürede sönümlemesini sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tüm bu deneysel ve analitik bulgulara rağmen, zeminlerin plastik deformasyon kabiliyetleri sayesinde bir enerji sönümleme

sistemi gibi işlev görmesi hâlâ tartışmalı bir konudur. Bu yaklaşımın güvenilirliği, zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışlarının birçok parametreye (çevrim sayısı, deviatorik gerilme düzeyi, şekil değiştirme miktarı, zemin türü ve doygunculuk durumu) yüksek düzeyde bağlı olması nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Ancak, sismik yer hareketlerinin yapıya iletilen etkisini azaltmada en temel mekanizmalardan biri enerji yayılımıdır. Bu bağlamda, kauçuk malzemeler yüksek enerji emme kapasitesiyle öne çıkar ve bu özelliğinden dolayı titreşim kontrolü ve sönümleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sönümleme esasına dayalı zemin izolasyonunun en bilinen ve uygulamada karşılık bulan yöntemlerinden biri, zeminle kauçuk karışımının kullanılmasıdır. Bu yöntemde, temel zemini olarak belirli oranlarda karıştırılmış zemin ve kauçuk bileşimleri kullanılmakta; böylece yapının oturduğu zemin, sismik enerjiye karşı bir yastık gibi davranan enerji emici bir tabaka haline getirilmektedir. Tsang (2008) tarafından ortaya konan bu yaklaşımda, kauçuk-zemin karışımı (RSM), yapının temeli çevresine uygulanarak sismik enerjinin emilmesi hedeflenmiştir. Literatürde yapılan çeşitli çalışmalar, saf zemine kıyasla kauçuk katkılı zeminlerin kayma mukavemetinde belirgin artışlar sağladığını göstermektedir (Edil & Bosscher, 1994; Masad & ark., 1996; Foote & ark., 1996). Bununla birlikte, bu karışımların yalnızca mukavemeti artırmakla kalmadığı, aynı zamanda enerji yutma kapasitesinde de önemli düzeyde iyileşme sağladığı vurgulanmıştır. Tsang (2008) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, 40 metre genişliğe sahip 10 katlı bir yapı modeli üzerinde kauçuk-zemin karışımının sismik izolatör olarak uygulanabilirliği sayısal analizler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, temel altında 10 metre kalınlığında bir kum-kauçuk karışımı tabakası oluşturulmuş ve bu sistemin sismik performansı incelenmiştir. Analiz sonuçları, bu tür bir karışımın deprem dalgalarının yapıya iletilmesini azaltmada etkili bir enerji sönümleme mekanizması sunduğunu göstermiştir (bkz. Şekil 9).

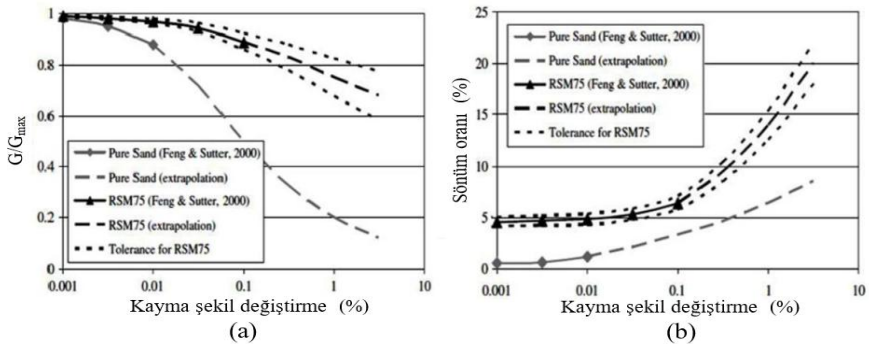
Şekil 9 Kauçuk katkılı zemin ile oluşturulan temel altı sismik izolasyon katmanının şeması



Kaynak: Tsang, 2008

Tsang (2008), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hacim oranı %75 olan kauçuk-kum karışımı (RSM) kullanılarak deneysel analizler yapılmıştır. Şekil 10a'da, söz konusu karışım ile saf kumun kayma modülündeki azalma davranışları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 10b'de ise kayma şekil değiştirme ile sönüm oranı arasındaki ilişkiler grafiksel olarak gösterilmektedir.

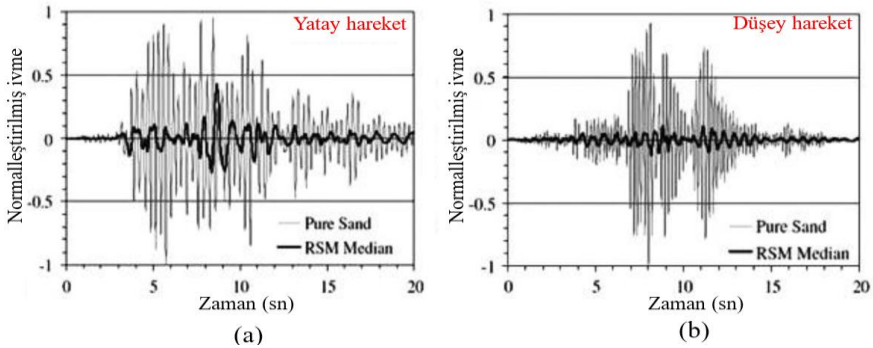
Şekil 10 Saf kum ve kauçuk-zemin karışımları için a) kayma modülü azalma eğrileri b) kayma şekil değiştirme-sönüm oranı eğrileri



Kaynak: Tsang, 2008

Ayrıca bu çalışmada yapı, dinamik yükleme koşulları altında iki farklı temel zemini senaryosu ile değerlendirilmiştir. İlk senaryoda temel zemini olarak yalnızca saf kum kullanılmış, ikinci senaryoda ise RSM75 (hacimce %75 kauçuk içeren kauçuk-zemin karışımı) tabakasının etkisi analiz edilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü üzere, RSM tabakası kullanılması durumunda, yapıda oluşan yatay (bkz. Şekil 11a) ve düşey (bkz. Şekil 11b) ivme değerlerinde sırasıyla yaklaşık %80 ve %90 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, RSM'nin sismik izolasyon amacıyla etkin bir enerji sönümleyici ortam sağlayabileceğini göstermektedir.

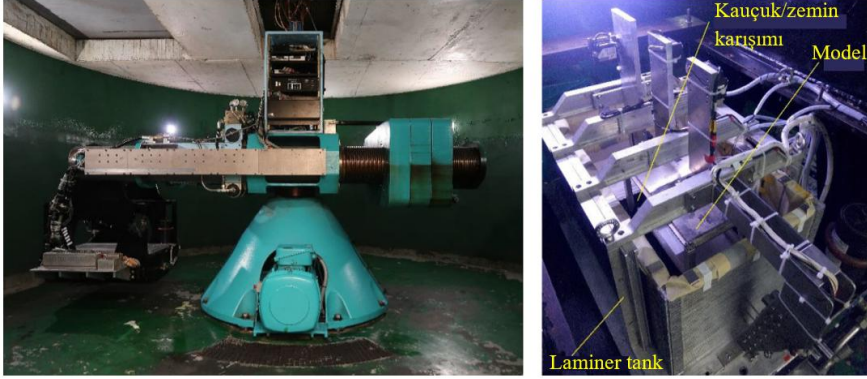
Şekil 11 Sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz yapıların karşılaştırmalı tepki ivmeleri a) yatay ivme b) düşey ivme



Kaynak: Tsang, 2008

RSM tabanlı Geoteknik Sismik İzolasyon (GSI) sistemlerinin deprem yer hareketlerini azaltmadaki etkinliğini daha iyi ortaya koymak amacıyla, Tsang & ark. (2020) tarafından kapsamlı bir deneysel araştırma yürütülmüştür. Çalışmada, Tayvan’da bulunan National Central University (NCU) bünyesindeki santrifüj deney düzeneği kullanılarak model testleri gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 12).

Şekil 12 RSM metodu için geoteknik santrifüj deney düzeneği

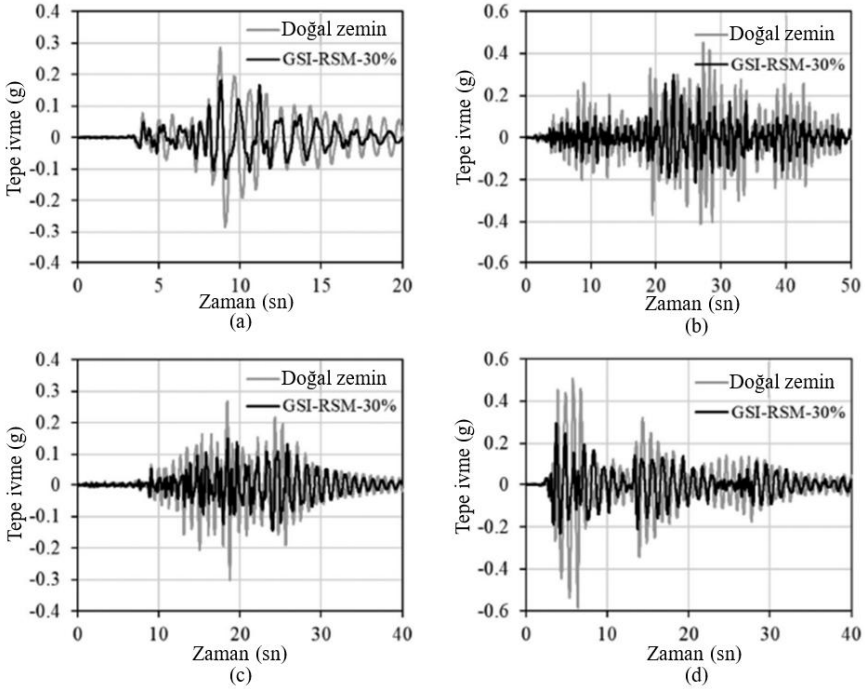


Kaynak: Tsang & ark., 2020

Santrifüj deney çalışmasında, deney düzeneğinin tasarımına temel oluşturmak amacıyla beş katlı çerçeve tipinde bir yapı modeli esas alınmıştır. Model yapının kat planı $18 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ olarak belirlenmiş, temel sistemi ise 0.5 m kalınlığında bir radye temel olarak tasarlanmıştır. Deney sırasında, 50g büyüklüğünde merkezkaç ivmesi uygulanarak modelin gerçek zemin davranışına yakın sonuçlar üretmesi hedeflenmiştir. Kauçuk-zemin karışımı (RSM) tabakasının mekanik özelliklerinin, başta efektif yanal gerilme düzeyi olmak üzere, kauçuk ve zemin arasındaki oran ile bu iki fazın karakteristik tane boyutları arasındaki göreceli büyüklüğe ($D_{50,s}/D_{50,r}$) önemli ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir (Tsang & ark., 2020). RSM metodu santrifüj deneyine tabi edildiğinde, sadece kum ve RSM sistemlerinin dört farklı deprem etkisi altında oluşan ivme zaman sonuçları grafiklendirilmiştir (bkz. Şekil 13). Doğal zemin ve RSM'ye ait sonuçlar kıyaslandığında, sistem üzerinde oluşan ivme değerlerinin önemli ölçüde düşürüldüğü tespit edilmiştir. Mevcut literatür incelendiğinde, RSM sisteminin, düşük ve orta katlı daha geniş yapılar için yatay ivmeleri yaklaşık %40 ila %60 oranında azaltabileceği ve aynı zamanda temel yapısal periyotta anlamlı bir artış sağlayabileceği öngörülmektedir. Ancak, mevcut binaların altına kauçuk yerleştirmenin zorlukları ile birlikte, kauçuk

malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyeti bu sistemin önemli bir dezavantajı olarak öngörülmektedir.

Şekil 13 Farklı deprem etkileri altında doğal zemin ve RSM zemin üzerindeki yapıda ivme-zaman değişimleri a) 1994-Northridge depremi b) 1985-Algarobbo depremi c) 2001-El Salvador depremi c) 1940-Imperial Valley depremi



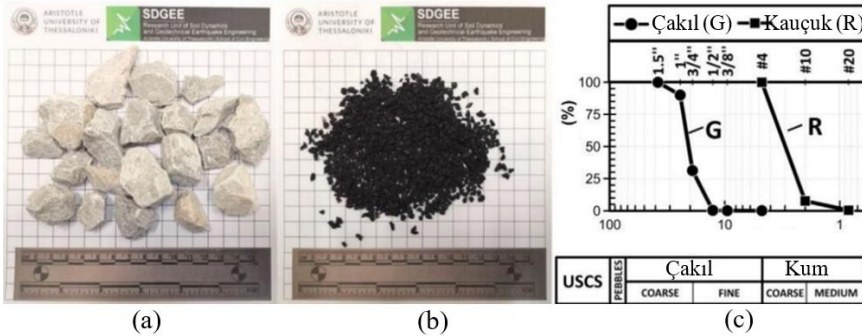
Kaynak: Tsang & ark., 2020

Çakıl-kauçuk karışımları (GRM), birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kum-kauçuk karışımlarına alternatif olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru şekilde anlaşılması, performanslarının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak, mevcut literatürde çakıl-kauçuk karışımlarının geoteknik özelliklerine dair yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalar, daha çok bu malzemelerin fiziksel ve mekanik

davranışlarını ortaya koymaya odaklanmıştır. Hazarika & Abdullah (2016), inşaat mühendisliği uygulamalarında zemin-kauçuk karışımlarının oluşturulmasında, kullanılan zemin tipi ile geri dönüştürülmüş kauçuk malzemenin bulunabilirliği ve maliyet etkinliğinin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Özellikle kumlu zeminlerle karıştırıldığında kauçuğun segregasyonu (ayrışması) önlemek amacıyla daha küçük boyutlara kesilmesi önerilmektedir; ancak bu durum uygulama maliyetini artırmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla, araştırmacılar kumlu zeminlerin çakıllı zeminlerle değiştirilmesini önermiştir. Hazarika & ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir sonraki çalışmada, konut temelleri altına yerleştirilen çakıl-kauçuk tabakalarının taşıma gücünü artırabileceği ve depremlerden kaynaklanan oturmaları azaltabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca, bu karışımların yüksek geçirgenliğe sahip olması nedeniyle, çevrimsel yükleme sırasında boşluk suyu basıncı gelişimini sınırladığı ve böylece üstyapıların ve altyapıların genel stabilitesini artırdığı belirtilmiştir. Pasha & ark. (2018) ise çakıl-kauçuk karışımlarında farklı kauçuk boyutlarının mekanik davranış üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Çalışmalarında iki farklı çakıl tipi (yarı köşeli ve yarı yuvarlak) ile üç farklı lastik parçası oranı ($D_{50R}/D_{50S} = 0.35, 1.2$ ve 3.35) değerlendirilmiştir. Bulgular, kauçuk ve çakıl tipinden bağımsız olarak hacimsel kauçuk içeriği (VRC) arttıkça kesme dayanımının azaldığını göstermiştir. Ancak, $D_{50R}/D_{50S} = 3.35$ oranına sahip karışımlar, diğer oranlara kıyasla daha yüksek nihai kesme dayanımı sergilemiştir. Bu durum, daha fazla çakıl-çakıl temasının oluşmasıyla açıklanmış ve bu temasların artması daha yüksek kesme dayanımı ile sonuçlanmıştır. Chiraro & ark. (2019) ise düşük ve yüksek katlı yapılar için sismik ve izolasyon temellerinde kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla çakıl ve granül lastik kauçuk karışımlarının doğrudan kesme dayanımını test etmiştir. Çalışma sonuçları, tüm karışımlar için nihai sürtünme açısının 39° veya daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durum, çakıl-granül lastik karışımlarının zemin

mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir uygun malzemeler olduğunu ortaya koymaktadır. Pitilakis & ark. (2021), GRM (çakıl-kauçuk karışımı) tabakalarının temel altına yerleştirilmesiyle bir geoteknik sismik izolasyon (GSI) yöntemi olarak davranışını değerlendirmek amacıyla geniş ölçekli bir deney gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda ortam gürültüsü, serbest titreşim ve zorlanmış titreşim testlerini içeren çeşitli deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmada, üç farklı çukur kazılarak sırasıyla %0, %10 ve %30 oranlarında ağırlıkça geri dönüştürülmüş kauçuk içeren GRM ile doldurulmuş ve bu dolgular temel zeminini temsil edecek şekilde kullanılmıştır (bkz. Şekil 14).

Şekil 14 Deneylerde kullanılan a) çakıl malzeme b) kauçuk malzeme c) dane dağılım eğrileri



Kaynak: Pitilakis & ark., 2021

Çalışma sonuçları, düşük kauçuk içeriğine sahip (%10) GRM tabakasının yapının dinamik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu (yaklaşık %5'ten az) göstermiştir. Ancak, %30 kauçuk içeren karışımlar için sistem rijitliğinin azalması ve sönüm kapasitesinin artmasıyla birlikte, GSI-yapı sisteminin dinamik özelliklerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. Tüm deneylerde, sistemin temel frekansında ve yapının 4.5–7 Hz frekans aralığındaki tepkisinde kayda değer azalmalar izlenmiştir. Bununla birlikte, çalışmada, karışım

ağırlığının %30'una kadar olan kauçuk oranının üst sınır olarak dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır; zira bu değerin üzerindeki oranlarda karışımın etkin şekilde sıkıştırılması mümkün olmamaktadır. Ayrıca, enerjinin büyük bir bölümünün GRM tabakasında çevre zemine yayılmadan önce sönmüldüğü ve bu durumun GRM kullanımını yapılar için etkili bir GSI çözümü haline getirdiği ortaya konmuştur. Özetle, %30 oranında kauçuk içeren GRM tabakalarının oluşturduğu GSI sisteminin yapıyı etkili şekilde izole ettiği görülmüştür. Sistem sönmünün artması ve GRM katmanlarında gerçekleşen belirgin enerji yutulumu, bu yöntemin sismik izolasyon açısından etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır (bkz. Şekil 15).

Şekil 15 Zemin çukuru ve dolgu içerikleri a) GRM100/0, b) GRM90/10, c) GRM70/30, d) GRM100/0, e) GRM90/10, f) GRM70/30, g) deney düzeneği genel görünüşü

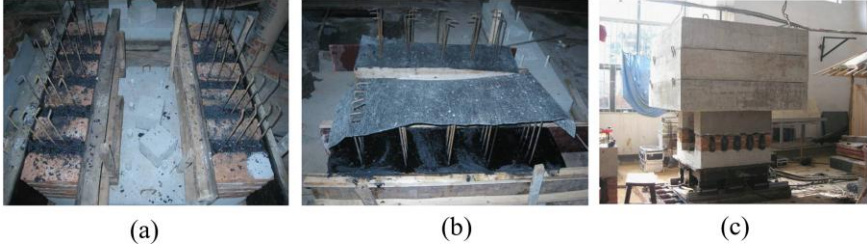


Zemin-Bitüm Karışımını Esas Alan Sismik İzolasyon Sistemleri

Bitüm terimi, ham petrolün rafinasyonu sırasında daha uçucu bileşenlerin ayrılmasıyla elde edilen ve geriye kalan hidrokarbon esaslı bir ürün olan rafine bitümü tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Mühendislikte yaygın olarak kullanılan bu malzeme, belirli fiziksel gereksinimleri karşılamak üzere formüle edilir (Hunter & ark., 2015). Bitüm, sıcaklık ve yükleme süresi gibi etkenlere bağlı olarak farklı davranışlar sergileyen termoplastik ve viskoelastik bir sıvıdır. Düşük sıcaklıklarda ya da kısa süreli yüklemelerde cam benzeri elastik bir katı gibi davranırken, yüksek sıcaklıkta ya da uzun süreli yüklemelerde yapışkan bir akışkan özellik gösterir. Bu tür yapışkan malzemeler yarı akışkan nitelikte olup, gerilme altında şekil değiştirir ve bu deformasyonlar kalıcı olabilir çünkü yük kaldırıldığında malzeme başlangıç formuna dönemez. Buna karşılık, elastik malzemeler de gerilme altında deformasyona uğrar ancak yük kaldırıldığında eski şekline tamamen geri dönebilir (Poel, 1954). Bu nedenle bitümün gerilmeye karşı gösterdiği davranış hem sıcaklık hem de yükleme süresi ile doğrudan ilişkilidir. Bu durum, bitümün reolojik özelliklerinin gerinim, deformasyon, zaman ve sıcaklıkla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Taylor & Airey, 2008). Asfalt ise, temel olarak bitüm ve mineral agregaların karışımından oluşan bir yapı malzemesini tanımlayan genel bir terimdir. Sıcak karışım asfalt (HMA) ve asfalt betonu (AC) gibi çeşitli türleri bulunmaktadır. Asfalt, büyük oranda inşaat sektöründe, özellikle yol yapımında kullanılmakla birlikte; çatı kaplamalarında, rezervuar yalıtımlarında ve içme suyu borularının iç yüzeylerinde astar olarak da kullanılmaktadır. Asfaltın üstün su yalıtım kabiliyeti ve termoplastik özellikleri, onu çok çeşitli mühendislik uygulamaları için uygun bir malzeme haline getirmektedir. Bitümlü malzemelerin sahip olduğu avantajlı özellikler nedeniyle, 1950'li yıllardan itibaren bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu), dolgu baraj gövdelerinde

geçirimsizlik perdesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde, bu tür barajların inşasının, özellikle soğuk iklim koşullarında, merkezi kil çekirdekli kaya dolgu barajlara kıyasla daha pratik olduğu belirtilmektedir (ICOLD, 1992; Hoeg & ark., 2007). Asfalt beton dolgulu barajların sismik performansına ilişkin yapılan nümerik analizler, deprem sonrası oluşan plastik deformasyonların oldukça sınırlı olduğunu ve bu yapıların deprem yüklerine karşı yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur (Valstad et al., 199; Ghanooni & Mahin-roosta, 2002; Feizi-Khankandi, 2009). Bu bulgular doğrultusunda, asfalt betonunun dinamik özelliklerine yönelik çalışmalar artmıştır. Elde edilen veriler, bitümlü bağlayıcıların granüler zeminlerin hem kayma modülünü hem de sönüm kapasitesini artırdığını, ayrıca yüksek çevrimli yüklemeler sonrasında gerçekleştirilen monotonik yüklemelerde de performansını büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir (Hoeg & ark., 2007; Feizi-Khankandi & ark., 2008; Wang & Hoeg, 2011). Sako & ark. (2007) tarafından yürütülen çalışmalarda, asfaltın elastik deformasyon sınırları içerisinde kalmasına rağmen %18–24 aralığında sönüm oranı sergilediği bildirilmiştir. Aynı araştırma kapsamında sahada açılan bir hendekte, saf bitüm ve bitüm emülsiyonları kullanılarak hazırlanan asfalt betonunun, uygulanan titreşim frekansına bağlı olarak dikkate değer düzeyde sönümleyici özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu gelişmelerin ışığında, Yao & ark., (2014) Şekil 16’da sunulan çelik ve asfalt kompozitli bir sismik izolatör geliştirmiş ve bu sistemin performansını sarsma tablası deneyleriyle test etmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, uygulanan depremin maksimum yer ivmesi arttıkça izolatör sisteminin etkinliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, düşük maksimum yer ivmesine sahip deneylerde ise sismik izolasyonun büyük ölçüde yalnızca asfalt tabakası tarafından sağlandığı belirlenmiştir.

Şekil 16 Asfalt-çelik kompozit izolatör a) dikey çelik çubuklar, tuğla ve asfalt b) yastık malzeme c) sarsma tablası deneyleri



Kaynak: Yao & ark., 2014

Geoteknik Sismik İzolasyon Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Geleneksel sismik izolatörler, özel olarak üretilmeleri ve montaj süreçlerinde uzman ekipman ile nitelikli personele ihtiyaç duyulması nedeniyle yüksek maliyetli çözümler arasında yer almaktadır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde bu sistemlerin sıradan binalarda yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir. Bu bağlamda, birçok araştırmacı daha ekonomik, uygulanabilirliği kolay ve yaygınlaştırılabilir alternatif sismik izolasyon sistemleri geliştirmeye odaklanmıştır. Geleneksel sismik izolasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında, geoteknik sismik izolasyon (GSİ) yöntemleri, sahip oldukları bazı özgün avantajlar sayesinde oldukça umut vadeden bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Geoteknik sismik izolasyon sistemleri, geleneksel izolatörlerden farklı olarak yapısal elemanlara entegre edilmek yerine, zemin seviyesinde ya da temel altı bölgede uygulanarak sismik enerjiyi zemin-yapı etkileşimi yoluyla azaltmayı hedefler. Bu yaklaşım, hem uygulama kolaylığı hem de düşük maliyeti sayesinde özellikle düşük ve orta katlı yapılar için uygun bir çözüm sunar. GSİ sistemleri; geri dönüştürülmüş malzemeler (örneğin kauçuk, plastik, lastik parçacıkları), özel zemin iyileştirme yöntemleri (örneğin kum-kauçuk karışımları, granüler tampon tabakalar) ve yerinde kolay uygulanabilen inşaat teknikleriyle birleştirilerek geniş bir uygulama

yelpazesi oluşturur. Ayrıca, GSİ sistemleri yapısal tasarıma doğrudan müdahale gerektirmediğinden, mevcut binaların iyileştirilmesinde de etkili bir yöntem olarak değeriendirilmektedir. Bu avantajları nedeniyle GSİ, özellikle kaynakları sınırlı bölgelerde deprem riski altındaki yapıların sismik güvenliğini artırmak için önemli bir mühendislik çözümü olarak ön plana çıkmaktadır.

Kaynakça

Ambrosini, R. D. (2006). Material Damping vs. radiation damping in soil-structure interaction analysis. *Computer and Geotechnics*, 33, 86-92. Doi:10.1016/j.compgeo.2006.03.001

Chiaro, G., Palermo, A., Banasiak, L., & Granello, G. (2019). Direct shear behavior of gravel-granulated tyre rubber mixtures. *Conference: Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Perth, Australia.

Çakır, T. (2010). Zemin-depo dış duvarı-sıvı sistemlerinin deprem davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*.

Edil, T. B. & Bosscher, P. J. (1994). Engineering properties of tire chips and soil mixtures, *Geotech. Test. J.*, 17,4, 453-464. Doi:10.1520/GTJ10306J

Feizi-Khankandi, S., Mirghasemi, A. A., Ghalandarzadeh, A. & Höeg, K. (2008). Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams, *Soils and Foundations*, 48, 3, 319-332. Doi:10.3208/sandf.48.319

Feizi-Khankandi, S., Ghalandarzadeh, A., Mirghasemi, A. A. & Höeg, K. (2009). Seismic analysis of the garmrood embankment dam with asphaltic concrete core. *Soils and Foundations*, 49, 2, 153–166. Doi:10.3208/sandf.49.153

Foose, G. J., Benson, C. H. & Bosscher, P. J. (1996). Sand reinforced with shredded waste tires, *J. Geotech. Eng. ASCE*, 122,9, 760-767. Doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:9(760)

Gičev, V., & Trifunac, M. D. (2012). Energy dissipation by nonlinear soil strains during soil-structure interaction excited by SH pulse, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 43, 261-270. Doi:10.1016/j.soildyn.2012.07.008

Ghanooni, S. & Mahin-roosta, R. (2002). Seismic analysis and design of asphaltic concrete core embankment dams, *Journal of Hydropower and Dams*, 6, 75-78.

Gohil, D. P., Solanki, C. H., & Desai, A. K. (2009, December). Application of geosynthetics for ground improvement: An overview. *In Indian Geotechnical Conference*, Guntur.

Gültekin, F. (2023). Mitigation of earthquake hazards of medium-rise buildings by using different soil improvement methods. *Master Program in Earthquake Engineering Department, Boğaziçi University*, 169.

Hazarika, H. & Abdullah, A. (2016) Improvement effects of two and three-dimensional geosynthetics used in liquefaction countermeasures. *Jpn. Geotech. Soc. Spéc. Publ.* 2, 2336–2341.

Hazarika, H., Pasha, S. M. K., Ishibashi, I., Yoshimoto, N., Kinoshita, T., Endo, S., Karmokar, A. K., & Hitosugi, T. (2020). Tire-chip reinforced foundation as liquefaction countermeasure for residential buildings. *Soils Found.*, 60, 315–326. Doi:10.1016/j.sandf.2019.12.013

Hoeg, K., Valstad, T., Kjaernsli, B. & Ruud, A. M. (2007). Asphalt core embankment dams: Recent case studies and research, *Int. J. Hydropower Dams*, 13, 5, 112–119.

Hunter, R. N., Self, A. & Read, J. (2015). The shell bitumen handbook, *Sixth edition, by ICE Publishing, One Great George Street, Westminster, SW1P 3AA, London.*

ICOLD Press. (1992). Bituminous cores for earth and rockfill dams, 84.

Kavazanjian, E. J., Hushmand, B., & Martin, G. R. (1991). Frictional base isolation using a layered soil-synthetic liner system, *Proceedings of the Third U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, 10, 1139-1151.

Masad, E., Taha, R., Ho, C., & Papagiannakis, T. (1996). Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material, *Geotech. Test. J.*, 19,3, 297-304. Doi:10.1520/GTJ10355J

Mylonakis, G., & Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental, *Journal of Earthquake Engineering*, 4, 3, 277-301. Doi: 10.1080/13632460009350372

Pasha, S. M. K., Hazarika, H., & Yoshimoto, N. (2018). Dynamic properties and liquefaction potential of Gravel-Tire Chips Mixture (GTCM). *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, 74(4), 649-655.

Pitilakis, D., Anastasiadis, A., Vratsikidis, A., Kapouniaris, A., Massimino, M. R., Abate, G., & Corsico, S. (2021). Large-scale field testing of geotechnical seismic isolation of structures using gravel-rubber mixtures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(10), 2712-2731. Doi:10.1002/eqe.3468

Sako, N., Adachi, T., Hikosaka, N. & Funaki, T. (2007). Developments of new geomaterials for environmental vibration mitigation. *ScrapTire Derived Geomaterials Opportunities and Challenges*, Yokosuka, Japonya.

Sekman, M. (2016). Experimental study on mitigation of earthquake hazards using geosynthetics. *Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Bogazici University*.

Taylor, A. W. & Igusa, T. (2004). *Primer on seismic isolation*. American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA.

Taylor, R. E. & Airey, G. D. (2008). Polymer modified bitumens, Part one: background and history, *Asphalt Professional*, 34, 11-16.

Tsang, H. H. (2008). Seismic isolation by rubber-Soil mixtures for developing countries, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 37,2, 283-303. Doi:10.1002/eqe.756

Tsang, H. H., Lo, S. H., Xu, X. & Sheikh, M. N. (2012). Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: numerical study. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 2009-2024. Doi:10.1002/eqe.2171

Tsang, H., Tran, D. P., Hung, W. Y., & Pitilakis, K. (2020). Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1271-1289. Doi:10.1002/eqe.3398

Valstad, T., Selnes, P. B., Nadim, F., & Aspen, B. (1991). Seismic response of a rockfill dam with an asphaltic concrete core, *Journal of Water Power and Dam Construction*, 43,1-6.

Van der Poel, C., (1954). A general system describing the visco-elastic properties of bitumen and its relation to routine test data, *Journal of Applied Chemistry*, 4, 221–236.

Wang, W. & Höeg, K. (2011). Cyclic Behavior of Asphalt Concrete Used as Impervious Core in Embankment Dams, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 137, 5, 536-544. Doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000449

Wu, T. C. (2001). Design of base isolation system for buildings, *PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 18-21.

Xiong, W. & Li, Y. (2013). Seismic isolation using granulated tire-soil mixtures for less developed regions: experimental validation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42, 2187-2193. Doi:10.1002/eqe.2315

Yao, F., Shang, S. & Liu, K. (2014). Shake table tests of a new steel–asphalt composite layer system for the seismic base

isolation of housing units. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 59, 1–7. Doi:10.1016/j.soildyn.2014.01.001

Yegian, M. K., & Lahlaf, A. M. (1992). Dynamic interface shear strength properties of geomembranes and geotextiles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 22, 760-779.

Yegian, M. K., Kadakal, U., & Catan, M. (1999). Geosynthetics for earthquake hazard mitigation. *Geosynthetics '99: Specifying Geosynthetics and Developing Design Details*, Vol 77, pp. 87-100.

Yegian, M. K. & Kadakal, U. (2004). Foundation isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11), 1121-1130. Doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:11(1121)

Yegian, M. K. & Catan, M. (2004). Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(11), 1131-1139. Doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:11(1131)

Zardari, S. (2020). Modifiye bitüm katkılı geoteknik sismik izolasyon (GSİ) malzemesi araştırılması ve yapı davranışına etkisinin incelenmesi. *Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 145.

Zimmie, T. F., De, A., & Mahmud, M. B. (1994). Centrifuge modeling to study dynamic friction at geosynthetic interfaces. *In Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, 1, 415- 418.

BÖLÜM 3

SAMSUN VE CİVARINDAKİ BAZI KAYAÇLARIN DEMİRYOLU BALASTI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ARİF HİKMET ÇAKOĞLU¹
FAHRİ BİRİNCİ²

Giriş

Ulaştırma, insanların ticaret, seyahat, eğitim gibi tüm ihtiyaçlarının karşılanabilmesine yönelik faaliyetleri için kullanılan alandır. Genel olarak, kara, deniz ve hava yolu olarak üçe ayrılrsa da karayolu ulaştırması da kendi içinde karayolları ve demiryolları hatları ile hizmet etmektedir. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü'nün toplam demiryolu ağı uzunluğu verilerine göre 11.668 km'si konvansiyonel olmak üzere toplam 13.919 km'dir (TCDD, 2025). Ülkemizin demir yolu ağı, son yıllarda hızlı tren ve yüksek hızlı tren (YHT) ile artmaktadır ancak yine de seyahat ve eğitim başta olmak üzere insanların sık yer değiştirme gereksiniminden dolayı yeterli gelmemektedir. Günümüz şartlarında zaman kavramının önemi de dikkate alınarak daha çok hızlı tren ya da yüksek hızlı tren tercih edilmektedir. Hız

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Sinop Üniversitesi, GGY Bölümü, Orcid: 0000-0002-8055-7858

² Dr.Öğr.Üyesi, OMÜ, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-9689-8905

limitlerinin farklılığına göre sınıflandırma yapılmaktadır. Konvansiyonel hatlarda hız sınırı <160 km/h, hızlı tren için 160 km/h<V <250 km/h ve yüksek hızlı tren (YHT) için ise V>250 km/h olarak belirlenmiştir (TCDD, 2016). Yatırım programına alınan yeni hatların da tamamlanmasıyla gelişim süreci devam etmektedir.

TCDD teknik şartnamede yaptığı değişiklik ile balast olarak kullanılacak malzemenin -istenilen teknik özellikleri karşılaması kaydıyla- kökeni konusunda sınırlamayı kaldırmıştır (Anonim, 2021)

Tablo 1. TCDD eski ve yeni teknik şartnamesine göre balast malzemesi petrografik özellikleri (16,21)

Özellik	Eski Teknik Şartname	Yeni Teknik Şartname
Kayacın kökeni	Magmatik	Kayaç kökeni ile ilgili bir koşul istenilmemektedir
Kayaç ismi	Bazalt, granit, granodiyorit, gabro ve diyabaz	Kayaç ismi ile ilgili bir koşul istenilmemektedir

Kayaçlar ve Bölgedeki Dağılımı

Jeolojik Kökenlerine Göre; Volkanik, Sedimanter, Metamorfik Mineralojik Özelliklerine Göre; Karbonat, Silisli ve Mikalı Reaktiflik Durumuna Göre; Reaktif olan ve olmayan şeklinde türlere ayrılabilir (Tuncay, 2014).

Fatsa-Ünye civarlarında inceleme alanının en yaşlı birimi Senoniyen (Santoniyen-Kampaniyen) yaşlı, bazalt, andezit lav ve piroklastları ile kumtaşı, kireçtaşı, siltaşı, çamurtaşı, marn, tüfit ara yüzeylerinden oluşan Mesudiye Formasyonudur. Mesudiye Formasyonu içinde yer alan kırmızı kireçtaşı (mikrit-biyomikrit) ve tüf ile seyrek kilaşı, kumtaşı marn ara düzeyleri Kapanboğazı üyesi olarak tanımlanmıştır (Keskin, 1999).

Samsun batısında Altinkaya baraj gölü dolayında yüzeylemektedir. Birim şeyl, kumtaşı ve kireçtaşı ardalı ile bunların arasında olistostromal düzeyler ve sık iri olistolitlerden oluşmaktadır. Formasyon içinde Permian ve Üst Jura-Alt Kretase yaşlı kireçtaşı blokları oldukça yaygındır (Hakyemez, 1989).

Bazalt, andezit, tüf, aglomera ile bazaltik batolit, dayk ve sillerden oluşmaktadır. Dağınık yüzeylemeler şeklinde gözlenmektedir. Mahmurdağ'da bazaltlar tipik olarak yüzeylemektedir. Bazaltlar, koyu siyah ve krem-beyaz renkli, porfirik dokuludur. Ojit, olivin, lösit ve plajiyoklas fenokristalleri ve bunları bağlayan bir hamur maddesinden oluşmaktadır. Mahmurdağ volkanitlerini oluşturan bazaltlar batolit, dayk ve siller şeklinde diğer formasyonları kesmiş ve aralarına yerleşmişlerdir (Yoldaş, 1989). Güney ilçelerinde ise kalker kayaç yapısı hakimdir (Beyhan, 1992; Öztürk, 1979).

Balast Malzemesi için Aranılan Fiziksel Özellikler

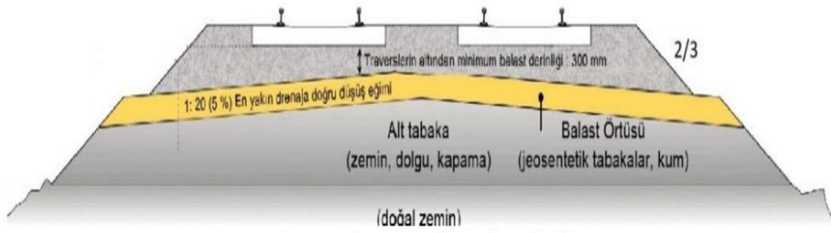
Balast olarak tercih edilecek kayaç türü için aranan fiziksel özellikler arasında en çok Los Angeles Parçalanma (L_A) direnci olmakla birlikte Türkiye dahil bir çok ülke buna ilave olarak Mikro Deval aşınma testi, Mağnezyum Sülfat Deneyi sonuçlarına da önem vermektedir. Birim hacim ağırlığı, su emme oranı da aranılan özellikler arasındadır.

Los Angeles deneyi için kullanılan tambur içindeki raflarda toplanan çelik bilyeler tambur döndükçe kayaç parçalarının üstüne düşerek darbe etkisiyle numunelerin kırılmasına neden olmaktadır (Meininger, 2004). Ancak Mikro-Deval deneyinde kullanılan tambur içinde daha küçük bilyeler kullanıldığı için yalnızca sürtünme etkisiyle numuneler aşındırılmaktadır. İlave olarak Mikro Deval deneyinde tambur içinde raf olmadığı gibi yaş ortamda gerçekleştirilmektedir.

Yapılan bilimsel çalışmalarda Mağnezyum Sülfat deneyi ile Mikro Deval aşınma deney sonuçları arasında anlamlı benzerlikler tespit edilmiştir (Rogers vd, 1991).

Kireçtaşının balast malzemesi olarak kullanılmasının uygun olmayacağına dair çalışmalar da bulunmaktadır. Buna gerekçe olarak, su ve neme karşı direncinin düşük olması nedeniyle balast amaçlı kullanımı tercih edilmesi halinde yumuşama ve parçalanmaya karşı zaaf göstereceği beklentisinin yüksek olmasıdır (Lim, 2004). Ancak malzeme sıkıntısı olduğu durumlarda Portekiz-Lizbon örneğinde olduğu gibi kireçtaşı balast malzemesi olarak kullanılmıştır (Paixão vd, 2011).

Şekil 1. Demiryolu en kesiti ve balast kullanımı



Kaynak: (Sevil, 2023)

Tablo 2. Farklı ülkelerdeki balast malzemesine ait istenen limit değerler

Ülke	LA Testi	MDA Testi	MgSO ₄ (Dona Dayanıklılık)
Avustralya (AS 1141)	25	-	-
Kanada	20-30	-	7-10
İngiltere (BS EN 13450)	20	7	-
ABD (AREMA)	25-40	-	5
Almanya (BS EN 13450)	8,7-9,5	10,3-13,8	-
Hindistan (IRS-GE-1)	30-35	-	-
İran (IR 301)	30	10-14	5

Tablo 3. TCDD balast teknik şartnamesine göre yapılması gerekli deney ve standartlar

Standart	Deneyin Adı
Los Angeles Aşınma Dayanımı (Parçalanma Direnci Tayini)	TS EN 1097-2
Su Emme Oranı	TS EN 1097-6
Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Micro Deval)	TS EN 1097-1
Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6
MgSO ₄ (Dona Dayanıklılık)	TS EN 1367-2

Tablo 4 . TCDD balast şartnamesine göre balasttan beklenen fiziksel özelliklerin sınır değerleri

Deneyin Adı	Konvansiyonel Demiryolu Hattı Sınır Değerleri	Hızlı Tren-YHT Hatları Sınır Değerleri
Los Angeles Aşınma Dayanımı (Parçalanma Direnci Tayini)	$\leq \% 20$	$\leq \%14$
Su Emme Oranı	$\leq \%2$	$\leq \%1,50$
Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Micro Deval)	≤ 14	$\leq \%12$
Tane Yoğunluğu	$\geq 2,50 \text{ Mg/m}^3$	$\geq 2,60 \text{ Mg/m}^3$
MgSO ₄ (Dona Dayanıklılık)	$\leq \%5$	$\leq \%3$

Orta Karadeniz’de Bazı Kayaçların Özellikleri

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından Karadeniz Bölgesinde Samsun- Sarp sınır kapısı arasında (YHT) hattı yapılmasının planlandığı ve yatırım programına alındığı bilinmektedir.

Şekil 2. Samsun-Sarp arası planlanan (YHT) hattı

PLANLANAN ÖNEMLİ PROJELER

47

**KARADENİZ SAHİL DEMİRYOLU
(SAMSUN-HOPA-SARP)**

Başlangıç/Bitiş Tarihi	Proje Bedeli
2024 / 2025	73,94 Milyon TL

Toplam Uzunluk	Tasarım Hızı	İstasyon Sayısı	Viyadük Adedi
509 Km	250 Km/Sa	23 Adet	49 Adet 25 Km



Kaynak: (TCDD, 2025)

Aşağıda Samsun'un bazı ilçeleri ile Ordu/Fatsa ilçesindeki bazalt ve kalker kayalarına ait özellikler Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5 . Orta Karadeniz’de bazı bazalt kayaçların fiziksel özellikleri

Deneyin Adı	Atakum	Ayvacık	Fatsa
Los Angeles Aşınma Dayanımı (Parçalanma Direnci Tayini) % 20		%15	%14
Su Emme Oranı	%0,40	%2,15	%1,50
Micro Deval	≤ 14		≤ %12
Tane Yoğunluğu	2,70 Mg/m ³	2,67 Mg/m ³	2,67 Mg/m ³
MgSO ₄ (Dona Dayanıklılık) %4		%16	%23,8

Tablo 5’den de görüldüğü gibi özellikle Fatsa ve Çarşamba/Ayvacık bazalt agregasının su emme oranları yüksektir.

Tablo 6. Samsun’un iki ilçesindeki kalker kayacının fiziksel özellikleri

Deneyin Adı	Kavak	Bafra
Los Angeles Aşınma Dayanımı (Parçalanma Direnci Tayini)	% 22	%18
Su Emme Oranı	%0,20	%0,40
Micro Deval	≤ 14	
Tane Yoğunluğu	2,70 Mg/m ³	2,72 Mg/m ³
MgSO ₄ (Dona Dayanıklılık)	%2	%5

Kaynak: (Çakoğlu, 2021)

Sonuçlar

İncelenen taş ocaklarından hiçbiri YHT (yüksek hızlı tren) güzergahında kullanılacak balast malzemesi için istenen teknik özellikleri sağlamamaktadır. Los Angeles parçalanma direnci, su emme oranı, magnezyum sülfat deneyi, birim hacim ağırlığı gibi kriterlerden en az biri bazalt ya da kalker menşeli malzemelerde yeterli özellikleri taşımamaktadır. Konvansiyonel tren hattı için uygun görülebilir.

Mikro Deval test sonuçları ile magnezyum sülfat deney sonuçları arasında uyum olduğuna dair çalışma olması söz konusu güzergahta YHT için yeni bir çözüm şekli ortaya konabileceğini göstermektedir. Magnezyum sülfat deneyi (dona dayanıklılık) deney sonuçları istenilen değerlerde olan kayaçların kullanılabilmesi için -yağışlar ve soğuğa dayanım özellikleri de dikkate alınarak- daha detaylı test sonuçları ile kullanılabilirliği araştırılmalıdır. En azından bazalt ya da kalker her iki tür kayaç da birim hacim ağırlığı asgari istenenin üzerindedir.

Kaynakça

Beyhan G., (1992). *Havza ile Ladik arasındaki bölgenin paleomagnetizması*. Y.Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi

Çakoğlu A.H.,(2021). *Samsun ve Çevresindeki İllerde Yar Alan Kaya Birimlerinden Elde Edilen Agregaların Beton Performansına Etkisi*, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun

Hakyemez, (1989). *Çarşamba (Samsun) dolayının jeolojisi*. MTA Derleme Raporu No:8895, Ankara

Keskin,İ., (1999). *Ünye-Fatsa-Kumru-Korgan (Ordu ili) dolayının jeolojisi*. Ankara: MTA Derl.Raporu

Kozak M. (2024). Işıkkara (Kütahya) Bazaltlarının Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliği, *Demiryolu Mühendisliği*, 25-30, Temmuz 2024

Lim WL, *Demiryolu balast davranışının mekaniği*, Nottingham Üniversitesi, 2004

Meininger R., (2004).*Micro-Deval vs. L.A. abrasion*. Rock Prod., April, s. 33-35.

Öztürk,A., (1979). Ladik, Destek dolayının stratigrafisi. Ankara, Türkiye Jeolojisi Kurumu Bült., 22/1.

Paixão A., Fortunato E., Fontul S., Martins F., (2011) Alt balast tabakası için inşaat optimizasyonunda bir vaka çalışması, 11. *Uluslararası Demiryolu Mühendisliği Konferansı Bildirileri*

Rogers C. A., Bailey M. L., Price B., (1991). Micro Deval test for evaluating the quality of fine aggregate for concrete and asphalt. Trans. Res. Rec., No. 1301, s. 68-76.

Sevil E. (2023). Raylı Sistemlerde Üstyapı Elemanları Karabük Üniversitesi Yayınları-89, Editör Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin Akay, ISBN:978-605-9554-82-4

TCDD (2025). <https://www.tcdd.gov.tr/haberler> (Erişim Tarihi: 01.02.2025).

TS EN 1097-1 (2011). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- deval), , TSE, Ankara.

TS EN 1097-2. (2020). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2, , TSE, Ankara

TS EN 1097-6. (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, TSE, Ankara.

TS EN 1367-2,. (2011). Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: magnezyum sülfat deneyi, TSE, Ankara

Yoldaş, R.,(1985). *Samsun ve dolayının (Kızılırmak-Yeşilirmak arasındaki bölge) jeolojisi ve petrol olanakları*, Ankara, MTA Derleme Raporu No:8130

Tuncay, E.B., (2014). *Isparta yöresinde yer alan kaya birimlerinden elde edilen agregaların beton performansına etkisi*. Doktora Tezi, SDÜ, Isparta

2020/565831 İhale Kayıt Numaralı “Ankara-Kayseri hattı km 190+760 da köprü yapılması ve km 190+000 ile km 191+000 arası güzergahın deplase yapılması”, <https://ekap.kik.gov.tr/EKAP/Ortak/IhaleArama/index.html>, 16.11.2020

2020/384731 İhale Kayıt Numaralı “Çorlu istasyonuna
5.000 m³ balast alım işi balast teknik şartnamesi,”
<http://www.tcdd.gov.tr/ihale-detay/4397>, 12.08.2020.

DEPREM VE GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

