

Yapı ve Altyapı Sistemlerinde

Güncel Araştırma ve Uygulamalar



Editör
ONUR SARAN



BİDGE Yayınları

Yapı ve Altyapı Sistemlerinde Güncel Araştırma Ve Uygulamalar

Editör: ONUR SARAN

ISBN: 978-625-8567-53-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

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.

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



ÖNSÖZ

İnşaat mühendisliği, yapı ve altyapı sistemlerinin güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir biçimde tasarlanmasını amaçlayan çok disiplinli bir mühendislik alanıdır. Günümüzde artan deprem riski, hızlı kentleşme ve çevresel etkiler, mühendislik problemlerinin daha bütüncül ve bilimsel yaklaşımlarla ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu kitap, yapı ve altyapı mühendisliği alanında yürütülen güncel araştırmaları bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Eserde; kuvvetli yer hareketlerinin yapısal davranış üzerindeki etkileri, betonarme sistemlerde yapısal düzensizlikler, zemin iyileştirme uygulamaları, yeni malzeme teknolojileri ve farklı mühendislik sistemlerine yönelik analiz yaklaşımları ele alınmaktadır. Ayrıca, mühendislik bilimine katkı sağlamış önemli akademik isimlerin çalışmaları ve etkileri de incelenmektedir.

Kitapta yer alan bölümler, güncel literatür ve bilimsel yöntemler ışığında hazırlanmış olup; akademisyenler, araştırmacılar ve lisansüstü öğrenciler için faydalı bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Dr. Öğr. Üyesi ONUR SARAN

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

YAKIN FAY KUVVETLİ YER HAREKETLERİ	1
<i>ZAFER KANBİR</i>	
FARKLI DOLGU DUVAR TİPLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELERDE KISA KOLON DAVRANIŞINA ETKİSİ	19
<i>ALPER ÖZMEN</i>	
GEOPOLİMERLERİN ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARINDA KULLANIMI	36
<i>SAADET GÖKÇE GÖK, ONUR YAVAN</i>	
METASEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİNİN SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNE UYGULANMASI	73
<i>VELİ BATMAZ</i>	
SİĞALOV EMMANUEL YEVSEYEVİÇ'İN HAYATI, YAPI MÜHENDİSLİĞİ'NE KATKILARI VE TÜRKİYE'DEKİ AKADEMİK ETKİSİ	94
<i>KANAT BURAK BOZDOĞAN</i>	

BÖLÜM 1

YAKIN FAY KUVVETLİ YER HAREKETLERİ

ZAFER KANBİR¹

Giriş

Yer kabuğunu oluşturan tektonik plakaların sürekli hareketi, dünya üzerinde sık ve büyük depremlerin meydana gelmesini kaçınılmaz kılmaktadır (Stein & Klosko, 2002). Hem tarihsel dönemde hem de aletsel dönemde çok yıkıcı depremler meydana gelmesine rağmen, tarihsel depremlerin şiddeti ve sebep olduğu hasarlar gibi sınırlı bilgiye ulaşılabilirken, aletsel dönemde deprem yer hareketlerinin kaydedilebilmesi mühendislere çok önemli bilgiler sunmaktadır. Bunlar arasında, yakın fay yer hareketleri olarak tanımlanan depremler özellikleri de yer alır. Yakın fay yer hareketleri, hız–zaman kayıtlarında uzun periyotlu ve nispeten yüksek genlikli puls (*pulse; itki/darbe*) içeren kuvvetli yer hareketleri olarak tanımlanmakta olup, çoğunlukla fay kırığına ilk 20 km mesafedeki bölgelerde kaydedilmektedir (Mavroeidis & Papageorgiou, 2002; Bray & Rodriguez-Marek, 2004). Yakın fay etkileri, kuvvetli yer hareketi kayıtlarında görülen belirgin hız pulslarının yanı sıra, spektral büyütme ve büyük kalıcı yerdeğiştirmeler ortaya çıkarabilmektedir. Yakın fay depremlerinin

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5835-0669

bu özellikleri, araştırmacılar tarafından ilk kez yaklaşık 60 yıl önce, kaydedilmiş yer hareketleri üzerinde fark edilmiştir (Yadav & Gupta, 2017; Mavroeidis, Dong & Papageorgiou, 2004). Buna rağmen, büyük depremlerin çok sık meydana gelmemesi ve kuvvetli yer hareketi kayıt cihazlarının seyrek dağılmış olması nedeniyle uzun yıllar boyunca yakın fay deprem kayıtlarının sayısı bilimsel çalışmalar için yeterli olmamıştır (Hall & ark., 1995). 1999 yılında Türkiye’de meydana gelen Kocaeli ve Düzce depremleri ile Tayvan’da meydana gelen Chi-Chi depreminin çok sayıda modern kayıt cihazı tarafından kaydedilmesi yakın fay yer hareketleri veri tabanını yaklaşık on kat genişleterek bu alanda önemli bir bilgi birikimi sağlamıştır (Roblee, Chiou & Riemer, 2002).

Yakın fay yer hareketleri mühendislik yapıları üzerinde ciddi bir hasar potansiyeli de taşımaktadır. Bu etkilerinin yapılar üzerindeki sonuçları ilk kez Bertero ve arkadaşları (1978) tarafından kapsamlı biçimde tartışılmış, 1971 San Fernando Depreminde gözlemlenen hasar deprem kayıtlarındaki yakın fay etkileriyle ilişkilendirilmiştir. Ancak geniş mühendislik camiasında yakın fay pulslarının yıkıcı potansiyeli, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinden sonra daha net biçimde kabul görmüş ve özellikle uzun periyotlu sistemlerin tasarımında bu etkilerin dahil edilmesi gerekliliği üzerinde durulmuştur (Mavroeidis & Papageorgiou, 2003; Mavroeidis, Dong & Papageorgiou, 2004).

Şehirleşmenin artması ve yapı teknolojilerinin gelişmesi ile son dönemlerde yüksek binalar, sismik taban yalıtımlı binalar ve asma köprüler gibi yapıların yaygınlaşması uzun titreşim periyotlu yapıların mevcudiyetini arttırmıştır. Bu yapıların uzun periyotlu hız pulslarına karşı son derece hassas olmaları nedeniyle yakın fay depremlerine olan ilgi son dönemlerde artmıştır. (Soyluk & Karaca, 2021; Torghabeh, Tehranizadeh & Taslimi, 2023; Kanbir & ark., 2024). Özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri nedeniyle çok sayıda yüksek yapının yıkılması ve bu yapıların birçoğunun

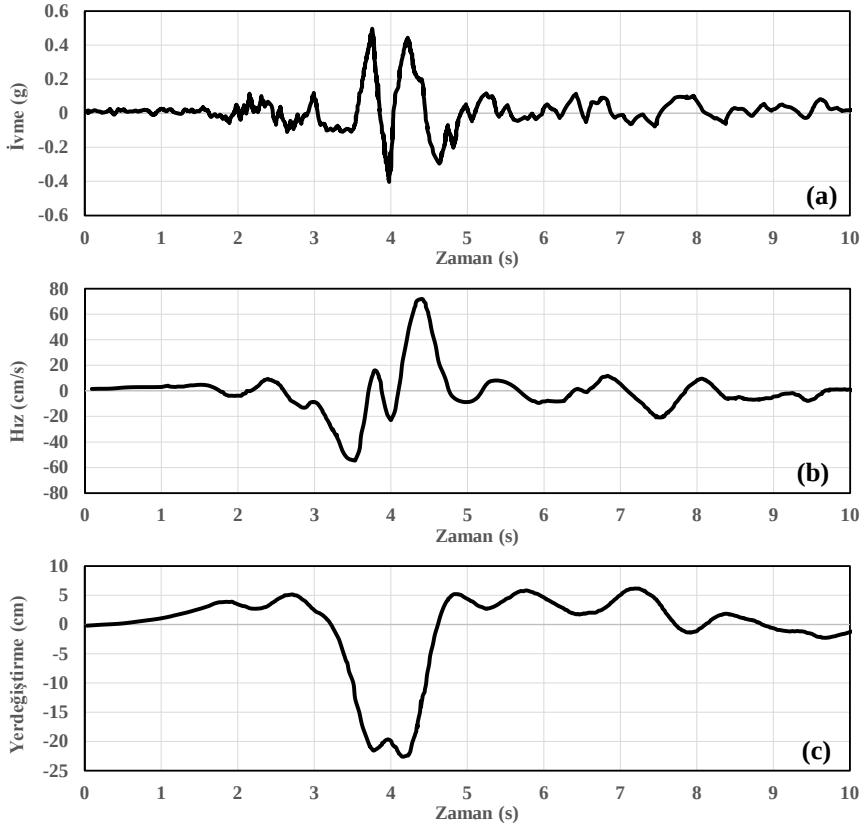
yıkılma sebebinde yakın fay deprem kayıtlarının etkili olduğunu gösteren çalışmalar bulunması (Kazaz, Bilge & Gürbüz, 2024; Akinci & ark., 2025; Damcı & ark., 2025; Smyrou, Vuran & Bal, 2025) konunun önemini daha da arttırmıştır.

Yakın fay davranışının tam olarak anlaşılması, geçmiş yer hareketi kayıtların incelenmesinin yanı sıra, fay kinematığı, dalga yayılımı ve mühendislik yapılarına etkileri gibi konuların değerlendirilmesiyle mümkündür. Bu bölümde yakın fay depremlerinin oluşumu, karakteristik özellikleri ve yapısal sistemlerdeki kritik etkileri ortaya konmaktadır.

Yakın Fay Yer Hareketlerinin Özellikleri

Özellikle hız zaman geçmişlerinde ortaya çıkan yüksek genlikli ve uzun periyotlu, bir başka deyişle düşük frekanslı pulsar nedeniyle uzak fay karakteristiklerinden belirgin biçimde ayrılan deprem kayıtları yakın fay yer hareketi kayıtları, bu tür kayıtlar üreten depremler de yakın fay depremleri olarak tanımlanmaktadır. Yakın fay depremlerinin araştırmacılar tarafından tespit edilerek tanımlanması, deprem mühendisliği için çok da uzak olmayan bir geçmişe, günümüzden yaklaşık 60 yıl öncesine dayanmaktadır. Yakın fay deprem kayıtlarının imzası olarak tanımlanabilen büyük genlikli pulsarın literatürdeki ilk kapsamlı tanımlaması, 1966 Parkfield Depreminde Cholame’de bulunan 2 numaralı istasyonun hız ve yerdeğiştirme (deplasman) kayıtları üzerinde Housner ve Trifunac (1967) tarafından yapılan analizlerle gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kayıt, fay kırığına yaklaşık 61 metre (200 feet) uzaklıkta kaydedilmiş olması ve uzun periyotlu ve aynı zamanda büyük genlikli hız pulsarının özelliklerini açıkça göstermesi bakımından yakın fay yer hareketlerinin anlaşılmasında kritik öneme sahiptir. Şekil 1’de gösterilen Cholame kaydına ait hız-zaman geçmişinde, yakın fay pulsarının tipik özellikleri açıkça görülmektedir. Bu kaydın pik (mutlak değerce en büyük) ivmesi, yer çekimi ivmesinin

Şekil 1. 1966 Parkfield Depremi Cholame Kaydı (a) İvme-Zaman, (b) Hız-Zaman ve (c) Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri



Kaynak: Veriler Housner & Trifunac, 1967'den uyarlanmıştır.

yaklaşık yarısı kadardır (0,5g). Pik yer hızı ve pek yer deplasmanları ise sırasıyla 68,58 cm/s ve 270 cm'dir. Ayrıca bu kayıta görülen belirgin hız pulsunun periyodu 1,5 saniye civarındadır (Housner & Trifunac,1967).

Yakın Fay Yer Hareketi Türleri

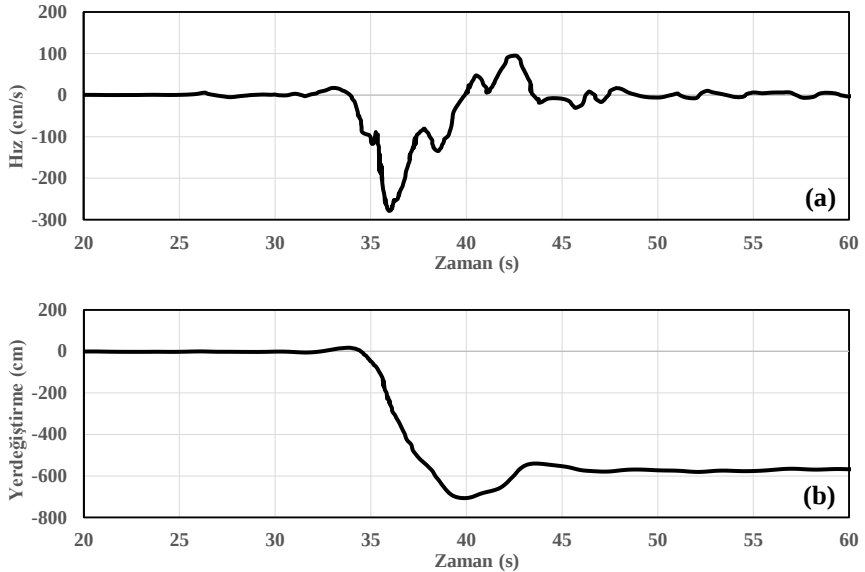
Yakın fay yer hareketleri kaynak kinematiği açısından iki temel mekanizma altında incelenmektedir: sıçrama adımı (*fling-step*) ve ileri yönelim (*forward-directivity*). Sıçrama adımı, hız-

zaman geçmişinde büyük genlikli, tek yönlü bir puls ve yerdeğiştirme-zaman geçmişinde monoton bir sıçrama ile karakterize edilir. Bu etki, deprem nedeniyle yüzeyde oluşan kalıcı yerdeğiştirmelerin bir sonucudur. İleri yönelim etkisi ise, bir deprem sırasında fay kırılmasının bir noktaya doğru ilerlemesiyle ortaya çıkan ve yakın fay bölgelerindeki zemin hareketlerinin genliğini ve süresini önemli ölçüde etkileyen bir olgudur. Özellikle fay doğrultusuna dik bileşenlerde yoğunlaşan ileri yönelim etkileri esnek yapılarda hasar potansiyelini arttırmaktadır.

Sıçrama Adımı

Sıçrama adımı etkisi, kaynakta meydana gelen kalıcı yerdeğiştirme bileşeninin kayıtlara tek yönlü bir ötelenme ve buna karşılık gelen yüksek genlikli, düşük frekanslı bir hız pulsı olarak yansımasıyla karakterizedir. Bu etki eğim atımlı faylarda fay-normal

şekil 2. 1999 Chi-Chi Depremi TCU-068 EW Kaydı (a) Hız-Zaman ve (b) Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri



Kaynak: Veriler Wang & ark., 2002'den uyarlanmıştır.

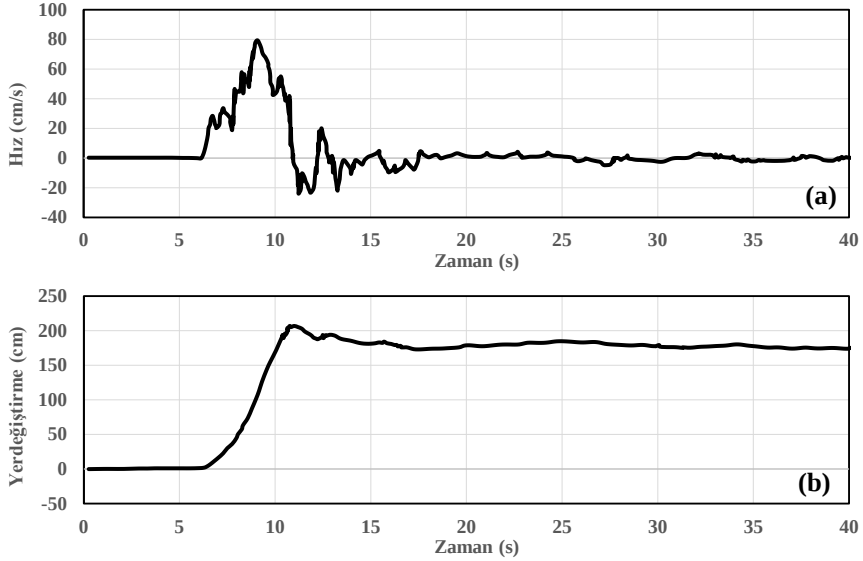
(*fay düzlemine dik*) doğrultuda gözlenmektedir. 1999 Chi-Chi depreminin TCU-068 istasyonundaki kaydının E-W (*Doğu-Batı*) bileşeni bu etkinin eğim atımlı faylardaki çarpıcı örneklerinden biridir (Mavroeidis & Papageorgiou, 2003). Şekil 2’de bu kuvvetli yer hareketinin fay-normal yöndeki (E-W) kaydına ait hız ve yerdeğiştirme grafikleri gösterilmektedir. Bu çarpıcı örnekte hız pulsunun genliği 300 cm/s’ye yaklaşırken, sıçrama adımı etkisiyle yaklaşık 600 cm’lik kalıcı bir yerdeğiştirme ortaya çıkmıştır.

Sıçrama adımı etkisi doğrultu atımlı faylarda ise genellikle faya paralel bileşende görülmektedir. Bunun en önemli örneklerinden biri 1999 Kocaeli Depreminin Sakarya istasyonundaki kaydın E-W bileşenidir. (Kalkan, Adalier & Pamuk, 2004; Kalkan & Kunnath, 2006). Doğu-Batı yönündeki Kuzey Anadolu Fayı’na paralel olan bu yerdeğiştirme kaydında görülen yaklaşık 2 metrelik monotonik sıçrama dikkat çekicidir. Kocaeli Depremi Sakarya kaydının E-W bileşenine ait hız ve yerdeğiştirme grafikleri Şekil 3’te gösterilmiştir.

İleri Yönelim Etkisi

İleri yönelim etkileri, fay kırığının sahaya doğru zeminin kayma dalgası hızına eşit ya da buna yakın bir hızla ilerlemesi durumunda ortaya çıkar. Bu etki, fay kırığı ile aynı yönde hareket eden gerilim dalgalarının bir araya gelerek toplanmasına ve depremden kaynaklanan sismik enerjinin büyük bir kısmının genellikle tek, büyük genlikli ve nispeten uzun periyotlu bir puls şeklinde hedefe ulaşmasına neden olur (Somerville & ark., 1997; Makris, 1997). İleri yönelim etkisi, zemin hareketinin hem genliğini hem de süresini önemli ölçüde değiştirir. Faydaki kayma yerdeğiştirmesinin yayılım şekli nedeniyle, bu büyük pulsalar, fay-normal (*fay düzlemine dik*) şekilde yönlendirilir. Bu durum, yer hareketinin fay-normal bileşeninin fay-paralel bileşenden sistematik

Şekil 3. 1999 Kocaeli Depremi – Sakarya İstasyonu E-W Kaydı (a) Hız-Zaman ve (b) Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri

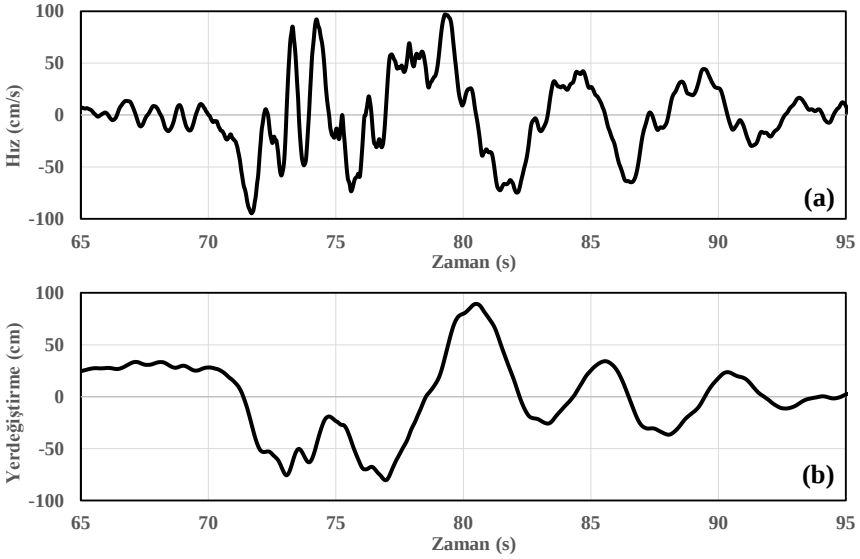


Kaynak: Veriler Durukal, 2022'den uyarlanmıştır.

olarak daha büyük ve şiddetli olmasına neden olur (Alavi & Krawinkler, 2001; Somerville, 2005). Kırılmanın istasyondan uzaklaşması durumunda görülebilen geriye yönelim etkileri ise düşük şiddetli olmaları ve belirgin puls içermemeleri sebebiyle mühendislik açısından ikinci plandadır (Somerville & ark., 1997).

Doğrultu atımlı faylarda görülen ileri yönelim etkisinin en son çarpıcı örnekleri 2023 Kahramanmaraş Pazarcık Depreminde kaydedilmiştir. Özellikle Hatay Antakya'daki 3124 istasyonu kaydında, sıçrama adımının tipik özelliği olan kalıcı yerdeğiştirme olmaksızın, hız zaman geçmişinde görülen büyük genlikli pulsar, ileri yönelim etkisinin ortaya çıktığını göstermektedir (Chang & ark., 2025; Wu & ark., 2023). Şekil 4'te 3124 kaydının fay-normal doğrultuya çok yakın doğrultudaki Doğu-Batı (E) doğrultusu hız ve yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Burada art arda görülen 100 cm/s ye kadar çıkan büyük genlikli ve uzun periyotlu çok sayıda hız

Şekil 4. 2023 Pazarcık Depremi 3124 İstasyonu (a) Hız-Zaman ve (b) Yerdeğiştirme-Zaman Grafikleri



Kaynak: Veriler tadas.afad.gov.tr'den alınmıştır.

pulsu, bu depremde ileri yönelim etkilerinin ne kadar baskın olduğunu göstermesi bakımından da önemlidir. Grafikler, Afet ve Acil Durum Başkanlığı (AFAD) Deprem Dairesi Başkanlığı'nın paylaştığı işlenmiş veriler kullanılarak çizilmiştir (TADAS).

Yakın Fay Yer Hareketlerinin Yapısal Sistemler Üzerindeki Etkileri

Yakın fay kuvvetli yer hareketleri, uzun periyotlu ve yüksek genlikli pulsar içeren doğaları gereği, yapıları alışlagelmiş deprem kayıtlarına göre çok daha büyük yerdeğiştirme ve süneklik talepleriyle karşı karşıya bırakırlar. Puls periyodu yapının doğal titreşim periyoduna yaklaştığında yapısal tepki ve hasar potansiyeli en üst düzeye çıkar (Tirca, Foti, & Diaferio, 2003). Bu tür yer hareketleri, ivme spektrumunun uzun periyot bölgesindeki değerlerini önemli ölçüde artırır ve bazı durumlarda orta büyüklükteki depremlerin yakın fay spektral değerleri, daha büyük

depremlerin faya uzak kayıtlarındaki değerlerini aşabilir (Somerville, 2005; Kalkan & Kunnath, 2006). Bu durum, özellikle serbest titreşim periyodu uzun olan yapılar üzerinde bu tür yer hareketlerinin hasar potansiyellerinin yüksek olmasına yol açar.

Yakın fay özelliği gösteren yer hareketlerinin yapılar üzerindeki yıkıcı etkileri günümüze kadar dünya çapında birçok depremde görülmüştür. Her ne kadar yakın fay pulsları ilk kez 1966 Parkfield Depremi Cholame istasyonundaki kaydında fark edilmiş olsa da bu istasyonun yakınında puls etkisene maruz kalacak bir yapı olmaması nedeniyle (Housner & Trifunac, 1967) bu depremde yakın fay etkileri ile yapısal hasarlar arasında bir bağ kurulamamıştır. Bu bağın kurulması ilk kez, Parkfield depreminden beş yıl sonra meydana gelen San Fernando Depreminde mümkün olmuştur. Bertero ve arkadaşları (1978) tarafından yapılan çalışmada, 1971 yılında Kaliforniya'nın San Fernando kentinde meydana gelen depremde Olive View Hastanesi'nin uğradığı hasar, yakın fay yer hareketlerinin esnek yapılar üzerinde etkisine bağlanmıştır. Hasarın, çok sayıda salınımdan ziyade, sadece birkaç büyük yerdeğiştirme hareketinden kaynaklandığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, deprem hasarını yakın fay yer hareketlerinin titreşim özellikleri ile ilişkilendiren ilk çalışma olması bakımından önemlidir (Makris, 1997).

1992 yılında meydana gelen iki büyük deprem, Erzincan ve Landers depremleri yakın fay yer hareketleri ile yapısal hasar arasındaki ilişkiyi göstermesi bakımından önemlidir. Bu depremler farklı tektonik ortamlarda gerçekleşmiş olsalar da yer hareketi özellikleri ve hasar mekanizmaları açısından çok önemli ortak noktalara sahiptir. 1992 Erzincan Depreminde elde edilen kuvvetli yer hareketi kaydı sayısı çok sınırlı olmasına rağmen fay kırığına oldukça yakın olan Erzincan istasyonundaki kayıta yakın fay depremlerinin en önemli işareti olan hız pulsu açıkça görülebilmektedir (Türker & ark., 2022). Bu durum, bu depremde

meydana gelen yaygın yapısal hasarlarda yakın fay depremlerinin yıkıcı etkisinin rol oynadığını göstermektedir (Kalkan, Adalier & Pamuk, 2004). Aynı yıl Kaliforniya’da meydana gelen Landers depremi de yakın fay özelliklerinin öne çıktığı bir deprem olarak tanımlanmaktadır (Bray & Rodriguez-Marek, 2004). Her ne kadar, depremin etkilediği bölgedeki tesis sayısı az olması nedeniyle hasar sınırlı olsa da bazı yapılar ağır hasar görmüştür (Lazarte & ark.,1994).

Bu depremlerde yakın fay yer hareketlerinin yapılar üzerindeki etkileri tespit edilmiş olsa da mühendislik camiası üzerinde yaygın farkındalık oluşmamıştır. Mühendislerin çoğunun, büyük kentlere yakın faylarda meydana gelen depremlerin sonucu olarak, yakın fay yer hareketlerinin kentsel altyapı, özellikle uzun doğal titreşim periyoduna sahip yapılar üzerinde yarattığı ciddi etkilerin ve yıkıcı potansiyelin farkına varması ancak 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinden sonra gerçekleşmiştir. Bu depremlerde faya çok yakın bölgelerdeki modern çelik ve betonarme binaların, yönetmeliklere uygun olmalarına rağmen puls içeren deprem hareketi etkisi altında beklenmedik hasarlar aldığı görülmüştür. Bu dönüm noktasından sonra yakın fay etkilerini mühendislik tasarımına dâhil etmek için yöntemler araştırılmaya başlanmıştır (Mavroeidis & Papageorgiou, 2003; Mavroeidis, Dong & Papageorgiou, 2004).

1999 yılı, yakın fay etkilerinin ciddi yıkıma neden olduğu üç büyük depremin yaşanmasıyla bir başka önemli tarih haline gelmiştir. Türkiye’de, doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fayı üzerinde meydana gelen 1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri büyük çapta mal ve can kaybına sebep olmuştur. Şekil 3’teki Sakarya kaydı örneğinde de görüldüğü gibi, Kocaeli Depreminin birçok kaydında yakın fay etkileri göze çarpmaktadır. Burada görülen sıçrama adımı o kadar etkili olmuştur ki, birçok yapının ciddi hasar görmesi yanında park halindeki tamamen yüklü bazı kamyonlar faya paralel doğrultuda

devrilmiştir (Kalkan, Adalier & Pamuk, 2004). Tayvan’da meydana gelen 1999 Chi-Chi Depremi ise tamamen farklı karakteristikte olan eğim atımlı bir fayda meydana gelen yakın fay depremlerinin çok çarpıcı bir örneğidir. Şekil 2’de gösterilen TCU-068 E-W kaydı örneğinde görüldüğü gibi çok büyük ölçekli kalıcı yerdeğiştirmeler ve çok yüksek genlikli hız pulsarı kayda geçmiştir. O güne kadar dünya çapında kaydedilen en büyük yer hızı ve yer deplasmanının sırasıyla 292 cm/s ve 867 cm olarak kaydedildiği depremde 53.551 bina tamamen, 53.633 bina ise kısmen yıkılmıştır (Wang & ark., 2002).

Yakın fay depremlerinin en son yıkıcı örnekleri ise 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri olmuştur. Hem $M_w=7,7$ büyüklüğündeki Pazarcık Depremi, hem de $M_w=7,6$ büyüklüğündeki Elbistan Depremi kayıtlarında yakın fay depremlerinin tipik özelliği olan hız pulsarı belirgin olarak ortaya çıkmıştır (Damcı & ark., 2025; Chang & ark., 2025). Ayrıca bu depremlerin özellikle Hatay Antakya'daki birçok kaydına ait tepki spektrumlarında, 1,0 saniye gibi uzun periyotlarda büyütme görülmüş ve bunun sebebinin yerel zemin koşullarının yanı sıra yakın fay etkileri olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, özellikle titreşim periyodu uzun olan Altınpark Sitesi Blokları ve Rönesans Rezidans gibi yüksek binaların devrilerek yıkılmasında yakın fay koşullarının etkili olduğunu göstermiştir (Kazaz, Bilge & Gürbüz, 2024; Damcı & ark., 2025)

Değerlendirme ve Sonuç

Bu bölümde, yakın fay kuvvetli yer hareketlerinin oluşum mekanizmaları, karakteristik özellikleri ve yapılar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle hız-zaman geçmişlerinde ortaya çıkan büyük genlikli ve uzun periyotlu pulsar ile ayırt edilen yakın fay yer hareketlerinin yapısal sistemlerin sismik tepkisini belirgin biçimde etkilediği literatürdeki temel çalışmalar üzerinden aktarılmıştır.

Sıçrama adımı ve ileri yönelim etkileri, farklı fay tipleri ve kırılma senaryoları bağlamında ele alınmış; bu mekanizmaların yer hareketi bileşenleri üzerindeki yansımaları örnek kayıtlar üzerinden açıklanmıştır.

Yakın fay yer hareketlerinin mühendislik açısından en kritik sonucu, yapıları alışlagelmiş uzak fay deprem hareketlerine kıyasla çok daha büyük yerdeğiştirme ve süneklik talepleriyle karşı karşıya bırakmasıdır. Özellikle puls periyodunun yapının doğal titreşim periyoduna yaklaşması durumunda, yapısal tepkinin önemli ölçüde büyüdüğü ve hasar potansiyelinin arttığı bilinmektedir. Bu durum, uzun periyotlu sistemler, yüksek binalar ve sismik yalıtımlı yapılar için yakın fay etkilerinin tasarım aşamasında özel olarak dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır.

Geçmiş depremlerden elde edilen veriler, yakın fay etkilerinin neden olduğu sismik taleplerin geleneksel tasarım spektrumlarıyla tam olarak temsil edilemediğini göstermektedir. Bu nedenle, modern deprem yönetmeliklerinde yakın fay etkilerine yönelik özel düzenlemelerin yer alması kaçınılmaz hale gelmiştir. Ancak, yakın fay etkilerinin karmaşık doğası göz önüne alındığında, bu etkilerin yönetmeliklerde tam ve eksiksiz biçimde temsil edilmesi hâlihazırda önemli bir mühendislik sorunu olmaya devam etmektedir.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, yakın fay kuvvetli yer hareketlerinin modern deprem yönetmeliklere uygun olarak tasarlandığı düşünülen binalarda da beklenmedik ve ağır hasarlara yol açabildiğini göstermiştir. Bu durum, mevcut deprem yönetmeliklerinde yer alan yakın fay düzenlemelerinin kapsamı ve yeterliliğinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle, doğası gereği uzun periyotlu olan yüksek binalar, taban yalıtımlı yapılar ve asma köprüler gibi yapıların tasarımında, yalnızca geleneksel tasarım spektrumlarına dayalı yaklaşımların yeterli olmayabileceği; yakın fay karakteristiklerini

yansıtan yer hareketlerinin ve bunlara bağılı özel tasarım kriterlerinin dikkate alınmasının önem taşıdığı görülmektedir. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı'nin (TBDY, 2018) ilk taslağında yer alan ancak son halinden çıkarılan faya yakınlık katsayısı gibi ilave tedbirlerin, deprem yönetmeliğinin güncellenmesi aşamasında tekrar dâhil edilmesi değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, yakın fay kuvvetli yer hareketlerinin deprem mühendisliğı açısından yalnızca ileri düzey bir araştırma konusu olmadığı, aksine, doğrudan tasarım ve yönetmelik geliştirme süreçlerini ilgilendiren temel bir konu olduğu söylenebilir. Bu tür yer hareketlerinin özelliklerinin doğru anlaşılması ve mühendislik tasarımına tutarlı biçimde yansıtılması, özellikle yakın fay etkileriyle karşılaşması muhtemel olan bölgelerde yer alan yapıların güvenliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, yakın fay etkilerinin deprem yönetmeliklerinde daha açık, sistematik ve mühendislik uygulamalarına yön gösterici biçimde ele alınması, gelecekte meydana gelebilecek büyük depremlerde can ve mal kayıplarının azaltılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY)*.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (n.d.). *Türkiye ivme veri tabanı ve analiz sistemi (TADAS)*. <https://tadas.afad.gov.tr>

Akinci, A., Dindar, A. A., Bal, I. E., Çelebi, M., Özcebe, G., & Akkar, S. (2025). Characteristics of strong ground motions and structural damage patterns from the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, Türkiye. *Natural Hazards*, 121, 1209–1239. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06856-y>

Alavi, B., & Krawinkler, H. (2001). *Effect of near-fault ground motions on the response of frame structures* (Report No. 138). The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.

Bertero, V. V., Mahin, S. A., & Herrera, R. A. (1978). Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(1), 31–42.

Bray, J. D., & Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815–828.

Chang, Z., Wu, H., Li, W., Yan, Z., Peng, L., & Zhu, G. (2025). Analysis of near-fault ground motions in the February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(4), 1349–1369.

Damcı, E., Temür, R., Kanbir, Z., Şekerci, Ç., & Köroğlu, E. Ö. (2025). Comprehensive investigation of damage due to 2023 Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye: Causes, consequences, and mitigation. *Journal of Building Engineering*, 99, 111420.

Durukal, E. (2002). Critical evaluation of strong motion in Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 589–609.

Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., & Wald, D. J. (1995). Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, 11(4), 569–605.

Housner, G. W., & Trifunac, M. D. (1967). Analysis of accelerograms—Parkfield earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57(6), 1193–1220.

Kalkan, E., Adalier, K., & Pamuk, A. (2004). Near source effects and engineering implications of recent earthquakes in Turkey. In *Proceedings of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (Paper No. 19).

Kalkan, E., & Kunnath, S. K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, 22(2), 367–390.

Kanbir, Z., Gazi, H., Davas, S. Ö., & Alhan, C. (2024). Yakın-fay puls modellerinin yalıtımlı binaların kurşun çekirdek ısınmasına bağlı davranışlarının belirlenmesindeki etkinliği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1), 243–260.

Kazaz, I., Bilge, İ. H., & Gürbüz, M. (2024). Near-fault ground motion characteristics and its effects on a collapsed reinforced concrete structure in Hatay during the February 6, 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş earthquake. *Engineering Structures*, 298, 117067.

Lazarte, C. A., Bray, J. D., Johnson, A. M., & Lemmer, R. E. (1994). Surface breakage of the 1992 Landers earthquake and its effects on structures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 547–561.

Makris, N. (1997). Rigidity–plasticity–viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions? *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(5), 571–591.

Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou, A. S. (2002). Near-source strong ground motion: Characteristics and design issues. In *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.

Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou, A. S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), 1099–1131.

Mavroeidis, G. P., Dong, G., & Papageorgiou, A. S. (2004). Near-fault ground motions and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(9), 1023–1049.

Roblee, C. J., Chiou, B. S., & Riemer, M. F. (2002). PEER-Lifelines research in design ground motions. In *Proceedings of the Third National Seismic Conference and Workshop on Bridges and Highways* (p. 177). MCEER.

Smyrou, E., Vuran, E., & Bal, İ. E. (2025). Uprooting collapse mechanism of RC structures in earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 110105.

Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68(1), 199–222.

Somerville, P. G. (2005). Engineering characterization of near-fault ground motions. In *Proceedings of the Planning and Engineering for Performance in Earthquakes Conference (NZSEE)*.

Soyluk, K., & Karaca, H. (2021). Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2).

Stein, S., & Klosko, E. (2002). Earthquake mechanisms and plate tectonics. *International Geophysics*, 81, 69–78.
[https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80210-8](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80210-8)

Tirca, L. D., Foti, D., & Diaferio, M. (2003). Response of middle-rise steel frames with and without passive dampers to near-field ground motions. *Engineering Structures*, 25(2), 169–179.

Torghabeh, A. B., Tehranizadeh, M., & Taslimi, A. (2023). Probability of collapse evaluation for high-rise reinforced concrete buildings in the event of near-fault earthquakes and soil–structure interaction effects. *Structures*, 55, 1675–1691.

Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., & Kömür, M. A. (2022). Seismic behavior of historical inclined minarets under near- and far-fault ground motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(11), 5866–5880.

Wang, G. Q., Zhou, X. Y., Zhang, P. Z., & Igel, H. (2002). Characteristics of amplitude and duration for near-fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(1), 73–96.

Wu, F., Xie, J., An, Z., Lyu, C., Taymaz, T., Irmak, T. S., Zhou, B., & others. (2023). Pulse-like ground motion observed during the 6 February 2023 Mw 7.8 Pazarcık earthquake (Kahramanmaraş, SE Türkiye). *Earthquake Science*, 36(4), 328–339.

Yadav, K. K., & Gupta, V. K. (2017). Near-fault fling-step ground motions: Characteristics and simulation. *Soil Dynamics and*

Earthquake Engineering, 101, 90–104.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.06.022>

BÖLÜM 2

FARKLI DOLGU DUVAR TİPLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELERDE KISA KOLON DAVRANIŞINA ETKİSİ

1. ALPER ÖZMEN ¹

Giriş

Türkiye’de yaşanan depremler sonrasında sahadaki uygulama hataları ve yönetmelik değerlendirmelerini yapmak üzere birçok gözlemsel hasar inceleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda birçok yapıda, yapının tümünün göçmediği ve lokal hasarların meydana geldiği görülmüştür. Bu lokal hasarların birçok farklı sebebi olmakla birlikte bunlardan en önemli olanlarında ve sıklıkla gözlemlenenlerinden biri de kısa kolon hasarlarıdır. Bu hasar tipinde, kolonların bazı mimari gerekçelerle serbest boylarının kısıtlandığı ve olduğundan daha rijit davranış göstermesine sebep olduğu bilinmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasında en önemli faktörlerden biri de betonarme çerçeveler içinde oluşturulan dolgu duvarlarda bant pencere boşluklarının bırakılmasıdır. Daha rijit davranan kolon tasarım dayanımının üzerinde kesme kuvvetine maruz kalmaktadır ve bu durumda serbest bırakılan kolon

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye ORCID: 0000-0003-1335-3780

bölümünde kesme hasarları meydana gelmektedir (Ghobarah & Galal, 2004:45–68; Tsantilis & Triantafillou, 2018:279–297). Kısa kolon davranışını gösteren çizim Şekil 1’ de verilmiştir.

Literatürde kısa kolonların oluşmasını önlemek için çok sayıda araştırma yapılmıştır (Cagatay, Beklen & Mosalam, 2010:523–532; Charleson, 2008:150). Dolgu duvarlarının kısa kolon oluşumu üzerindeki etkilerini deneysel olarak inceleyen çok sayıda çalışma da mevcuttur. Moretti ve ark. (2007:2018–2029) tarafından yürütülen bir çalışmada, sekiz çerçeve sisteminin sürekli yükler altında analizi yapılmıştır. Analizler, düşük kesme kapasitesine sahip çerçeveler için öneriler getirdi. Seki ve ark. (2018), betonarme çerçeveler için ucuz ve kolay uygulanabilir güçlendirme yöntemlerini deneysel olarak incelemiştir. Boş çerçeve, dolgu duvarı, ahşap çerçeveli dolgu duvarı ve çelik tel örgü ile kaplı dolgu duvarı olmak üzere beş farklı örnek, tersinir tekrarlı yük altında test edildi. Bulgular, özellikle tel örgü ile güçlendirilmiş dolgu duvarların taşıma gücünü dört kat artırdığını ve ahşap çerçeveli dolgunun sünekliği önemli ölçüde artırdığını gösterdi. Bunun yanı sıra kısa kolon etkisini sayısal olarak inceleyen çalışmalarda mevcuttur. Işık ve ark., (2023) eğimli zemin üzerine inşa edilmiş betonarme binalarda eğim etkisi kaynaklı kısa kolon etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda eğim kaynaklı kısa kolon etkisine maruz kolonlarda daha erken plastik mafsall oluşumu olduğu sonucuna varmışlardır. Caglar ve Mutlu (2013), kat seviyeleri arasında yükseklik farkı bulunan betonarme çerçevelerde oluşan kısa kolon etkisini sayısal olarak incelemiş ve seviye farkının kolon etkin yüksekliğini azaltarak kesme taleplerini belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Sia (2022) ise dolgu duvar konfigürasyonlarının kolon davranışına etkisini analiz ederek, özellikle bant pencere veya kısmi dolgu durumlarında kısa kolon davranışının ortaya çıktığını ve deprem sırasında kesme hasarının kısa kolonlarda yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Wu ve ark. (2022)

kısa kolon içeren çerçeveleri artımsal dinamik analiz ile değerlendirerek, klasik RC kısa kolonların zayıf kat oluşumuna ve erken gevrek hasara yol açtığını; ECC ile güçlendirilmiş kısa kolonların ise daha yüksek süneklik ve gelişmiş enerji tüketimi sağladığını sayısal olarak göstermiştir. Tunaboyu (2017), boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde kısa kolon davranışını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Sonuçlar, dolgu duvar malzemesi ve çerçeve geometrisine bağlı olarak kolonlarda ani kesme kırılmasının meydana gelebildiğini göstermiştir.

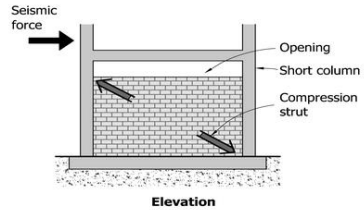
Literatür araştırmasından da görüldüğü üzere kısa kolon davranışının anlaşılması, hasarların iyileştirilmesi için birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ayrıca farklı değişkenlerin davranış üzerindeki etkisini araştıran sayısal çalışmalar da mevcuttur. Ancak dolgu duvar malzemesinin kısa kolon davranışını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada boşluklu tuğla ve gaz beton birimlerle oluşturulan duvarlarda bırakılan farklı ölçülerde bant pencerelerin kısa kolon davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve Abaqus Cae yazılımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Betonarme çerçevenin gerçek davranışı yansıttığından emin olmak için deneysel bir çalışma modellenerek sayısal modelin doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 1 Kısa kolon hasarının görsel açıklaması

a) Kısa kolon hasarı



b) Kısa kolon oluşum mekanizması

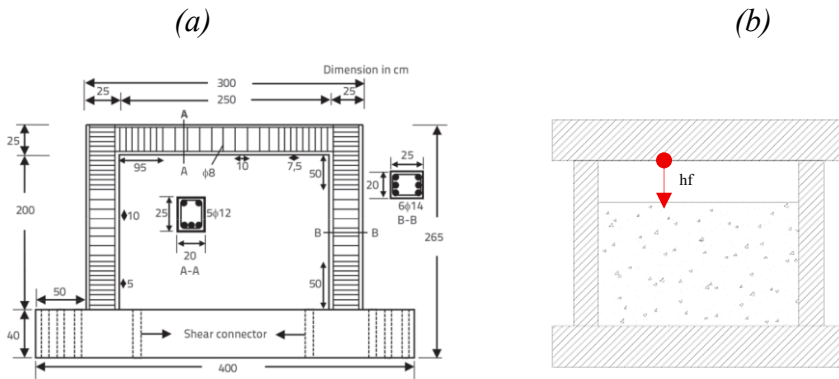


Kaynak: Cagatay, Beklen & Mosalam, 2010:523–532; Charleson, 2008:150

Sayısal Modelin Özellikleri

Analizlerde kullanılacak çerçevenin sonlu elemanlar modeli Abaqus Cae yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde kolon, kiriş ve duvarlar katı eleman ve donatılar truss eleman olarak modellenmiştir. Deneysel sistemin detayları Şekil 2’de sunulmuştur. Sayısal modelin doğrulanması amacıyla Arslan, (2013)’ ün yaptığı deneysel çalışmadaki çerçeve özellikleri kullanılmıştır.

Şekil 2 (a) Deneysel sisteme ait ölçüler ve donatı detayları (b) Bant pencere detayı

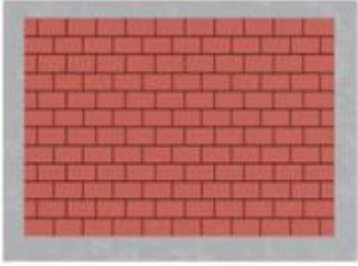


Kaynak: Arslan, 2013

Analizlerde hf boşluk miktarı, 0.5 m, 0.75 m, tam dolgu duvar olacak şekilde planlanmış ve her bir pencere boşluğu ölçüsü için farklı dolgu duvar tipi uygulanmıştır (boşluklu tuğla ve gaz beton). Yığma birimlere ait görseller Şekil 3’ de görülmektedir.

Şekil 3 Analizlerde kullanılan dolgu duvar tipleri

a) Boşluklu tuğla duvar

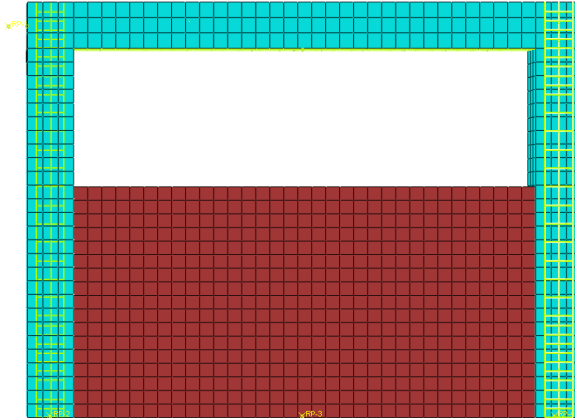


b) Gaz beton duvar



Sayısal modellerde çerçeve ve duvar tabanda ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Duvar ve betonarme çerçeve arasında literatürde önerilen kayma ve normal sürtünme temas özelliği dikkate alınmıştır. Normal yönde “hard contact” ve kayma yönünde penalty friction” özelliği kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı literatürde önerilen değerlere göre 0.65 olarak kullanılmıştır. Betonarme donatıları, beton içerisine tam gömülü (embed) olarak modellenmiştir. Ölü yükler sisteme dış yük olarak uygulanmıştır. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4’ de görülmektedir. Sistemde mesh boyutları 75-125 mm arasında dikkate alınmıştır.

Şekil 4 Sonlu elemanlar modeli (0.75 m boşluklu)



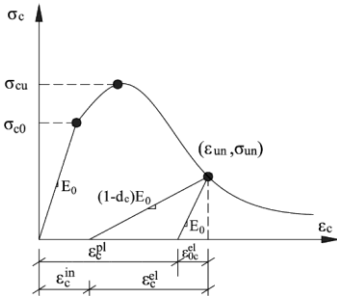
Beton ve dolgu duvarların davranışını modellemek amacıyla Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli kullanılmıştır. Betonun ve tuğla duvarın basınç ve çekme altında davranışları Şekil 5’ de verilmiştir. Yığma duvarın modellenmesinde harç ve taşları tek bir malzeme gibi dikkate alan makro modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Homojen malzeme özelliklerinin elde edilmesinde aşağıda verilen denklem kullanılmıştır.

$$f_{c,mas} = 0.6f_{c,sto}^{0.60}f_{c,mor}^{0.20}$$

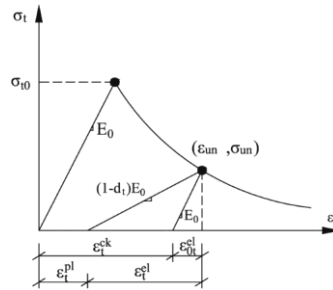
Denklemde $f_{c,mas}$ yığma birimin basınç dayanımı, $f_{c,sto}$ yığma birimin basınç dayanımı ve $f_{c,mor}$ harcın basınç dayanımıdır. Literatürdeki çalışmalardan elde edilen genel kanıya göre harcın basınç dayanımı 1 Mpa olarak dikkate alınmıştır. Tuğla için mekanik değerler ise Çelik, Özgür & Mercimek, (2025)’den alınmıştır. Gaz beton duvar için ise mekanik özellikler Luo, (2018)’ den alınmıştır. Çekme dayanımı için basınç dayanımını 1/20’ si dikkate alınmıştır. Elastisite modülünün hesabında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018)’ da verilen $750f_c$ formülü dikkate alınmıştır.

Şekil 5 CDP modelinde gerilme şekil değiştirme eğrisi

a) Basınç altında davranış



b) Çekme altında davranış



Kaynak: Dassault Systèmes, 2013

Sonlu elemanlar modelinde kullanılan lineer ve nonlineer malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. CDP modelinde dikkate

alınan betonun gerilme-şekil değiştirme davranışının elde edilmesinde Sia, (2022)' dan yararlanılmıştır.

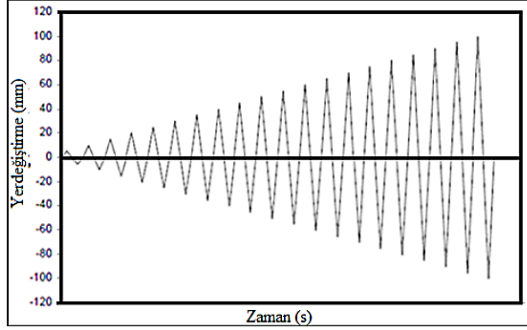
Tablo 1 Lineer ve nonlinear malzeme özellikleri

Eleman	E (MPa)	γ (N/mm ³)	ν		
Beton	24000	2.4e-9	0.20		
Tuğla duvar	1500	1.6e-9	0.21		
Gaz Beton	1000	1e-9	0.20		
Donatı	210000	7.85e-9	0.3		
Plastik Özellikler (CDP)					
	Dilatasyon açısı	Ekzantiriste	fb0/fc0	K	Viskozite
Beton	20	0.1	1.16	0.667	0.0005
Tuğla duvar	10	0.1	1.16	0.667	0.004
Gaz beton	20	0.1	1.16	0.667	0.005

Çerçeve Sayısal Modelinin Doğrulanması

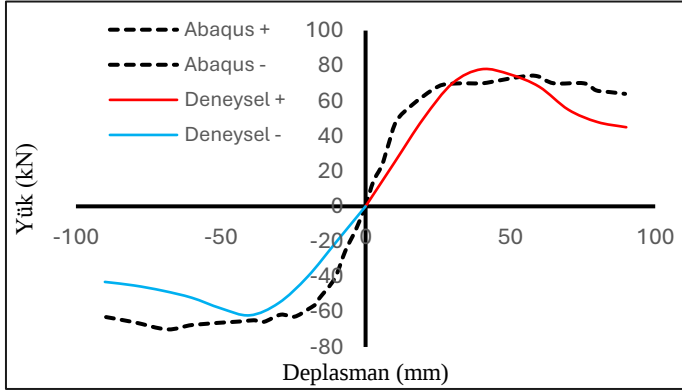
Duvarsız betonarme çerçevenin Abaqus sayısal modelinin doğrulanması amacıyla Arslan, (2013) tarafından deneysel analizleri gerçekleştirilen betonarme çerçeve dikkate alınmıştır. Deneysel analizlere ait bilgiler bu bölümde sunulmuştur. Deneylerde bir dolgu duvarsız çerçeve ve iki dolgu duvar kullanılarak inşa edilen betonarme çerçeve numunesi yüklemeye tabi tutulmuştur. Dolgu duvarların yükseklik/uzunluk (h/l) oranı 1/1,25 olarak uygulanmıştır. Donatı düzeni ve miktarı, Türkiye'deki mevcut binalar için sahadaki uygulamalara benzer olarak tasarlanmıştır. Test numuneleri, Türkiye'deki mevcut yapıları yansıtan 1/1 ölçekte seçilmiştir. Deney seti Şekil 2a'da görülmektedir. Betonarme çerçeveye, Şekil 6' da verilen tekrarlı yükleme yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı dolgu duvarlar ve güçlendirilmiş duvar konfigürasyonları altında farklı büyüklükler analiz edilmiştir.

Şekil 6 Deney setine uygulanan yer değiştirme



Bu çalışma kapsamında betonarme çerçeve modelinin doğrulanması amacıyla, dolgu duvarsız çerçeve modeline ait deneysel sonuçlar Abaqus den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yük- yer değiştirme eğrilerinin zarfları dikkate alınmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 7' de gösterilmiştir.

Şekil 7 Deneysel ve numerik sonuçların karşılaştırılması

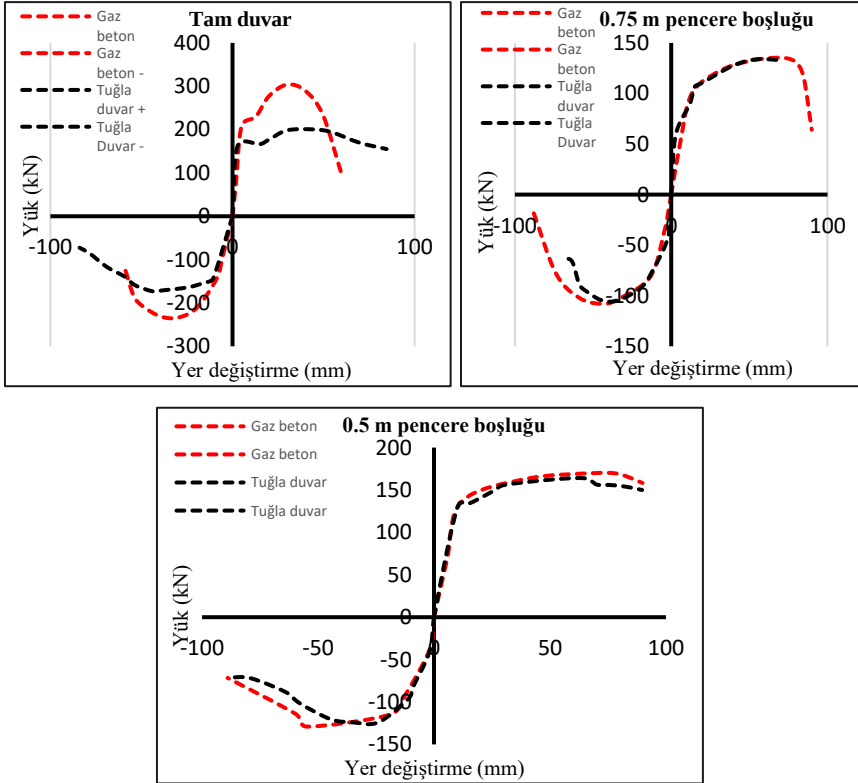


Şekil 7 'ye bakıldığında sayısal modelden elde edilen zarf eğrilerinin, deneysel analizlerden elde edilen zarf eğrileriyle genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca maksimum yükler arasındaki fark pozitif itmede %5 iken, negatif itmede %1 olarak birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sayısal model deney setini doğru bir şekilde temsil etmektedir.

Bulgular ve Tartışma

Tam dolgu duvar, 0.75 m bant pencere boşluğu ve 0.5 m bant pencere boşluğu durumları için, tuğla duvar ve gaz beton duvar malzemeleri dikkate alınarak tekrarlı yükler altında analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda global davranışı incelemek amacıyla tüm sistemin yük- yer değiştirme grafiğinin zarfı elde edilmiş ve Şekil 8’ de sunulmuştur.

Şekil 8 Taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrileri



Tam duvar durumunda gaz beton duvarda taşıma kapasitesi artmış ancak duvarda meydana gelen göçme nedeniyle daha az bir miktar yer değiştirme yapmıştır. 0.75 m ve 0.5 m boşluk durumunda gaz beton ve tuğla duvarlar benzer taşıma kapasitesi ve davranış

göstermiştir. 0.75 m boşluk durumunda tuğla duvar, gaz beton duvardan daha az yer değiştirme yaparak göçmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde dolgu duvar ve betonarme çerçeve arasında boşluksuz bir bağlantı yapılmadığından gerçekçi şekilde kolonlarla arasında boşluk oluşur ve bu durumda da kısa kolon davranışı meydana gelebilir. Sonuçlara bakıldığında tam dolgu durumunda tuğlanın daha rijit olması tuğla dolgu sistemde daha büyük hasara sebep olmuştur. Sistemin global davranışına ait bazı sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 2’ de özetlenmiştir.

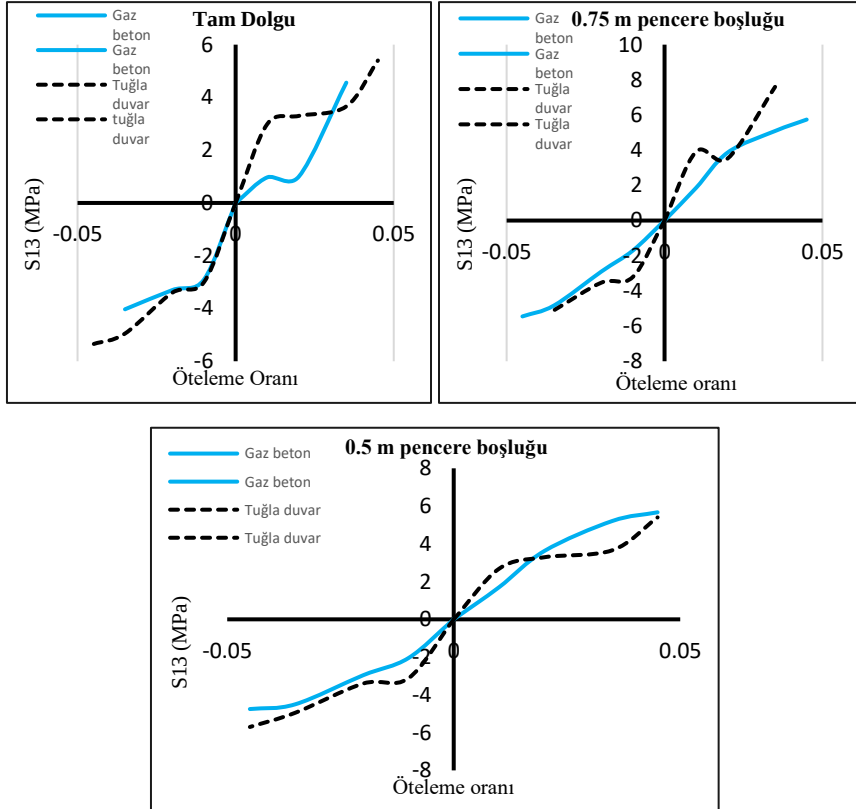
Tablo 2 genel olarak değerlendirildiğinde, dolgu tipi ve boşluk yüksekliğinin sistem davranışını belirgin biçimde etkilediği görülmektedir. Gaz beton dolgulu çerçeveler, tuğla dolgulu sistemlere göre özellikle 0.5 m boşluk ve tam dolgu durumlarında daha yüksek taşıma kapasitesi ve enerji tüketimi göstermiştir. Tuğla dolgulu sistemler başlangıçta çok daha rijit davranmakta ancak hızlı bir şekilde kırılğan rejime geçmektedir. Gaz beton ise daha düşük rijitlik ve daha yüksek akma deplasmanı sayesinde daha kontrollü bir yük–deplasman ilişkisi sunmaktadır. 0.75 m boşluklu sistem her iki dolgu tipinde de kısa kolon etkisinin en belirgin olduğu ve nihai deplasman kapasitesinin düştüğü en kritik durumdur. Buna karşılık 0.5 m boşluklu gaz beton dolgu, kapasite, süneklik ve enerji tüketimi arasında en dengeli performansı sergileyen konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 2 Global davranış özellikleri

Sistem	Dolgu Tipi	V _{max} (kN)	Δy (mm)	Δu (mm)*	$\mu = \Delta u / \Delta y$	K _o (kN/mm)	Enerji E (kN·mm)
0.75 m	Tuğla	133.8	9.2	70	7.61	20.9	7947
	Gaz beton	131.4	11.9	89.9	7.55	8.94	10153
0.5 m	Tuğla	163.8	7.43	89.7	12.07	14.0	12 964
	Gaz beton	168.9	10.7	89.7	8.38	12.44	13351
Tam dolgu	Tuğla	200.3	2.05	79.29	38.77	58.76	14 167
	Gaz beton	303.7	4.9	60	12.24	41.68	14129

Her bir kolonda meydana gelen kesme gerilmesi değerlerinin farklı öteleme oranları için karşılaştırması Şekil 9’da verilmiştir. Sağ tarafta yer alan kolon kiriş bölgesinde yer alan eleman üzerinden değerler elde edilmiştir.

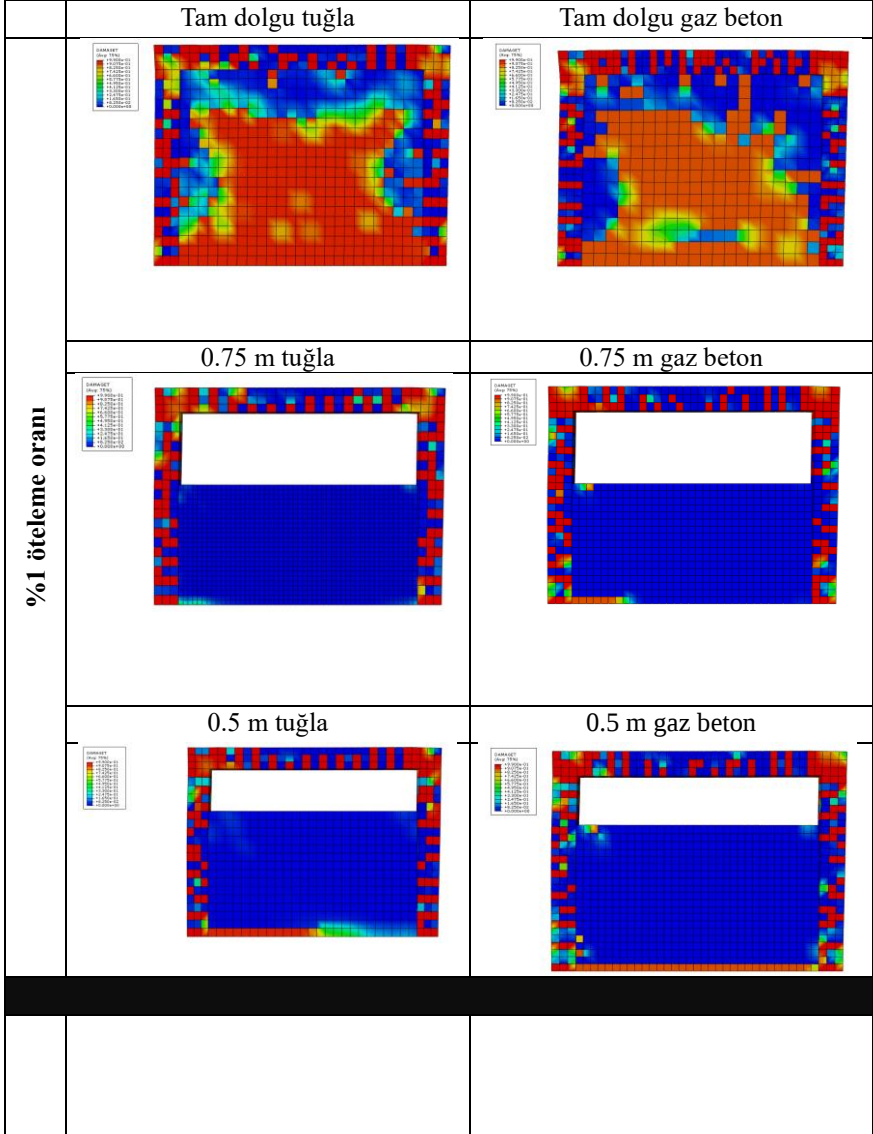
Şekil 9. Kesme gerilmesi- öteleme oranı karşılaştırması



Kolonda meydana gelen gerilmeler dikkate alındığında tüm boşluk durumlarında tuğla duvarlı varyasyonlarda kısa kolon etkisi daha etkin ortaya çıkmış ve kolonlarda meydana gelen kesme gerilmeleri daha büyüktür. Boşluk oranları ile birlikte karşılaştığında 0.75 m boşluk durumunda kolonlarda en büyük gerilmeler ortaya çıkmıştır.

%1 ve %2 itme oranları için yapıda meydana gelen çekme hasarlarının dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. Tüm varyasyonlar için görsel olarak karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 10 %1 ve %2 öteleme oranlarında çerçevede meydana gelen çekme hasarları



	Tam dolgu tuğla	Tam dolgu gaz beton
%2 öteleme oranı		
	0.75 m tuğla	0.75 m gaz beton
	0.5 m tuğla	0.5 m gaz beton

%1 ve %2 ötelenme oranlarına ait hasar dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, dolgu tipi ve boşluk yüksekliğinin kısa kolon davranışı üzerindeki etkisi açık biçimde görülmektedir. %1 ötelenme oranında, tuğla dolgulu sistemlerde hasar daha erken ve daha geniş alanlarda ortaya çıkarken gaz beton dolgulu sistemlerin daha sınırlı kırılma yüzeyleri oluşturduğu izlenmektedir. Özellikle tam dolgu durumunda tuğla duvarlar duvar gövdesinin tamamına yayılan kırmızı alanlarla belirgin bir kırılma davranış sergilerken, gaz beton dolgularda hasar daha çok kolon-duvar temas bölgelerinde yoğunlaşmış ve duvarın büyük kısmı daha az hasarlı kalmıştır. Boşluklu sistemlerde ise 0.75 m tuğla dolgulu durumda pencere altı kısa kolon bandı boyunca belirgin kesme çatlakları oluşmuş, gaz

beton dolgulu karşılığı ise benzer eğilimi göstermekle birlikte daha sınırlı bir bölgesel hasar üretmiştir. 0.5 m boşluklu sistemlerde hem tuğla hem gaz beton dolguda hasar daha düşük seviyede olup kısa kolon etkisi 0.75 m'ye kıyasla daha zayıf görülmektedir. %2 ötelenme oranında tüm sistemlerde hasar şiddeti artmakta, ancak malzeme türleri arasındaki fark daha belirgin hâle gelmektedir. Tuğla dolgulu sistemler, özellikle tam dolgu ve 0.75 m boşluk durumlarında, duvar gövdesi ve kolon yüzeylerinin büyük kısmında kırmızı zonlara dönüşerek ileri derecede kesme ve ezilme hasarı geliştirmiştir; bu durum tuğla dolgunun yüksek rijitlik nedeniyle erken ve yaygın bir kırılma sergilediğini göstermektedir. Gaz beton dolgulu sistemlerde ise %2 drifte bile hasar tuğlaya göre daha kontrollü ilerlemekte, kırmızı bölgeler daha sınırlı kalmakta ve hasar çoğunlukla kolon kısa segmentleri ile köşe bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle 0.75 m gaz beton dolgulu sistem, kısa kolon etkisini açıkça gösterse de tuğla dolguya kıyasla daha az kırılma ve daha dağıtılmış bir hasar paternine sahiptir. Buna karşılık 0.5 m boşluklu gaz beton dolgu, %2 ötelenmede en dengeli davranışı sergileyerek hem daha düşük hasar seviyeleri hem de daha yaygın çatlak dağılımı üretmiştir. Genel olarak, %1'den %2 ötelenme oranına geçiş, kısa kolon etkisinin en şiddetli biçimde 0.75 m boşluklu sistemlerde ortaya çıktığını, tuğla dolgulu sistemlerin gaz betona göre çok daha kırılma hasar geliştirdiğini ve gaz beton dolguların hem deformasyonu daha iyi dağıtarak hem de çatlak gelişimini yavaşlatarak daha kontrollü bir davranış sunduğunu net biçimde göstermektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, betonarme çerçevelerde farklı dolgu duvar malzemelerinin (boşluklu tuğla ve gaz beton) ve farklı bant pencere boşluğu yüksekliklerinin kısa kolon davranışı üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Analiz sonuçları, dolgu duvar geometrisi ve malzeme özelliklerinin hem global davranışı

hem de kolonlardaki yerel kesme taleplerini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Özellikle 0.75 m bant pencere boşluğunun, tüm dolgu tipleri için kısa kolon etkisinin en belirgin olduğu konfigürasyon olduğu; bu durumda kolonlarda kesme gerilmelerinin belirgin şekilde arttığı ve nihai deplasman kapasitesinin diğer sistemlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Malzeme karşılaştırmasında, gaz beton dolgulu sistemler tuğlaya kıyasla daha dengeli bir yük–deplasman ilişkisi, daha yüksek enerji tüketimi ve daha sınırlı hasar yayılımı göstermiştir. Tuğla dolgulu sistemler ise özellikle tam dolgu ve 0.75 m boşluk durumunda daha rijit davranmış, ancak bu rijitlik erken ve yaygın kırılğan hasar oluşumuna yol açmıştır. 0.5 m boşluklu gaz beton duvar, taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketimi açısından en dengeli performansı sergileyen varyasyon olmuştur. Genel olarak elde edilen bulgular, dolgu duvarlarda bırakılan bant pencerelerin kolon serbest boyunu azaltarak kısa kolon etkisini tetiklediğini; bu etkinin büyüklüğünün ise boşluk yüksekliği ve dolgu malzemesinin mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, dolgu duvar tasarımında özellikle bant pencere konum ve boyutlarının dikkatle belirlenmesi, gerekli durumlarda ise gaz beton gibi daha sünek malzemelerin tercih edilmesi kısa kolon kaynaklı hasarların azaltılmasında etkili bir çözüm sunmaktadır.

Kaynakça

Arslan, M. E. (2013). *Dolgu duvarlı ve deprem kumaşlı betonarme çerçevelerin deneysel incelenmesi*. (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cagatay, I. H., Beklen, C., & Mosalam, K. M. (2010). Investigation of short column effect of RC buildings: Failure and prevention. *Computers & Concrete*, 7(6), 523–532. <https://doi.org/10.12989/CAC.2010.7.6.523>

Caglar, N., & Mutlu, S. (2013). Study of short column behavior originated from the level difference of adjacent storeys. *Open Journal of Civil Engineering*, 3(1), 39–48. <https://doi.org/10.4236/ojce.2013.31006>

Çelik, A., Özgür, A., & Mercimek, Ö. (2025). Numerical analysis of failure performance in novel hollow brick designs. *Engineering Failure Analysis*, 109995.

Charleson, A. (2008). *Seismic design for architects*. Architectural Press.

Dassault Systèmes. (2013). *ABAQUS Documentation*. Providence, RI: Dassault Systèmes.

Demir, S., Hüsem, M., Altın, S., Pul, S., Bikçe, M., & Emsen, E. (2013). Mevcut betonarme yapılarda kısa kolon davranışlarının iyileştirilmesi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.

Ghobarah, A., & Galal, K. E. (2004). Seismic rehabilitation of short rectangular RC columns. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 45–68.

Işık, E., Ulutaş, H., Harirchian, E., Avcil, F., Aksoylu, C., & Arslan, M. H. (2023). Performance-Based Assessment of RC Building with Short Columns Due to the Different Design Principles. *Buildings*, 13(3), 750. <https://doi.org/10.3390/buildings13030750>

Luo, M. (2018). *Esnek bağlantılara sahip BFG donatılı dolgu duvarının düzlem dışı sismik davranışı üzerine bir çalışma*. (Yüksek lisans tezi). China Earthquake Administration Institute of Engineering Mechanics, Harbin, Çin.

Moretti, M., & Tassios, T. P. (2007). Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: Experimental results. *Engineering Structures*, 29(8), 2018–2029.

Seki, M., Popa, V., Lozinc, E., Dutu, A., & Papurcu, A. (2018). Experimental study on retrofit technologies for RC frames with infilled brick masonry walls in developing countries. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Greece.

Sia, G. W. (2022). Numerical investigation of the infill-induced short column behavior in RC frames. *Proceedings of the Structures Congress*.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBYY 2018)*. Resmî Gazete, Sayı 30364 (Mükerrer).

Tsantilis, A. V., & Triantafillou, T. C. (2018). Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with the surrounding RC frames. *Engineering Structures*, 155, 279–297.

Tunaboyu, O. (2017). *Kısa kolon oluşumuna neden olabilecek boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeve davranışının analitik ve deneysel yöntemlerle irdelenmesi*. (Doktora tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wu, C., Liu, Y., Liu, J., & Zhang, X. (2022). Seismic performance analysis of RC frames with ECC short columns based on the IDA method. *Buildings*, 12(11), 1834. <https://doi.org/10.3390/buildings12111834>

BÖLÜM 3

GEOPOLİMERLERİN ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARINDA KULLANIMI

SAADET GÖKÇE GÖK¹
ONUR YAVAN²

Giriş

Zemin iyileştirme, geoteknik mühendisliğinin güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından önemli çalışma konularından bir tanesidir. Altyapı yatırımlarının artması, arazi kullanımının yoğunlaşması ve mukavemetsiz zeminlerin mühendislik projelerine kazandırılmak zorunda kalınması, daha verimli ve uzun ömürlü iyileştirme tekniklerinin geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmıştır. Zemin iyileştirmede genellikle çimento ve kireç gibi geleneksel bağlayıcılar kullanılır (Firoozi vd., 2017). Bu malzemeler, erişilebilir ve yaygın olmalarıyla öne çıkar ancak karbon ayak izlerinin fazla olması, kimyasal dayanıklılık sınırlamaları ve bazı zemin türlerinde yetersiz performans gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir (Jawad vd., 2014). Bu nedenle, çevre dostu, yüksek dayanımlı,

¹Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-7879-1610.

²Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-9615-253X.

sürdürülebilir, alternatif ve çok yönlü malzeme çözümlerine duyulan ihtiyaç giderek belirginleşmektedir.

Zemin iyileştirme teknikleri ihtiyaçlara göre sürekli gelişmiştir. İlk dönemlerde iyileştirme daha çok mekanik sıkıştırma, taş dolgular ve katmanlı dolgu gibi basit yöntemlerle yapılırken, 20. yüzyılın başlarında modern zemin mekaniğinin gelişmesiyle bu yöntemler bilimsel bir temele oturmaya başlamıştır (Firoozi, vd., 2017; Impe, 2020). Bu dönemde vibrasyonlu kompaktörler ve titreşimli silindirler gibi ekipmanların ortaya çıkması, zemin sıkıştırmayı daha etkili hale getirmiştir (Baumann & Bauer, 1974). Daha sonra kimyasal yöntemler önem kazanmış; çimento ve kireç stabilizasyonu, kimyasal enjeksiyonlar, prefabrik dikey drenler ve taş-kum kolonlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Firoozi, vd., 2017; Van Impe, 2020). Geosentetiklerin geliştirilmesi zemin iyileştirme uygulamalarında büyük etki oluşturmuştur; geotekstil ve geogrid gibi malzemelerle zeminlerin taşıma gücü ve stabilitesi önemli ölçüde artırılmıştır (Akyildiz, 2019). Ayrıca, derin karıştırma (*deep soil mixing-DSM*), jet grout ve dinamik kompaksiyon gibi modern mekanik yöntemler de zayıf zeminlerde başarılı sonuçlar vermiştir (Ji vd., 2021; Lindh & Lemenkova, 2022; Z. Liu vd., 2025; Topolnicki, 2016). Günümüzde ise sürdürülebilirlik odaklı yeni teknolojiler öne çıkmıştır. Geopolimer stabilizasyonu, mikrobiyal aracılı kalsit çökmesi (*microbiologically induced calcite precipitation-MICP*), enzimatik stabilizasyon, nano-malzemeler ve sensör tabanlı akıllı izleme sistemleri, hem çevresel etkileri azaltmak hem de performans artırmak için kullanılan yenilikçi yöntemler arasında yer almıştır (Kalkan, 2020; Kr vd., 2023; Nasır, 2025; O'Donnell vd., 2022; Rangaswamy & Mohan, 2025; Shahriar vd., 2025; Yazdani & Hatami, 2016). Zemin iyileştirme, sürdürülebilir bağlayıcılar, geri dönüştürülmüş malzemeler ve hibrit çözümlerle daha çevreci ve akıllı bir yapıya doğru evrilmektedir (Eltayeb & Attom, 2021; Muñoz vd., 2025; Özçınar, 2024).

Çimento ve kireç gibi geleneksel zemin iyileştirme tekniklerinde kullanılan bağlayıcıların önemli çevresel etkileri vardır ve bu durum, günümüzde sürdürülebilir alternatiflerin arayışının temel nedenlerinden birini oluşturur (Amran vd., 2022; Firoozi, Olgun, vd., 2017; Jawad vd., 2014). Öncelikle çimento üretimi, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen klinker üretimini gerektirdiği için ciddi miktarda enerji tüketir ve küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7–8’inden tek başına sorumludur (Amran vd., 2022). Kireç üretimi de benzer şekilde kalsiyum karbonatın kalsinasyonuna dayandığından fosil yakıt tüketimine ve doğrudan kimyasal süreç kaynaklı yüksek CO₂ salımına neden olur (Jawad vd., 2014; Lal Mohammadi vd., 2023). Bu bağlayıcıların çevresel etkileri yalnızca emisyonla sınırlı değildir; hammadde olarak kullanılan kireçtaşı ve kilin çıkarılması, taş ocaklarında ekosistem tahribatına, arazi bozulmasına ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olabilir. Üretim aşamalarında açığa çıkan toz, Azot Oksitler ve Kükürt Oksitler gibi emisyonlar hava kalitesini olumsuz etkiler ve özellikle yerleşim alanlarına yakın bölgelerde insan sağlığı üzerinde risk oluşturabilir (Sagastume vd., 2012). Çimento ve kireç ile stabilizasyon yapılan zeminlerde, zamanla alkali sızıntı, pH değişimleri ve bazı ağır metal iyonlarının taşınması gibi çevresel etkiler de ortaya çıkabilir; ayrıca çimento ve kireç esaslı stabilizasyonun su gereksiniminin yüksek olması, özellikle su stresi olan bölgelerde ek bir çevresel yük oluşturur (Díaz-López vd., 2024). Tüm bu nedenlerle, geleneksel bağlayıcılar hem karbon ayak izi yüksek hem de doğal kaynak tüketimi fazla olan malzemeler olarak değerlendirilmekte; bu durum daha düşük emisyonlu geopolimer ve biyoteknolojik stabilizasyon yöntemlerine olan ilgiyi artırmaktadır (Dejong vd., 2010; Huang & Wen, 2015; Jawad vd., 2014).

Geopolimerler, son yıllarda hem yapı malzemesi hem de geoteknik mühendisliği alanlarında dikkat çeken yenilikçi bağlayıcı

sistemler arasında yer almaktadır. Alümino-silikat esaslı atık veya doğal kaynakların alkali aktivasyonu ile elde edilen bu malzemeler, düşük sıcaklıkta gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla yüksek dayanım, düşük geçirimsilik ve iyi durabilite özellikleri ortaya koymaktadır (Tahwia vd., 2022). Uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi yaygın malzemelerin değerlendirilmesine olanak tanınması, geopolimerleri hem ekonomik hem de çevresel açıdan cazip bir seçenek haline getirmektedir. Geleneksel Portland çimentosuna kıyasla sera gazı salımının önemli ölçüde daha düşük olması, geopolimerlerin sürdürülebilir altyapı tasarımındaki potansiyelini daha da artırmaktadır (Tushar vd., 2025). Geopolimerlerin yapısı, alkali aktivasyonla oluşan alüminosilikat polimerizasyonuna dayanır (Burduhos Nergis vd., 2018). Bu malzemeler, zemin iyileştirmede kullanıldığında hem çevresel avantaj sağlar hem de zemin daneleri arasında güçlü ve dayanıklı bir bağlayıcı oluşturur (Algın, 2025).

Geopolimerler zemin iyileştirmede kullanımı, zemin daneleri ile oluşan bağlanma, boşlukların doldurulması ve reaksiyon ürünlerinin zemin matrisi içinde mikro yapıyı güçlendirmesi gibi çok yönlü mekanizmalarla gerçekleşmektedir. Bu mekanizmalar sayesinde kayma direnci artışı, oturma davranışında iyileşme, permeabilitenin azalması ve kimyasal ya da çevresel etkilere karşı direncin artması gibi önemli mühendislik kazanımları elde edilebilmektedir. Killi zeminlerde plastisite özelliklerinin modifiye edilmesi, kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin azaltılması gibi farklı zemin türlerine yönelik çeşitli uygulamalar, geopolimer sistemlerinin geniş kullanım alanına işaret etmektedir (Eskişar & Aksu, 2020; Sarıcı vd., 2025).

Geopolimerler

Geopolimerler, silisyum ve alüminyum açısından zengin doğal veya endüstriyel kökenli alüminosilikat malzemelerin yüksek

alkaliniteye sahip aktivatör çözeltileri ile reaksiyona sokulması sonucunda oluşan inorganik bağlayıcı sistemlerdir (Gök & Kılınç, 2017; Matsimbe vd., 2022). Alkali aktivasyon olarak tanımlanan bu süreç, öncelikle hammadde bileşimindeki Si–O–Si ve Si–O–Al bağlarının güçlü alkali ortamda çözünmesiyle başlar (Dadsetan vd., 2022; Kastiukas vd., 2017). Çözünme aşamasında serbest hale geçen silikat ve alüminat türleri, çözeltide iyon taşınımı ve yeniden düzenlenme mekanizmalarıyla etkileşime girerek zamanla polikondensasyon reaksiyonlarını oluşturur (Emara vd., 2024; Gök & Kılınç, 2017). Bu reaksiyonlar sonucunda N-A-S-H (sodyum-alümino-silikat hidrat) veya K-A-S-H (potasyum-alümino-silikat hidrat) olarak adlandırılan jel fazları meydana gelir (Masoero vd., 2025; Razeghi Tehrani vd., 2024). Oluşan bu jel fazı, zemin daneleri arasında bağlayıcı bir matris görevi üstlenir ve boşluk yapısının doldurulmasına, böylece malzemenin dayanımının ve stabilitesinin artırılmasına katkı sağlar. Reaksiyon ilerledikçe jel fazı daha düzenli ve yoğun bir üç boyutlu alüminosilikat ağ yapısına dönüşür; bu yapı geopolimerlerin mekanik dayanım, kimyasal direnç ve durabilite özelliklerini belirleyen temel unsurdur (Mackenzie & Welter, 2014). Geopolimerler, geleneksel kalsiyum bazlı bağlayıcılardan farklı bir kimyasal mekanizmaya sahip olmalarına rağmen, sürdürülebilirlik ve performans açısından önemli avantajlar sunan alternatif bir bağlayıcı sistemi olarak değerlendirilmektedir (Ricciotti vd., 2025).

Geopolimer Üretiminde Kullanılan Bazı Ana Hammaddeler

Geopolimer üretiminde kullanılan hammaddeler, yüksek oranda silisyum (Si) ve alüminyum (Al) içeren doğal veya endüstriyel kökenli alüminosilikat malzemelerdir (Tahwia vd., 2022). Bu malzemeler, yüksek pH'lı alkali çözeltilerle reaksiyona girerek polimerik bir alüminosilikat ağ oluşturmaya elverişli yapıları nedeniyle tercih edilmektedir (Mackenzie & Welter, 2014). Geopolimer bağlayıcının performansı, doğrudan kullanılan

hammadenin mineralojik bileşimine, amorflik derecesine ve reaktivitesine bağlıdır (Costa vd., 2021; Ibrahim vd., 2019). Bu nedenle farklı kaynaklardan elde edilen hammaddeler, geopolimerizasyon sürecine farklı şekillerde katkıda bulunur. Endüstriyel süreçlerden elde edilen birçok puzolanik yan ürün, içerdiği amorf silika ve alümina nedeniyle geopolimer üretiminde potansiyel hammadde olarak değerlendirilebilir. Bu malzemeler, coğrafi bölgeye bağlı olarak düşük maliyetli ve kolay ulaşılabilir olmaları nedeniyle sürdürülebilir bir alternatif sunar. Gerekli durumlarda öğütme ve ön işlem süreçleriyle reaktiviteleri artırılabilir. Bu tür malzemeler, özellikle yerel kaynakların değerlendirilmesi ve karbon ayak izinin azaltılması açısından önem taşır. Aşağıda, geopolimer sistemlerinde yaygın olarak kullanılan başlıca hammadde türleri ele alınmıştır.

Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan ve genellikle silis (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve cam fazı açısından zengin ince taneli bir puzolan türüdür; bu malzeme geopolimer üretiminde en yaygın kullanılan hammaddelerden biri olup özellikle ASTM C618 F sınıfı uçucu külleri yüksek reaktivite ve düşük kalsiyum içeriğiyle tercih edilmektedir (Suraneni vd., 2021; Zhuang vd., 2016). Uçucu külün amorf yapıda olması, alkali çözeltilerle temas ettiğinde hızlı çözünmesini ve jele dönüşmesini kolaylaştırır. Ayrıca küresel partikül morfolojisi, geopolimer taze karışımının işlenebilirliğini artırır (Aslan & Erkan, 2024; Kilic & Gok, 2021). Düşük kalsiyum içerikli uçucu küllere dayalı geopolimerler genellikle N-A-S-H jel oluşumuna dayanır ve bu özellikleriyle yüksek durabilite ve kimyasal direnç gösterir (Kop & Yazıcıoğlu, 2023; Noaman vd., 2022; Zhuang vd., 2016).

Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretim süreçlerinde açığa çıkan ve granüle edilip ince öğütüldüğünde hidrolik bağlayıcı özellik kazanan bir yan üründür. Cüruf, yüksek oranda CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 içermesi nedeniyle geopolimer sistemlerinde çimentoya benzer özellik gösterir. Kalsiyum içeriğinin yüksek olması, aktivasyon sonrasında C-A-S-H benzeri jel yapılarının oluşmasına yol açar ve bu durum erken yaş dayanımlarının belirgin şekilde artmasını sağlar (Dai vd., 2021). Bu nedenle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimerler, uçucu küle kıyasla daha hızlı sertleşme ve yüksek basınç dayanımı sergileyebilir (Aslan & Erkan, 2024; Kop & Yazıcıoğlu, 2023). Ayrıca cüruf kullanımı, endüstriyel atıkların geri kazanımı açısından sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkı sunmaktadır (Gök vd., 2021).

Metakaolin

Metakaolin, kaolinit minerallerinin yaklaşık 650–800 °C aralığında ısı ile işleme kalsine edilmesi sonucu elde edilen yüksek reaktif bir alüminosilikat malzemedir (Rashad, 2013; Sa Riberio vd., 2025). Mineralojik olarak oldukça amorf bir yapıya sahip olması, geopolimerizasyon sürecinde hızlı çözünme ve homojen jel oluşumu sağlar (Sa Riberio vd., 2025). Ayrıca metakaolin, diğer puzolanik karakterli endüstriyel atıklara kıyasla daha stabil bir kimyasal bileşime sahiptir ve bu durum laboratuvar çalışmaları için ideal bir hammadde olmasını sağlar. Metakaolin kullanımı ile üretilen geopolimerler, yüksek dayanım, yoğun mikro yapı ve kimyasal direnç özellikleriyle bilinmektedir (Si vd., 2020; Zhao vd., 2024).

Doğal Alüminosilikat Kaynakları

Bazaltik tüf, volkanik kül, pomza ve zeolit gibi doğal alüminosilikat mineralleri de geopolimer üretimi için uygun

hammadeler arasında yer almaktadır. Bu malzemeler genellikle doğal amorf fazlar içerir ve yüksek silikon–alüminyum oranları sayesinde akıllı bir alkali aktivasyon davranışı sergiler. Coğrafi olarak zengin rezervlere sahip bölgelerde, bu tür malzemelerin kullanımı ekonomik ve çevresel açıdan avantajlıdır. Zemin iyileştirme gibi geniş hacimli uygulamalarda, büyük miktarlarda hammadde gereksinimi olduğundan kaynakların etkili kullanımı, nakliye imkânları, yerel kaynaklar ve maliyet açısından değerlendirme yapılarak uygun hammaddenin seçimi önemlidir.

Geopolimerlerde kullanılan hammaddelerin çeşitliliği, bu bağlayıcı sistemlerin esnekliğini ve farklı mühendislik uygulamalarına uyarlanabilirliğini artırmaktadır. Uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürünler hem yüksek performans sağlaması hem de atık yönetimi açısından çevresel fayda sunması nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir. Metakaolin ve doğal alüminosilikatlar ise kontrollü ve yüksek reaktiviteye sahip bağlayıcı sistemleri oluşturmak için tercih edilmektedir. Bu hammaddelerin kimyasal bileşimi, amorflik derecesi ve mineralojik özellikleri, geopolimerizasyon sürecinin temel belirleyicileri olup ortaya çıkan bağlayıcının mekanik ve durabilite performansını doğrudan etkilemektedir.

Aktivatörler ve Kimyasal Reaksiyonlar

Geopolimer üretiminde kullanılan aktivasyon çözeltileri, alüminosilikat hammaddenin çözünmesini ve polikondensasyon aşamalarını başlatan temel bileşenlerdir. Genellikle sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri tercih edilir (Catauro vd., 2020; Sawarkar vd., 2024). Hidroksit iyonlarının yüksek pH sağlaması, hammaddenin içyapısındaki Si–O–Si ve Si–O–Al bağlarının kırılmasını kolaylaştırır ve çözünür silikat ile alüminat türlerinin açığa çıkmasını sağlar (Costa vd., 2021; Merabtene vd., 2019). Bunlar, aktivatör

çözeltilisinde taşınarak yeniden organize olur ve polikondensasyon reaksiyonları sonucunda jel fazı oluşur. Çözelti içerisindeki silikat miktarı, reaksiyon hızını ve jel morfolojisini doğrudan etkilediği için özellikle sodyum silikat katkısının oranı, sistemin erken yaş dayanımını belirleyen kritik parametrelerden biridir (Murthi vd., 2020). Reaksiyon sonunda oluşan N-A-S-H veya K-A-S-H jel yapısı, geopolimer matrisinin dayanımını ve durabilitesini belirleyen üç boyutlu alüminosilikat ağıın temelini oluşturur (Punurai vd., 2018). Dolayısıyla aktivasyon çözeltilisinin tipi, konsantrasyonu, silika modülü, geopolimerizasyon sürecinin kritik kimyasal bileşenleri olarak değerlendirilmektedir.

Geopolimerlerin Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Geopolimerlerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri büyük ölçüde kullanılan hammadde türüne, aktivatör çözeltilisinin bileşimine ve kür koşullarına bağlıdır. Oluşan amorf jel matrisi ve daneler arası bağlanma, malzemenin yüksek basınç dayanımı ve düşük geçirgenlik göstermesini sağlar. Mineralojik olarak, geopolimer yapısı geleneksel çimento fazlarından belirgin şekilde farklıdır. Matrisin büyük bölümü amorf N-A-S-H veya K-A-S-H jelinden oluşur ve bu jel içerisinde zamanla sınırlı miktarda kristalin zeolit benzeri fazların oluşması gözlenebilir (Beltrame vd., 2024; Krivenko vd., 2017; Ulugöl vd., 2021). Bu amorf yapı, geopolimerlere hem kimyasal stabilite hem de yüksek sıcaklık dayanımı kazandırır (Aslan & Erkan, 2024; Chindaprasirt vd., 2022). Tüm bu özellikleri nedeniyle geopolimerler, zemin iyileştirme, beton üretimi, refrakter uygulamalar ve atık immobilizasyonu gibi çok farklı mühendislik alanlarında kullanılabilen çok yönlü bir bağlayıcı sistemdir (Gok & Sengul, 2021, 2023, 2024; Gök vd., 2021; Gök & Şengül, 2023; Hussain vd., 2024; Muñoz vd., 2025).

Çevresel Etkiler ve Karbondioksit Azaltma Potansiyeli

Geopolimer bağlayıcılar, özellikle çimento üretiminin yol açtığı yüksek karbon ayak izinin azaltılması açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Geleneksel Portland çimentosu, klinker üretimi için gereken yüksek sıcaklık ve kalsinasyon reaksiyonları nedeniyle önemli ölçüde CO₂ salımı gerçekleştirir. Buna karşılık geopolimer sistemlerinde hammadde olarak kullanılan uçucu kül, cüruf, metakaolin veya doğal alümino silikatlar ya endüstriyel yan ürünlerdir ya da düşük sıcaklıkta işlenir; bu nedenle üretim süreçleri çok daha düşük enerji tüketir. Literatürde geopolimer bağlayıcıların, kullanılan hammadde ve aktivatör türüne bağlı olarak %40 ila %80 oranında daha düşük CO₂ salımı ile üretilebildiği belirtilmektedir (Ekiz Barış, 2023; Madirisha vd., 2024; Martínez & Miller, 2025). Ayrıca bu teknolojinin endüstriyel atıkları yüksek dayanımlı bir bağlayıcıya dönüştürmesi, döngüsel ekonomi açısından da önemli çevresel faydalar sağlar. Geopolimerlerin kimyasal stabilitesi, ağır metal immobilizasyonunda ve kirletici tutma kapasitesinde sunduğu avantajlarla çevresel riskleri azaltır (Genua vd., 2025). Dolayısıyla geopolimer teknolojisi, karbon azaltım hedeflerine katkısı ve sürdürülebilir kaynak kullanımı açısından öne çıkan çevreci bir çözüm olarak değerlendirilmektedir (Madirisha vd., 2024; Martínez & Miller, 2025) .

Durabilite Performansı

Geopolimer bağlayıcıların durabilite performansı, uygulamalarda uzun vadeli stabilite açısından kritik bir kriterdir. Geopolimerlerin üç boyutlu alüminosilikat ağ yapısı, geleneksel çimento esaslı malzemelerden farklı olarak düşük kalsiyum içerir ve bu durum kimyasal bozunma mekanizmalarına karşı dayanıklılık sağlayabilmektedir (Bakharev, 2005a). Zemin iyileştirme kapsamında kullanıldığında, yüksek durabilite, özellikle agresif yer

altı suyu koşullarında stabilitenin korunması açısından büyük önem taşır. Bu bağlayıcıların çevresel kimyasal etkilere karşı gösterdiği direnç, önemli performans parametrelerindendir (Bakharev, 2005b; Vafaei vd., 2018). Bu malzemelerin uzun dönem performansının belirlenebilmesi için, asit etkisi, sülfat etkisi, klorür etkisi, karbonatlaşma gibi durumlara karşı dayanıklılığı araştırılmalıdır.

Geopolimer–Zemin Etkileşim Mekanizmaları

Geopolimerlerin zemin ortamına uygulanmasıyla ortaya çıkan davranış, geopolimer matrisinin kimyasal-mineralojik özelliklerinden ve zeminin dane boyutu, mineral bileşimi ve su muhtevası gibi geoteknik özelliklerinden etkilenir (Abdullah vd., 2020). Zemin–geopolimer etkileşimi temel olarak kimyasal etkileşim, fiziksel bağlanma ve mikro/makro yapının yeniden düzenlenmesi olmak üzere üç ana mekanizma üzerinden gerçekleşir (Shi vd., 2022a). Kimyasal açıdan bakıldığında, alkali aktivasyonla oluşan N-A-S-H veya K-A-S-H jel fazları, özellikle kil oranı yüksek zeminlerde iyon değişimi ve çözünme–yeniden birleşme reaksiyonları yoluyla zeminin mineral yapısını kısmen değiştirir; bu süreçte zemin danelerinin yüzeyinde bulunan doğal olarak tutunmuş iyonlar ortamdaki uzaklaştırılır ve bu iyonlar zamanla oluşan geopolimer jel yapısına dahil edilir (Ayub & Khan, 2023). Fiziksel bağlanma mekanizmasında ise geopolimer jeli, zemin daneleri arasında boşlukları doldurarak daneler arası temas noktalarını güçlendirir (Khasib vd., 2021). Bu durum kayma mukavemetinin artmasına ve oturma miktarının azalmasına katkı sağlar. Daha sonra mikro ve makro yapısal düzenlenme mekanizması devreye girerek; geopolimerin çökeltme ve sertleşme aşamalarında zeminin özgül yüzey alanı, su–geopolimer etkileşimi ve boşluk dağılımı yeniden şekillenir (Wu vd., 2024). Bu süreç, özellikle ince daneli zeminlerde boşluk oranının düşmesine, daha yoğun bir yapı oluşmasına ve permeabilitenin azalmasına imkân tanır. Böylece geopolimer–zemin

etkileşiminin sonucunda mekanik dayanım ve uzun dönemli durabilite önemli ölçüde geliştirilmiş olur (Al Khafaji vd., 2024).

Kil mineralleri, yüksek özgül yüzey alanı, değişebilir katyon konsantrasyonu ve tabakalı kristal yapıları nedeniyle geopolimerlerle en güçlü etkileşimi gösteren zemin türüdür (Dietel vd., 2017). Alkali aktivasyon çözeltisinin zemine eklenmesiyle birlikte kilin yüzeyindeki Na^+ , K^+ , Ca^{2+} gibi değişebilir katyonlar hızlı bir iyon değişimi mekanizmasına girer ve yüzey pH'ı belirgin biçimde yükselir (Shi vd., 2022b). Bu yüksek alkalinite, özellikle montmorillonit ve illit gibi minerallerde tabakalar arası suyun uzaklaşmasına ve zeminin plastik özelliklerinde azalmaya yol açar (J. Liu vd., 2022). Aynı zamanda kil partiküllerinin yüzeyindeki Si–O ve Al–O bağlarının kısmi çözünmesi gerçekleşir. Çözünen bu türler, geopolimer jelinin polikondensasyon süreçlerine entegre olarak daha stabil bir alüminosilikat ağ yapısının oluşmasına katkıda bulunur (Abdeldjouad vd., 2019). Böylece kil daneleri yalnızca bir bağlayıcı matris içinde tutulmaz, aynı zamanda kimyasal olarak jelin bir parçası hâline gelir. Bu durum, geopolimerle iyileştirilmiş kil zeminlerde dayanımın çimento iyileştirmesine kıyasla çok daha hızlı ve yüksek seviyede artmasını sağlar (Abdullah vd., 2020).

Kumlu zeminlerde geopolimer etkileşimi kimyasal reaksiyondan ziyade fiziksel bağlanma ve matris etkisi üzerinden ilerler (Kuenzel vd., 2014). Kum daneleri arasındaki büyük boşluklar, alkali aktivatör ve jele dönüşen solüsyonun kolayca nüfuz etmesine olanak tanır (Rasskazov vd., 2017). Geopolimer jelinin sertleşmesiyle birlikte kum daneleri birbirine bağlanarak yarı-çimento benzeri bir kompozit yapı oluşur. Bu yapı özellikle drenaj problemi olmayan zeminlerde oldukça stabil bir iskelet oluşturur (Wang vd., 2022). Kumlu zeminlerde ince daneli fraksiyonun bulunması, geopolimer jelin bağlanma kapasitesini artırarak daha yüksek dayanımlar elde edilmesini sağlar; çünkü ince fraksiyon,

jelin yayılabileceği daha fazla yüzey alanı sunar (Wang vd., 2021). Geopolimerle iyileştirilmiş kum zeminlerde gözlenen bir diğer önemli mekanizma, boşluk oranının azalmasıyla birlikte sıkışabilirliğin düşmesi ve kayma mukavemetinin belirgin şekilde artmasıdır (Thiha vd., 2018). Böylece kumlu zeminler geopolimerizasyon sonrası daha rijit, daha düşük deformasyonlu bir mühendislik malzemesine dönüşür (Razeghi vd., 2024).

İyon Değişimi ve pH Kontrollü Etkileşim Mekanizmaları

Geopolimer–zemin etkileşiminin temelini oluşturan kimyasal süreçlerden biri, yüksek alkalinite ortamında gerçekleşen iyon değişimi reaksiyonlarıdır (Gasca-Tirado vd., 2018). Aktivasyon çözeltisindeki Na^+ veya K^+ iyonları, özellikle kil minerallerinin yüzeyindeki değişebilir katyonlarla yer değiştirerek zemin mineralojisinde dönüşüme ve jele bağlanan yeni iyon türlerinin oluşumuna zemin hazırlar (Fedotov vd., 2006). Bu değişim mekanizması, zeminin yüzey yükünü ve elektrostatik stabilitesini etkileyerek partiküller arası etkileşimleri yeniden düzenler. Ayrıca, yüksek pH ortamı Si ve Al içeren minerallerin çözünmesini hızlandırarak geopolimer jelinin daha yüksek miktarda reaksiyon ürününe sahip olmasını sağlar. Bu süreç, zemin türüne bağlı olmakla birlikte, geopolimer jelin özgün mineralojik yapısının zemin bileşenleriyle birlikte gelişmesine yol açar. Böylece oluşan bağlayıcı sistem, zeminin kendi mineral içeriğinden türeyen bir alüminosilikat ağ yapısı hâline gelir (Gasca-Tirado vd., 2018).

Geopolimer ile Zemin İyileştirme Yöntemleri

Geopolimerizasyon, zemin stabilizasyonu için sıradan Portland çimentosu gibi geleneksel bağlayıcılara sürdürülebilir bir alternatif çözüm sunar. Bu kimyasal süreç, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu veya metakaolin gibi alüminosilikat bakımından zengin malzemelerin alkali bir aktivatörle reaksiyonunu

içerir ve üç boyutlu bir polimerik yapı oluşturur (Sharma & Kumar, 2020). Zemin iyileştirme uygulamaları yöntemlerinin birçoğu ile de kullanılabilir. Geopolimerler derin karıştırma zemin iyileştirme uygulamalarında, ıslak karıştırma veya kuru karıştırma yoluyla eklenir ve zeminin genel yapısal bütünlüğünü artıran stabilize kolonlar oluşturur (Hamzah vd., 2015). Laboratuvar da yapılan çalışmalar bu karışımları optimize etmek ve özellikle yumuşak killi veya siltli zemin türleri için öncü maddeler ile aktivatörlerin doğru oranını sağlamak açısından çok önemlidir.

Geopolimer bağlayıcıların eklenmesi, özellikle serbest basınç dayanımını arttırması nedeniyle, iyileştirilmiş zeminlerin geoteknik performansını önemli ölçüde değiştirir (Javdanian, 2017). Daha yavaş puzolanik reaksiyonlara dayanan kireçten farklı olarak, geopolimerler genellikle yüksek erken mukavemet elde ederler ve bu da kayma mukavemeti parametrelerindeki (ϕ, c) artışla doğrudan ilişkilidir (Al-Rkaby vd., 2022a). Bu iyileştirme yöntemi, konsolidasyon oturma miktarını en aza indirirken temel zeminin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırır. Ayrıca, geopolimer matrisi toprağın mikro dokusunu değiştirerek geçirgenliğini azaltır ve erozyon direncini artırır; bu özellikler, hidrolik veya kıyı ortamlarında altyapının uzun ömürlü olması için hayati önem taşır (Du vd., 2017).

Mukavemet ve çevre açısından, geopolimerle stabilize edilmiş zeminler, geleneksel çimento veya kireçli iyileştirme uygulamalarına kıyasla donma-çözülme ve ıslak-kuru döngülere karşı üstün direnç gösterir. Geopolimer jelindeki kimyasal bağlar, sızıntıya ve hacimsel dengesizliğe daha az duyarlıdır (Sreelakshmi vd., 2020).

Deprem riski olan bölgelerde, bu zemin iyileştirme uygulamaları zeminin mukavemeti ile enerji sönümleme oranını artırarak sıvılaşmaya karşı sağlam bir koruma görevi görür (Gopal

Madabhushi, 2007). Deprem kaynaklı dinamik yükler zeminde taşıma gücü kaybına neden olabilir. Özellikle zemin sıvılaşması durumunda meydana gelen taşıma gücü kaybına bağlı hasarlar birçok büyük depremde gözlenmiştir (Sonmez & Ulusay, 2008; Ecemis vd., 2025). Günümüzdeki yaygın uygulamalarda ancak sıvılaşma varsa deprem etkisi nedeniyle göçme olacağı, bunun dışında taşıma gücü kayıplarının sınırlı olacağı kabul edilmektedir. Buna karşın dinamik yükler etkisinde taşıma gücü göçmesi de görülebilmektedir. Genel olarak en sık rastlanan taşıma gücü göçme sebeplerinin zemin sıvılaşması ve zımbalama etkisi ile olduğu kabul edilmektedir (Çinicioğlu, 2005). Dinamik yükler etkisindeki taşıma gücü problemlerinin önlenmesi için kullanılabilecek en etkili yöntemlerden biri zemin iyileştirmesidir. Zemin iyileştirme tekniklerinin bazı deprem hasarlarını önleyebileceği çalışmalarla da tespit edilmiştir (Martin, Ii & Olgun, 2006; Damcı vd., 2025).

Geopolimerler, zeminlerin çimentoyla stabilizasyonu ile karşılaştırıldığında ise, sadece daha düşük karbon ayak izi sunmakla kalmaz, aynı zamanda çimentonun genellikle bozulduğu asidik veya sülfat bakımından zengin zeminlerde daha iyi performans gösterir (Dheyab vd., 2019).

Geoteknik Performans Üzerine Etkiler

Geopolimer ile yapılan zemin stabilizasyonu yoluyla, zayıf zeminlerin fiziksel ve kimyasal yapısını değiştirerek geoteknik özelliklerini önemli ölçüde artırır. Bu malzemeler ilk olarak alümin silikatların alkali aktivatörlerle reaksiyona girerek yoğun, üç boyutlu bir polimerik ağ oluşturduğu polikondenzasyon yoluyla zeminin basınç dayanımının artırırılar (Al-Rkaby vd., 2022b). Geopolimerler geleneksel bağlayıcılardan (kireç, çimento vb.) farklı olarak genellikle hızlı mukavemet artışı ve iyileştirilmiş kayma mukavemeti parametreleri ile özellikle zemin danelerini yapıştırır ve boşluk oranlarını azaltırlar. Bu yapısal güçlendirme, doğrudan daha

yüksek taşıma kapasitesi ve konsolidasyon oturma miktarının azalması ile sonuçlanır. Bu durum geopolimerlerle iyileştirilmiş zeminleri ağır üstyapı yükleri için uygun hale getirir (Somu Alias Ramya & Jeyapriya, 2019; Nwonu, 2021).

Geopolimer stabilizasyonu zeminin konsolidasyon ve hidrolik özelliklerini de değiştirir. Geopolimer jelin oluşumu, zeminin permeabilitesini azaltarak erozyon direncini artırır ve asbestli sıvıların sızmasını önleyen daha geçirimsiz bir bariyer oluşturur. Geopolimerlerin bu etkisi özellikle aşırı mevsimsel değişikliklerin olduğu iklimlerde uzun süreli hizmet verilebilirliği korumada önemli rol oynamaktadır (Rangan, 2014). Çünkü yumuşak killi veya gevşek siltli zeminlerde görülen mikro çatlaklar ve mukavemet kaybı önlenmiş olur (Jafari Kermanipour vd., 2025).

Sismik direnç açısından düşünüldüğünde ise geopolimerle stabilize edilmiş zeminler dinamik stabilite ve sıvılaşma direnci göstermektedir. Bu bağlayıcı malzemeler doymuş granüler zeminlerin kayma mukavemetini artırarak deprem sırasında gözenek suyu basıncı oluşumu olasılığını azaltır (Krishnan & Shukla, 2021). Geopolimer stabilizasyonu çimento veya kireç ile karşılaştırıldığında, geopolimerler genellikle daha sürdürülebilir ve yüksek performanslı bir alternatif olarak ortaya çıkar. Çimento kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) bağlarına dayanırken, geopolimerler daha düşük karbon ayak izi ile sülfatlara ve asitlere karşı daha iyi kimyasal direnç sunarak modern geoteknik mühendislik problemleri için sağlam ve çevre dostu bir çözüm sağlar (Jwaida vd., 2023).

Yöntemin Sınırlılıkları ve Çözüm Önerileri

Geopolimerlerin zemin iyileştirme uygulamalarında sunduğu yüksek dayanım ve çevresel sürdürülebilirlik avantajlarına rağmen, malzemenin saha koşullarında uygulanabilirliğini etkileyen çeşitli zorluklar ve sınırlılıklar bulunmaktadır. Bu sınırlılıklar, büyük ölçüde hammadde bileşimindeki değişkenlik, yüksek molariteli

aktivasyon çözeltilerinin kullanımından kaynaklanan güvenlik riskleri ve geopolimerizasyon sürecinin çevresel koşullara duyarlılığı ile ilişkilidir. Alüminosilikat kaynaklarının kimyasal içeriğinin bölgesel farklılık göstermesi, reaksiyon ürünlerinin oluşumunu ve nihai geoteknik performansı öngörmeyi güçleştirirken; saha uygulamalarında sıcaklık ve nem koşullarının kontrol edilememesi, geopolimer jelinin yeterince gelişmemesine neden olabilmektedir. Ayrıca, zemin türleri arasında görülen mineralojik ve organik madde farkları, geopolimer–zemin etkileşim mekanizmalarının tahmin edilmesini zorlaştırmakta ve özellikle organik içerikli zeminlerde bağlayıcı matrisin bütünlüğü zayıflayabilmektedir. Bu problemlere ek olarak malzemenin uzun dönem dayanıklılığına ilişkin saha verilerinin sınırlı olması, karbonatlaşma, iyon taşınımı ve yaşlanma davranışının tam olarak anlaşılmasını engellemektedir (Lloyd, 2009). Saha uygulamalarında karşılaşılan işlenebilirlik sorunları da önemli bir diğer sınırlılığı oluşturmaktadır; viskozite, priz süresi ve ekipman uyumsuzlukları enjeksiyon ve yerinde karıştırma gibi yöntemlerin verimliliğini azaltmaktadır. Bu kapsamda çözüm önerileri, hammadde karakterizasyonunun standartlaştırılması, katı aktivatörler veya düşük molariteli çözeltiler gibi daha güvenli aktivasyon sistemlerinin kullanılması, çevresel koşullara uyum sağlayan kür süreçlerinin geliştirilmesi ve zemin mineralojisine özgü geopolimer tasarımlarının oluşturulması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ayrıca uzun dönem performansın anlaşılması için pilot saha uygulamalarının artırılması ve hızlandırılmış durabilite testlerinin standartlaştırılması gereklidir. Böylece geopolimer–zemin iyileştirme teknolojisinin bilimsel ve uygulamalı altyapısının güçlendirilmesiyle özellikle büyük ölçekli mühendislik projelerinde daha güvenilir bir alternatif olarak yaygınlaştırılması mümkün olacaktır.

Genel Değerlendirme, Sonuç ve Öneriler

Zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan geleneksel mekanik sıkıştırmadan modern kimyasal stabilizasyona geçiş, geoteknik mühendisliğinde önemli bir gelişmedir. Portland çimentosu ve kireç gibi geleneksel bağlayıcılar tarihsel olarak bu alanda hakimiyet kurmuş olsa da, bu malzemelerin küresel CO₂ emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olmaları, sürdürülebilir alternatiflerin aranmasını gerekli kılmıştır. Çalışmalar, uçucu kül, cüruf ve metakaolin gibi malzemelerin alkali aktivasyonu yoluyla ortaya çıkan geopolimerlerin, endüstriyel atık yönetimi ile mühendislik çalışmaları arasındaki boşluğu dolduran çok yönlü bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Geopolimerler, N-A-S-H ve K-A-S-H jel fazlarına yol açan karmaşık kimyasal reaksiyonları kolaylaştırarak zemin içinde sağlam bir üç boyutlu matris oluşturabilmektedir.

Geopolimerle zemin iyileştirme uygulamaları zayıf zeminlere önemli ölçüde stabilite kazandırmıştır. Geopolimer stabilizasyonu, zayıf zeminlerin serbest basınç dayanımı (UCS) ve kayma mukavemeti parametrelerini önemli ölçüde artırarak taşıma kapasitesinin artmasını ve konsolidasyon oturmasının belirgin şekilde azalmasını sağlamaktadır. Geopolimerlerin zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılması, geleneksel çimento bazlı yöntemlere kıyasla zemin iyileştirme projelerinin karbon ayak izini %40 ila %80 oranında azaltabilmekte ve endüstriyel yan ürünlerin yeniden kullanılmasıyla döngüsel ekonomiyi desteklemektedir. Bunlara ilave olarak geopolimerler, geleneksel bağlayıcıların sıklıkla bozulduğu asidik ve sülfat bakımından zengin ortamlara karşı üstün direnç gösterebilmektedir. Ayrıca, zeminin enerji sönmüleme oranını artırarak sıvılaşma risklerini azaltabilmekte ve sismik direnci iyileştirebilmektedir.

Geopolimerler granüler zeminlerde daneler arası bağ kuvveti oluşturulmasına ve boşlukların doldurulmasına yardım edebilir. İnce

daneli zeminlerde ise daha düşük geçirgenliğe sahip bir zemin tabakası oluşmasına yardımcı olabilir.

Geopolimerler ile zemin iyileştirme uygulamalarını laboratuvar ortamından büyük ölçekli altyapı projelerine taşıyabilmek için bazı önlemlerin alınması gerekir. Öncelikle geopolimer malzemelerin standartlaştırılmasına ihtiyaç vardır. Geopolimer malzemelerde kullanılan endüstriyel yan ürünlerin kimyasal bileşimindeki bölgesel farklılıkların giderilmesi için standart hammadde kullanımı gerekmektedir.

Arazi koşullarında laboratuvarların kontrollü sıcaklığı olmadığından, araştırmacılar değişen nem ve sıcaklık durumlarında geopolimer jel oluşumunun farklılıklarını dikkate almalıdır.

Geopolimerlerle zemin iyileştirmede arazi uygulamaları konusunda, hala yeterince anlaşılmamış olan karbonatlaşma ve iyon taşınımı gibi mekanizmaları ve durabilite davranışlarını incelemek için uzun süreli arazi deneylerini içeren çalışmalar yapılmalıdır.

Kaynakça

- Abdeldjouad, L., Asadi, A., Nahazanan, H., Huat, B. B. K., Dheyab, W., & Elkhebu, A. G. (2019). Effect of Clay Content on Soil Stabilization with Alkaline Activation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0157-y>.
- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Walske, M. L. (2020). Review of fly-ash-based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay. *Geosciences*, 10(7), 249.
- Akyildiz, M. H. (2019). Geosentetik türlerinin inşaat mühendisliğindeki uygulamaları ve sağladığı kolaylıklar. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 791-796. <https://doi.org/10.24012/dumf.500595>.

- Al Khafaji, A. E., Waily, M. J., & Jawad, Z. F. (2024). Strength Performance of Soft Clayey soil Solidified by Slag-Fly Ash–Metakaolin Based Geopolymer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1374(1), 012020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1374/1/012020/meta>.
- Alğın, M. (2025). *Geopolimer ile İyileştirilen Zeminlerde Karbon Fiber Katkısının Zeminlerin Fiziksel Özellikleri Üzerine Olan Etkisinin Araştırılması ve Optimizasyonu*. Harran Üniversitesi.
- Al-Rkaby, A. H. J., Odeh, N. A., Sabih, A., & Odah, H. (2022a). Geotechnical characterization of sustainable geopolymer improved soil. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 484-491. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0044>.
- Al-Rkaby, A. H. J., Odeh, N. A., Sabih, A., & Odah, H. (2022b). Geotechnical characterization of sustainable geopolymer improved soil. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 484-491. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0044>.
- Amran, M., Makul, N., Fediuk, R., Lee, Y. H., Vatin, N. I., Lee, Y. Y., & Mohammed, K. (2022). Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Studies in Construction Materials*, 17(July), e01439. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01439>.
- Aslan, S., & Erkan, İ. H. (2024). The Effects of Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Limestone Powder on the Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *Applied Sciences*, 14, 553. <https://doi.org/10.3390/app14020553>.

- Ayub, F., & Khan, S. A. (2023). An overview of geopolymer composites for stabilization of soft soils. *Construction and Building Materials*, 404, 133195.
- Bakharev, T. (2005a). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35, 1233-1246. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>.
- Bakharev, T. (2005b). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35, 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>.
- Baumann, V., & Bauer, G. E. A. (1974). The Performance of Foundations on Various Soils Stabilized by the Vibro-compaction Method. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(4), 509-530. <https://doi.org/10.1139/t74-056>.
- Beltrame, N. A. M., Trisotto, A. V., Souto, R., da Silva, J. C. N., Pereira, B. C. G., & Medeiros-Junior, R. A. (2024). Effect of sulfate attack on geopolymer mortars at early ages of exposure. *Materials and Structures*, 57(10), 1-16. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02526-4>.
- Burduhos Nergis, D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., & Tahir, M. F. M. (2018). Geopolymers and Their Uses: Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374(1), 12019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012019>.
- Catauro, M., Dal Poggetto, G., Sgarlata, C., Vecchio Cipriotti, S., Pacifico, S., & Leonelli, C. (2020). Thermal and microbiological performance of metakaolin-based geopolymers cement with waste glass. *Applied Clay Science*, 197(July). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105763>.

- Chindaprasirt, P., Lao-un, J., Zaetang, Y., Wongkvanklom, A., Phoon-
ngernkham, T., Wongsas, A., & Sata, V. (2022). Thermal
insulating and fire resistance performances of geopolymer
mortar containing auto glass waste as fine aggregate. *Journal
of Building Engineering*, 60(August), 105178.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105178>.
- Costa, L. M., Almeida, N. G. S., Houmard, M., Cetlin, P. R., Silva,
G. J. B., & Aguilar, M. T. P. (2021). Influence of the addition
of amorphous and crystalline silica on the structural
properties of metakaolin-based geopolymers. *Applied Clay
Science*, 215, 106312.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106312>.
- Çinicioğlu, S. F. (2005). Zeminlerde statik ve dinamik yükler altında
taşıma gücü anlayışı ve hesabı. *Seminer, IMO İstanbul
Şubesi*, 9, 183-195.
- Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M., Mahmoodi, O., & Sahmaran,
M. (2022). Sodium glass liquid from glass waste as a user-
friendly hardener in structural geopolymer systems. *Cement
and Concrete Composites*, 130(October 2021), 104525.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104525>.
- Dai, X., Aydin, S., Yücel Yardimci, M., Qiang, R. E. N., Lesage, K.,
& De Schutter, G. (2021). Rheology, early-age hydration and
microstructure of alkali-activated GGBFS-Fly ash-limestone
mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 124(May),
104244.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104244>.
- Damcı, E., Temür, R., Kanbir, Z., Şekerci, Ç., & Köroğlu, E. Ö.
(2025). Comprehensive investigation of damage due to 2023
Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye: Causes,

- consequences, and mitigation. *Journal of Building Engineering*, 99, 111420.
- Dejong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36, 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>.
- Dheyab, W., Ismael, Z. T., Hussein, M. A., & Huat, B. B. K. (2019). Soil stabilization with geopolymers for low cost and environmentally friendly construction. *GEOMATE Journal*, 17(63), 271-280.
- Díaz-López, J. L., Rosales, J., Agrela, F., Cabrera, M., & Cuenca-Moyano, G. M. (2024). Evaluation of geotechnical, mineralogical and environmental properties of clayey soil stabilized with different industrial by-products: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 449(September 2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138497>.
- Dietel, J., Warr, L. N., Bertmer, M., Steudel, A., Grathoff, G. H., & Emmerich, K. (2017). The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay. *Applied Clay Science*, 139, 99-107.
- Du, Y.-J., Yu, B.-W., Liu, K., Jiang, N.-J., & Liu, M. D. (2017). Physical, Hydraulic, and Mechanical Properties of Clayey Soil Stabilized by Lightweight Alkali-Activated Slag Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001743).
- Ecemis, N., Donmez, C., Karaman, M., Valizadeh, H., & Dalgic, K. D. (2025). Assessment of seismic liquefaction and structural instability in Adıyaman-Gölbaşı after the February 6, 2023,

earthquakes in Türkiye. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 192, 109300.

Ekiz Barış, K. (2023). Jeopolimer bağlayıcı üretiminde atık mermer tozu kullanım olanaklarının değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 975-990. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1299353>.

Eltayeb, A., & Attom, M. (2021). The Use of Shredded Plastic Water Bottles in Soil Stabilization. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 13, 37-44.

Emara, R., Bano, S., Batool, S., Shoukat, J., Islam, I., Ashraf, M. A., Altaf, M., Iqbal, A., Shah, A., Ayaz, A., Hattawi, S. N., Ahmed, A. G., Fadhil, F. M., & Fetouh, H. A. (2024). Geopolymers as sustainable alternates for portland cement in constructive concrete: Systematic review. *Alexandria Journal of Science and Technology*, 2(2), 22-35. <https://doi.org/10.21608/AJST.2024.290876.1032>.

Eskişar, T., & Aksu, G. (2020). Zeminlerde Tek Fazlı Geopolimerizasyon Uygulaması ve Geopolimerizasyonun Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 466-478. <https://doi.org/10.36306/konjes.611595>.

Fedotov, G. N., Tret'yakov, Y. D., & Pakhomov, E. I. (2006). Organomineral gel and ion-exchange properties of soils. *Doklady Chemistry*, 411(2), 230-233.

Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>.

- Firoozi, A. A., Olgun, C. G., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>.
- Gasca-Tirado, J. R., Manzano-Ramírez, A., Rivera-Muñoz, E. M., Velázquez-Castillo, R., Apátiga-Castro, M., Nava, R., & Rodríguez-López, A. (2018). Ion Exchange in Geopolymers. *İçinde New Trends in Ion Exchange Studies* (ss. 71-82). <https://doi.org/10.5772/intechopen.80970>.
- Genua, F., Lancellotti, I., & Leonelli, C. (2025). Geopolymer-Based Stabilization of Heavy Metals, the Role of Chemical Agents in Encapsulation and Adsorption: Review. *Polymers*, 17(670), 1-29. <https://doi.org/10.3390/polym17050670>.
- Gok, S. G., & Sengul, O. (2021). The use of waste glass as an activator in alkali-activated slag mortars. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 174(3), 120-130. <https://doi.org/10.1680/jensu.19.00070>.
- Gok, S. G., & Sengul, O. (2023). Mechanical properties of alkali-activated slag based SIFCON incorporating waste steel fibers and waste glass. *Construction and Building Materials*, 408(8 December 2023), 133697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133697>.
- Gok, S. G., & Sengul, O. (2024). Enhancing Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag SIFCON for Sustainable Construction Using Recycled Glass and Tire-Derived Waste Steel Fibers. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00724-6>.
- Gopal Madabhushi, S. P. (2007). Ground improvement methods for liquefaction remediation. *Proceedings of the Institution of*

- Civil Engineers - Ground Improvement*, 11(4), 195-206.
<https://doi.org/10.1680/grim.2007.11.4.195>.
- Gök, S. G., & Kılınç, K. (2017). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 3(2), 123-131.
- Gök, S. G., Kilic, I., & Sengul, O. (2021). Właściwości alkalicznie aktywowanych wałowanych betonów żużlowych wytwarzanych z kruszyw odpadowych (Properties of Alkali-Activated Roller Compacted Concretes Produced from Waste Aggregates). *Cement Wapno Beton (Cement Lime Concrete)*, 26(4), 352-363.
<https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.7>.
- Gök, S. G., & Şengül, Ö. (2023). The Use of Waste Glass in Geopolymer Production. “*Beton 2023*” *Congress Proceedings*— 8-10 November 2023, 588-597.
- Hamzah, H. N., Al Bakri Abdullah, M. M., Heah, C. Y., Arif Zainol, M. R. R., & Kamarudin, H. (2015). Review of soil stabilization techniques: Geopolymerization method one of the new technique. *Key engineering materials*, 660, 298-304.
- Huang, Y., & Wen, Z. (2015). *Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation*. 1927-1938. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1558-9>.
- Hussain, S., Amritphale, S., Matthews, J., Paul, N., Matthews, E., & Edwards, R. (2024). Advanced Solid Geopolymer Formulations for Refractory Applications. *Materials*, 17(6).
<https://doi.org/10.3390/ma17061386>.
- Ibrahim, M., Megat Johari, M. A., Maslehuddin, M., Rahman, M. K., Salami, B. A., & Mohamed, H. D. (2019). Influence of

- composition and concentration of alkaline activator on the properties of natural-pozzolan based green concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.117>.
- Impe, W. (2020). *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. Routledge.
- Jafari Kermanipour, M., Bagheripour, M. H., & Yaghoubi, E. (2025). Improving durability and mechanical properties of silty sand stabilized with geopolymer and nanosilica composites. *Journal of Composites Science*, 9(8), 397.
- Javdanian, H. (2017). *The effect of geopolymerization on the unconfined compressive strength of stabilized fine-grained soils*. <https://www.sid.ir/paper/730374/en>.
- Jawad, I. T., Taha, M. R., Majeed, Z. H., & Khan, T. A. (2014). Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), 510-520.
- Ji, X., Lu, H., Dai, C., Ye, Y., Cui, Z., & Xiong, Y. (2021). Characterization of Properties of Soil–Rock Mixture Prepared by the Laboratory Vibration Compaction Method. *İçinde Sustainability* (C. 13, Sayı 20, s. 11239). <https://doi.org/10.3390/su132011239>.
- Jwaida, Z., Dulaimi, A., Mashaan, N., & Othuman Mydin, M. A. (2023). Geopolymers: The green alternative to traditional materials for engineering applications. *Infrastructures*, 8(6), 98.
- Kalkan, E. (2020). A Review on the Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) for Soil Stabilization. *International*

Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications, 2(1), 38-47.

Kastiukas, G., Zhou, X., & Castro-Gomes, J. (2017). Preparation Conditions for the Synthesis of Alkali-Activated Binders Using Tungsten Mining Waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002029](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002029).

Khasib, I. A., Daud, N. N. N., & Nasir, N. A. M. (2021). Strength development and microstructural behavior of soils stabilized with palm oil fuel ash (POFA)-based geopolymer. *Applied Sciences*, 11(8), 3572.

Kilic, I., & Gok, S. G. (2021). A study on investigating the properties of alkali-activated roller compacted concretes. *Advances in Concrete Construction*, 12(2), 117-123. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.2.117>.

Kop, M., & Yazıcıoğlu, S. (2023). Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Geopolymer Mortars in Thermal Curing Environment. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 11(3), 756-765. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1266544>.

Kr, N., Agnihotri, A. K., & Basak, N. (2023). Microbial induced calcite precipitation (MICP) a sustainable technique for stabilization of soil: A review. *Materials Today: Proceedings*, 93, 357-361. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.303>.

Krishnan, J., & Shukla, S. (2021). Seismic Mitigation Liquefaction—An Extensive Study on New Concepts. İçinde T. G. Sitharam, R. Jakka, & L. Govindaraju (Ed.), *Local Site*

- Effects and Ground Failures* (C. 117, ss. 369-379). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9984-2_32.
- Krivenko, P., Petropavlovsky, O., & Vozniuk, H. (2017). Development of mixture design of heat resistant alkali-activated aluminosilicate binder-based adhesives. *Construction and Building Materials*, 149, 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.138>.
- Kuenzel, C., Li, L., Vandeperre, L., Boccaccini, A. R., & Cheeseman, C. R. (2014). Influence of sand on the mechanical properties of metakaolin geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66, 442-446.
- Lal Mohammadi, E., Khaksar Najafi, E., Zanganeh Ranjbar, P., Payan, M., Jamshidi Chenari, R., & Fatahi, B. (2023). Recycling industrial alkaline solutions for soil stabilization by low-concentrated fly ash-based alkali cements. *Construction and Building Materials*, 393(March), 132083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132083>.
- Lindh, P., & Lemenkova, P. (2022). Shear bond and compressive strength of clay stabilised with lime/cement jet grouting and deep mixing: A case of Norvik, Nynäshamn. *Nonlinear Engineering*, 11, 693-710. <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0269>.
- Liu, J., Guan, Y., Shao, Z., & Wang, H. (2022). Mechanical effect of clay under the acid-base action: A case study on montmorillonite and illite. *Frontiers in Earth Science*, 10, 991776.
- Liu, Z., Fan, C., Min, Y., Liu, C., Li, S., & Li, Y. (2025). An experimental and numerical investigation of influencing factors of gravel vibratory compaction. *Construction and*

- Building Materials*, 473(June 2024), 141084.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141084>.
- Lloyd, R. R. (2009). 8—Accelerated ageing of geopolymers. İçinde J. L. Provis & J. S. J. B. T.-G. van Deventer (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (ss. 139-166). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.139>.
- Mackenzie, K. J. D., & Welter, M. (2014). 18—Geopolymer (aluminosilicate) composites: Synthesis, properties and applications. İçinde I. M. Low (Ed.), *Advances in Ceramic Matrix Composites* (ss. 445-470). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9780857098825.3.445>.
- Madirisha, M. M., Dada, O. R., & Ikotun, B. D. (2024). Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction. *Materials Today Sustainability*, 27(March), 100842.
<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100842>.
- Martin, Ii, J. R., & Olgun, C. G. (2006). Liquefaction Mitigation Using Jet-Grout Columns—1999 Kocaeli Earthquake Case History. *Ground Modification and Seismic Mitigation*, 349-358. [https://doi.org/10.1061/40864\(196\)47](https://doi.org/10.1061/40864(196)47).
- Martínez, A., & Miller, S. A. (2025). Life cycle assessment and production cost of geopolymer concrete: A meta-analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 215, 108018.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108018>.
- Masoero, E., Duque-Redondo, E., Lee, H., Xu, Y., Lolli, F., Kamseu, E., & Akono, A.-T. (2025). *Nanomechanics and Pore Structure of Sodium and Potassium Geopolymer Gels: Experiments, Molecular Dynamics and Coarse-Grained Simulations*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.16582>.

- Matsimbe, J., Dinka, M., Olukanni, D., & Musonda, I. (2022). Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies. *Materials*, 15, 6852.
- Merabtene, M., Kacimi, L., & Clastres, P. (2019). Elaboration of geopolymer binders from poor kaolin and dam sludge waste. *Heliyon*, 5(6), e01938. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01938>.
- Muñoz, Y. O., Villota-Mora, A. J. E., Perretto, F., & Izzo, R. L. dos S. (2025). Eco-friendly stabilization of clayey soil with waste glass powder-based geopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*, 20(3), 557-586. <https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2433195>.
- Murthi, P., Poongodi, K., Saravanan, R., Rajesh Chary, K., & Gobinath, R. (2020). Effect of ratio between Na₂SiO₃ and NaOH solutions and curing temperature on the early age properties of geopolymer mortar. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 981. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/3/032060>.
- Nasır, A. (2025). *Cam Elyaf Katkılı Geopolimer ile İyileştirilen Zeminlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve İstatistiksel Modellemesi*. Harran Üniversitesi.
- Noaman, M. F., Khan, M. A., Ali, K., & Hassan, A. (2022). A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*, 6(September), 100151. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100151>.
- Nwonu, D. C. (2021). Exploring soil geopolymer technology in soft ground improvement: A brief excursion. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6), 460.

- O'Donnell, B., Swarup, A., Sidiq, A., Robert, D., & Setunge, S. (2022). Guidelines for Enzymatic Soil Stabilization. İçinde W. Duan, L. Zhang, & S. P. Shah (Ed.), *Nanotechnology in Construction for Circular Economy-Proceedings of NICOM7, 31 October–02 November, 2022, Melbourne, Australia* (C. 356).
- Özçınar, E. (2024). *Geopolimer İle İyileştirilen Atık Lastik Katkılı Zeminlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Yapay Zeka Destekli Optimizasyonu*. Harran Üniversitesi.
- Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A., & Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 186, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115>.
- Rangan, B. V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *Indian Concr. J*, 88(4), 41-59.
- Rangaswamy, K., & Mohan, R. P. (2025). Strengthening the subgrade clay soil using nano chemical stabilisation. *Soils and Foundations*, 65(4), 101638. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101638>.
- Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History , scours , production and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- Rasskazov, L., Aleksandrov, A., & Chubatov, I. (2017). Effect of Grain Composition and Porosity of Sand on the Possibility of Penetration of Cement Particles. *Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 54(3).

- Razeghi, H. R., Geranghadr, A., Safaee, F., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2024). Effect of CO₂ exposure on the mechanical strength of geopolymer-stabilized sandy soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(2), 670-681.
- Razeghi Tehrani, P., Arjomand, M. A., Behbahaninina, A., & Kargari, N. (2024). Compatibility Studies of N-A-S-H and C-A-S-H Gels in Alkali-Activated Geopolymer Mortar. *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, 43(10), 3737-3747.
- Ricciotti, L., Frettoloso, C., Franchino, R., Pisacane, N., & Aversa, R. (2025). Geopolymer Materials: Cutting-Edge Solutions for Sustainable Design Building. *Sustainability*, 17, 7483. <https://doi.org/10.3390/su17167483>.
- Sa Riberio, R. A., Sa Riberio, M. G., Samuel, D. M., Ozer, A., Numkiatsakul, P., & Kriven, W. M. (2025). Metakaolin-based geopolymer matrix formulations for higher strength and thermal stability. *Materials and Structures*, 58(142), 1-20. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02670-5>.
- Sagastume, A., Caneghem, J. Van, Cogollos, J. B., & Vandecasteele, C. (2012). Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 31, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.035>.
- Sarıcı, T., Özcan, M., & Korkmaz, R. E. (2025). Zayıf bir zeminin ıslahı için oluşturulan geçirimli kazıklarda farklı agrega ve bağlayıcı kullanımının etkisinin araştırılması Investigation the effect of using different aggregates and binders in pervious piles for the soil stabilization of a weak soil. *DUJE*, 16(3), 825-832. <https://doi.org/10.24012/dumf.1702843>.

- Sawarkar, P. G., Pote, A., & Murmu, A. L. (2024). Properties of blast furnace slag geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.179>.
- Shahriar, M. M., Shahnawaz, M. M., Ikra, B. A., Mubashira, J., & Hayder, N. (2025). Influence of Compaction Effort and Soil Stabilizers on the Calibration of the Soil Moisture Sensors Used in Geotechnical Applications. *İçinde Geo-EnvironMeet 2025*. <https://doi.org/10.1061/9780784485682.023>.
- Sharma, K., & Kumar, A. (2020). Utilization of industrial waste—Based geopolymers as a soil stabilizer—A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(3), 97.
- Shi, X., Zha, Q., Li, S., Cai, G., Wu, D., & Zhai, C. (2022a). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer modified clay. *Molecules*, 27(15), 4805.
- Shi, X., Zha, Q., Li, S., Cai, G., Wu, D., & Zhai, C. (2022b). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer modified clay. *Molecules*, 27(15), 4805.
- Si, R., Dai, Q., Guo, S., & Wang, J. (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118502>.
- Somu Alias Ramya, M., & Jeyapriya, S. P. (2019). Behaviourial Study on Geopolymer Column in Soil. *İçinde T. Thyagaraj (Ed.), Ground Improvement Techniques and Geosynthetics* (C. 14, ss. 1-9). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_1.

- Sonmez, B., & Ulusay, R. (2008). Liquefaction potential at Izmit Bay: Comparison of predicted and observed soil liquefaction during the Kocaeli earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1), 1-9.
- Sreelakshmi, S., Huchegowda, B. K., Chithaloori, S., & Kumar, G. K. (2020). Strength and Durability Behaviour of Geopolymer-Stabilized Soil. İçinde M. Latha Gali & R. R. P. (Ed.), *Geotechnical Characterization and Modelling* (C. 85, ss. 585-591). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6086-6_48.
- Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., Hooton, R. D., Ghwhuplqh, W. R., Vxlwdelolw, W. K. H., Dvk, R. I. D. Å., Iru, V., Lq, X. V. H., Frxog, W., Vrph, L., Wkh, R. I., Sureohpdwlf, P., & Ri, F. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcomings, and Solutions. *ACI Materials Journal*, 118(18), 157-167.
- Tahwia, A. M., Heniegal, A. M., Abdellatief, M., Tayeh, B. A., & Elrahman, M. A. (2022). Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass. *Case Studies in Construction Materials*, 17(August). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01393>.
- Thiha, S., Lertsuriyakul, C., & Phueakphum, D. (2018). Shear strength enhancement of compacted soils using high-calcium fly ash-based geopolymer. *Geomate Journal*, 15(48), 1-9.
- Topolnicki, M. (2016). General overview and advances in Deep Soil Mixing. *XXIV Geotechnical Conference of Torino Design, Construction and Controls of Soil Improvement Systems*, 30.
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Abunada, Z., Lemckert, C., & Giustozzi, F. (2025). Carbon Footprint and Uncertainties of Geopolymer Concrete Production: A Comprehensive Life

- Cycle Assessment (LCA). *C Journal of Carbon Research*, 11(55), 1-15. <https://doi.org/10.3390/c11030055>.
- Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358>.
- Vafaei, M., Allahverdi, A., Dong, P., & Bassim, N. (2018). Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration. *Construction and Building Materials*, 193, 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.203>.
- Van Impe, W. (2020). *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. Taylor & Francis.
- Wang, S., Chen, Z., Wu, Z., Gu, L., Su, J., & Zhao, Z. (2022). Mechanical properties and strengthening mechanism of silty sands stabilized with steel slag-based geopolymer binder. *Emergency Management Science and Technology*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.48130/EMST-2022-0015>.
- Wang, S., Su, J., Wu, Z., Ma, W., Li, Y., & Hui, H. (2021). Silty clay stabilization using metakaolin-based geopolymer binder. *Frontiers in Physics*, 9, 769786.
- Wu, D., Cao, K., Chen, K., & Mao, N. (2024). Interfacial characteristics and mechanical behavior of geopolymer stabilizers with clay mineral: A molecular dynamics study. *Applied Clay Science*, 250, 107286.
- Yazdani, H., & Hatami, K. (2016). Sensor-Enabled Geogrids for Stabilization and Performance Monitoring of Earth

Structures: State of Development. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(4), 37.
<https://doi.org/10.1007/s40891-016-0077-z>.

Zhao, C., Li, Z., Peng, S., Liu, J., & Wu, Q. (2024). State-of-the-art review of geopolymer concrete carbonation: From impact analysis to model establishment. *Case Studies in Construction Materials*, 20(March), e03124.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03124>.

Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>.

BÖLÜM 4

METASEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİNİN SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNE UYGULANMASI

Veli BATMAZ¹

Giriş

Nüfusun hızla arttığı ve mevcut su kaynaklarının zarar gördüğü dünyamızda, suya olan talep giderek artmaktadır. Su, canlılar için yaşamın en temel unsurlarından biridir. Bu temel unsurun yapay yöntemlerle üretilmemesi önemini iyice artırmakta ve vazgeçilmez bir hale getirmektedir. Dünyanın su kaynaklarına bakıldığında; toplam yüzey alanının dörtte üçü su ile kaplı olmasına rağmen mevcut suyun (1,400 milyon km³) %2,5'i (35 milyon km³) kullanılabilir tatlı su kaynakları, geriye kalan %97,5'lik kısmı tuzlu su kaynakları oluşturmaktadır. Bu %2,5'lik tatlı su kaynaklarının %0,3'ü (105,000 km³) nehirler ve göllerde kullanılabilir durumda, geriye kalan kısmı kutuplarda ve yüksek dağlarda buz kütleleri halinde ve yeraltında hapsolmuş durumdadır (Muluk vd., 2013). Dünya nüfusu günümüzde 8 milyarı aşmış olup, saniyede ortalama yaklaşık 2,6 kişilik bir artış göstermektedir (Worldometer, 2025).

¹ Öğretim Görevlisi, Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4379-6462

Buna paralel olarak sanayileşmenin hız kazanması, çevre kirliliğinin artması ve su kaynaklarının bilinçsiz biçimde tüketilmesi gibi etkenler, mevcut tatlı su rezervlerinin hem nicelik hem de nitelik açısından giderek azalmasına yol açmaktadır. Bu gelişmeler birlikte değerlendirildiğinde, gerekli önlemler alınmadığı takdirde gelecekte su kaynakları açısından günümüz koşullarından çok daha olumsuz senaryoların ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Küresel ölçekte, içme ve kullanma suyunun tüketicilere güvenli, kesintisiz ve sağlıklı bir biçimde ulaştırılabilmesi amacıyla su dağıtım şebeke sistemleri tesis edilmektedir. Su dağıtım şebeke sistemleri genel olarak iki ana bileşen altında incelenmektedir. Bunlar, şebeke tasarımı ve şebeke tasarımının temel unsurlarından biri olan hidrolik analizdir. Şebeke tasarımı; sistemin ekonomikliğı, kullanıcıların suya erişilebilirliğı, yeterli basınç düzeyi ve su kalitesi açısından beklentilerini karşılayabilme kapasitesini göz önünde bulundurarak boru çapı, ağ konfigürasyonu, pompa ve vana gibi hidrolik elemanların tür ve özelliklerinin belirlenmesidir. Şebeke hidrolik analizi ise belirli bir şebeke geometrisi altında, mevcut veya öngörülen su tüketim senaryolarına bağlı olarak borulardaki debilerin ve düğüm noktalarındaki basınçların dağılımını tahmin etmeye yönelik hesaplama ve değerlendirme süreçlerini kapsamaktadır (Moosavian, 2018). Literatürde yer alan çalışmalar, su dağıtım sistemleri içerisinde yer alan bileşenlerin maliyet dağılımında iletim ve dağıtım şebekelerinin önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan bir çalışmada, kaynak temini, toplama, depolama, arıtma, iletim ve dağıtım bileşenleri dikkate alındığında, iletim ve dağıtım şebekelerine ait maliyet oranının yaklaşık %56 düzeyinde olduğu rapor edilmiştir (Özdağlar vd., 2006). Benzer şekilde, başka bir çalışmada bu oranın %70'e kadar ulaştığı ifade edilmiştir (Dandy ve Engelhardt, 2006). Bu bulgular, su dağıtım şebekelerinin tasarım ve optimizasyonunun ekonomik açıdan kritik bir öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 1 Su dağıtım sistemlerinin maliyet dağılımı.

Su dağıtım sistemleri	
İletim ve dağıtım	%56
Arıtma	%26
Depolama	%9
Kaynak	%8
Diğerleri	%1

Kaynak: (Özdağlar vd., 2006).

Bir su dağıtım sistemindeki maliyetler, kurulum ve işletme maliyetleri olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir. Bu çalışmada, sistem kurulum maliyeti ile doğrudan, işletme maliyeti ile dolaylı olarak ilgili olan su dağıtım şebekelerinin optimum tasarımı konusu ele alınmıştır. Toplam maliyet içerisinde yüksek orana sahip iletim ve dağıtım, borular yardımıyla yapıldığı için kurulum maliyetini belirleyen temel faktörün boru çapı olduğu anlaşılmaktadır. Şebekelerin toplam sistem maliyeti içerisinde yüksek bir paya sahip olması, bu alanda ayrıntılı analizlerin ve optimizasyona yönelik çalışmaların yürütülmesini zorunlu kılmıştır. Nitekim bakıldığında geçmişten günümüze daha düşük maliyetli su dağıtım şebeke tasarımı yapmak için birçok çalışma yapılmış ve hala yapılmaya devam etmektedir. Su dağıtım şebekelerinin hesap esasları incelendiğinde tasarım sürecini karmaşık ve çok değişkenli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Aşağıda bir içme suyu şebeke tasarımını karmaşık ve manuel olarak çözülmesini imkânsız hale getiren sebepler maddeler halinde sunulmuştur.

1. Şebeke hidrolik analizinde enerji ve süreklilik denklemlerinin doğrusal olmayan yapıda olması,
2. Boru içi akış hızlarının belirli alt ve üst sınırlar içerisinde tutulma zorunluluğu,

3. Düğüm noktalarındaki basınçların hizmet koşullarını sağlayacak minimum ve maksimum değerlerle sınırlandırılması,
4. Şebeke boyunca enerji kayıplarının ve kot farklarının dikkate alınmasının gerekliliği,
5. Her düğüm noktasında kütlenin korunumu ilkesinin sağlanması,
6. Boruların yalnızca belirli standart çaplarda üretilmesine rağmen bu çap alternatiflerinin oldukça geniş bir seçim aralığına sahip olması.

Yukarıda ifade edilen maddeler bu karmaşık sistemlerin çözülmesi gereken önemli bir optimizasyon problemi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın odak noktası, ticari olarak üretilebilen boru çapları arasından en uygun maliyeti sağlayan şebeke konfigürasyonunun farklı metasezgisel algoritmalar ile belirleyerek karşılaştırmaktır. Ancak bunu yaparken şebekedeki hidrolik kısıtlarında dikkate alınması gerekmektedir.

Bu alandaki ilk çalışmalar arasında Schaake Jr ve Lai (1969) öne çıkmaktadır. Araştırmacılar, New York su dağıtım şebekesini esas alarak gelecekteki su talebini bir kapasite genişletme problemi olarak ele almış ve küresel optimum maliyeti Dinamik Programlama (DP) yöntemiyle araştırmışlardır. Bunu takiben Alperovits ve Shamir (1977), sekiz borudan oluşan bir test şebekesi üzerinde Lineer Programlama (LP) yaklaşımıyla optimum çözümü incelemiştir. Bu şebeke daha sonra literatürde yaygın biçimde kullanılan bir test ağı hâline gelmiştir. Fujiwara ve Khang (1990) ise Hanoi şehir şebekesinin optimizasyonunu LP yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Uzun yıllar boyunca doğrusal ve doğrusal olmayan geleneksel optimizasyon yöntemleri kullanılmış olsa da su dağıtım şebekelerinin içerdiği doğrusal olmayan eşitlikler nedeniyle bu yaklaşımların yeterli performans göstermediği anlaşılmıştır. Bu

nedenle 1990'lı yıllardan itibaren, doğadan esinlenen metasezgisel optimizasyon algoritmaları şebeke tasarımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Metasezgisel yöntemlerin düşük maliyetli çözümler üretmede başarılı oldukları ancak kabul edilebilir çözümlere ulaşabilmek için çok sayıda değerlendirme gerektirdikleri için önemli bir dezavantaja sahip oldukları belirtilmiştir (Mohan ve Babu, 2010).

1990'lı yıllardan itibaren birçok metasezgisel optimizasyon metodu su dağıtım şebeke optimizasyonunda kullanılmaya başlanmıştır. Sezgisel optimizasyon metotlarından olan Genetik Algoritma (GA) (Afshar, 2009; Dong vd., 2012), Tabu Arama (TS)(da Conceicao Cunha ve Ribeiro, 2004), Yapay Arı Koloni algoritması (ABC) (Yılmaz vd., 2020), Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması (PSO) (Babu ve Vijayalakshmi, 2013; Ezzeldin vd., 2014), Harmoni Arama (HS) (Baek vd., 2010; Geem, 2006), Karışmış Sıçrayan Kurbağa Algoritması (SFLA) (Eusuff ve Lansey, 2003), Diferansiyel Evrim algoritması (DE) (Mansouri ve Mohamadizadeh, 2017; Suribabu, 2010), Karınca Koloni Optimizasyon (ACO) algoritması (Ostfeld ve Tubaltzev, 2008; Simpson vd., 2001) gibi birçok sezgisel optimizasyon metodu su dağıtım şebeke optimizasyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Genel olarak sezgisel metotların geleneksel metotlardan daha başarılı sonuçlar elde ettiği ifade edilmektedir. Ancak Mohan ve Babu (2010) sezgisel metotların dezavantajını, optimum sonuca uzun sürede ve çok sayıda iterasyon ile ulaşmak olarak ifade etmişlerdir. Ayrıca bu yöntemlerle elde edilen çözümlerin global optimum olduğunun kesin olarak belirlenememesi, sezgisel optimizasyon tekniklerindeki önemli bir eksikliktir. Bazı araştırmacılar, optimum sonuca kısa sürede ve daha az sayıda iterasyon ile ulaşmak için optimizasyon tekniklerini hibrit bir şekilde kullanarak test etmişlerdir (Batmaz ve Kayaalp, 2023; Bilal ve Pant, 2020; Ezzeldin vd., 2023). Optimizasyon tekniklerinin ürettikleri optimum değerlerin farklı olması, her tasarımda aynı etki

göstermemesi, çoğu yerel optimuma takılıp global optimum değere ulaşamaması üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur. Bu durumu değerlendirmek için özellikle bazı araştırmacılar optimizasyon tekniklerinin büyük ve karmaşık şebekelerdeki performansını test ettiler (Batmaz ve Ugur, 2025). Küçük test şebekelerinde başarılı olan bir algoritmanın aynı parametrelerle karmaşık problemlerde aynı performansı göstermediklerini belirttiler.

Bu çalışmada, metasezgisel optimizasyon tekniklerinden GA, PSO, ABC, ACO, HS, DE, SA, BBO ve IWO olmak üzere toplam 9 farklı algoritma Alperovits ve Shamir şebekesinde, aynı sınırlayıcılar altında test edilmiştir. Bu çalışma ile optimizasyon teknikleri ile elde edilen optimum sonuçlar ve bu sonuçlara ulaşma sürelerinin detaylı karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Materyal ve Metot

Su Dağıtım Şebekelerinin Optimum Tasarımı

Su dağıtım şebekelerinin optimum tasarımı yapılırken amaç doğrultusunda bazı eşitlikler kullanılmaktadır. Burada amaç ihtiyaç duyulan suyu en düşük maliyetle tüketiciye ulaştırmaktır. Bu doğrultuda şebeke tasarımı yapılırken amaç fonksiyonumuz eşitlik 1 ile ifade edilmektedir.

$$f = \min \sum_{i=1}^M CD_i L_i \quad (1)$$

Burada f amaç fonksiyonunu, M şebekedeki toplam boru sayısını, CD_i seçilen i numaralı boruya karşılık gelen boru birim maliyetini, L_i ise i numaralı borunun uzunluğunu ifade etmektedir. Bu amaç fonksiyonu için optimum maliyet hesaplanırken şebekedeki borularda ve düğüm noktalarında veya başka bir fiziksel veya fiziksel olmayan bileşeninde tasarım kriterlerine göre belli

sınırlayıcılar eklendiğinden, amaç fonksiyonu değeri bu sınırlayıcıları da sağlayan değerlerden oluşmalıdır. Bu çalışmada şebekedeki boru çapları için bir optimizasyon işlemi yapılırken düğüm noktalarında istenen işletme basıncını sağlayacak şekilde basınç sınırlayıcısı eklenmiştir. Düğüm noktalarında basınç sınırlayıcısı eşitlik 2 ile ifade edilmektedir.

$$P_{min} \leq P_j \leq P_{max} \quad j = 1 \dots \dots \dots N \quad (2)$$

Burada N şebekedeki toplam düğüm noktası sayısını, P_{min} düğüm noktalarındaki minimum işletme basıncını, P_{max} düğüm noktalarındaki maksimum işletme basıncını ve P_j ise j numaralı düğüm noktasındaki basıncı temsil etmektedir. Düğüm noktasındaki işletme basınç kontrolü yapılırken, düğüm noktalarındaki basıncın belirlenen alt (P_{min}) ve üst (P_{max}) sınırlar arasında kalmasını sağlamak için bir ceza maliyet değeri tanımlanır. Ceza maliyeti eşitlik 1 'deki toplam maliyete eklenerek eşitlik 3 ile tanımlanmıştır.

$$f = \min \sum_{i=1}^M CD_i L_i + P_{ceza} \quad (3)$$

Düğüm noktalarındaki basınç sınırları ihlal edince o çözüm değerine ceza maliyet değeri (P_{ceza}) eklenerek (9×10^{30} gibi oldukça büyük bir değer seçildi) toplam şebeke maliyeti arttırıldı. Ceza maliyeti şebeke özelliklerinin bir kombinasyonu şeklinde tanımlanarak dinamik bir ceza fonksiyonu da tanımlanabilir. Sonraki aşamalarda çözüm fonksiyonları maliyet değerine göre sıralanıp minimum maliyetli çözüm optimal çözüm olarak alınacağından sınırları ihlal eden çözüm elenmiş olacaktır. Düğüm noktalarındaki süreklilik kontrolü eşitlik 4 kullanılarak yapılır.

$$Q_j^{giren} - Q_j^{çıkan} - Q_j^{çekilen} = 0 \quad j = 1 \dots \dots \dots N \quad (4)$$

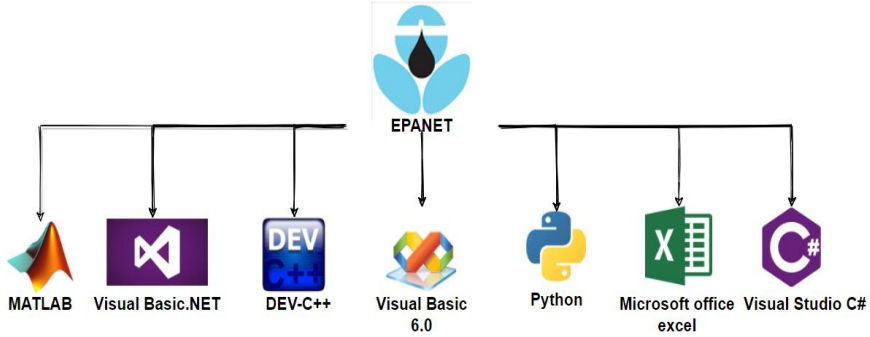
Burada; Q_j^{giren} düğüme giren debi, $Q_j^{çıkan}$ düğümden çıkan debi, $Q_j^{çekilen}$ düğümden çekilen debi ve N düğüm nokta sayısıdır. Böylece optimizasyon sırasında her bir düğüm noktasının ihtiyacı karşılaması sağlanmış olur. Bu çalışmada, başlangıç çözüm kümesi rastgele üretilmiş olup, boru maliyetini içeren bir amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Modelde yer alan kısıtların sağlanmaması durumunda, çözümün toplam şebeke maliyetine önceden belirlenmiş bir ceza maliyeti eklenerek amaç fonksiyonu yapay olarak artırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, hidrolik ve tasarımsal kısıtları ihlal eden çözümlerin optimum çözüm kümesi içerisinde yer alması etkin bir şekilde engellenmiştir.

Epanet-Matlab Araç seti

EPANET, içme suyu dağıtım şebekelerinin hidrolik ve su kalitesi analizini gerçekleştirmek amacıyla geliştirilmiş, açık kaynaklı bir simülasyon yazılımıdır. Yazılım; borular, düğüm noktaları, depolar, pompalar ve vanalar gibi şebeke bileşenlerinin davranışını zaman bağımlı olarak modelleyebilmektedir. Ancak EPANET'in kendi grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) karmaşık optimizasyon, algoritmalarla problemi kontrol etme ve ileri düzey veri işleme açısından sınırlılıklar içermektedir. Bu sınırlamaların aşılması amacıyla EPANET araç seti yaygın olarak kullanılmaktadır. EPANET araç seti hesaplama kitaplığınıza başka bir yazılım programına bağlamanıza ve kullanıcıya EPANET'i kendi ihtiyaçlarına göre özelleştirebilme imkânı sağlayan dinamik bir kitaplığa (DLL) sahip olan dosya klasörüdür. Bu dinamik kitaplık EPANET verilerinin harici bir program tarafından çağrılarak okunmasını ve kendi problem türümüze, amacımıza uygun bir şekilde veriler üzerinde değişiklik yapma ve tasarlanmış olan ağı kontrol etme fırsatı sunan dosya klasörlerinden oluşmaktadır. Windows için Dinamik Bağlantı Kitaplığı (DLL), EPANET verileri, Şekil 1'de verilen farklı programlama dillerinde harici yazılımlar

tarafından bir programlama arabirimi aracılığıyla çağrılabilir (Eliades vd., 2016).

Şekil 1 EPANET araç setinin kullanıldığı bazı yazılım programları.



Bu yazılım programlarıyla EPANET araç seti kullanılarak aşağıdaki işlemler yapılabilir;

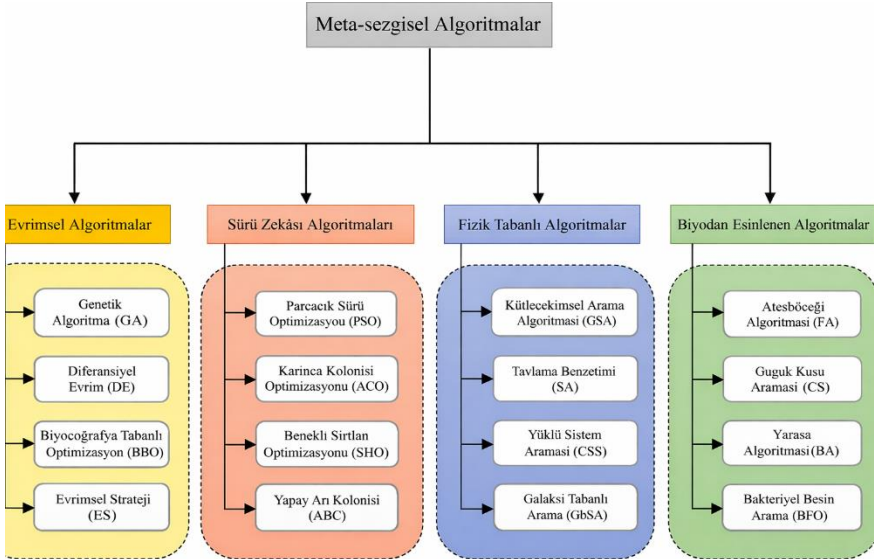
- EPANET 'de tasarlanmış bir ağ sisteminin verilerini (input dosyası) okumak ve ağı modellemek için gereken tüm veri yapılarını çalıştırmak
- Üzerinde çalışılan ağın verilerine erişmek ve veri değerlerinde değişiklik yapmak
- Üzerinde çalışılan ağ için kısa veya uzun süreli hidrolik simülasyonları çalıştırmak
- Simülasyon sonuçları hakkında raporlar oluşturabilmek (Rossman, 1999).

Bu çalışmada EPANET, MATLAB programı ile kullanılmıştır. MATLAB, sayısal hesaplama, optimizasyon, veri analizi ve görselleştirme konularında güçlü araçlar sunmakta; EPANET ise hidrolik çözümleyici olarak görev yapmaktadır. Bu iki yazılımın birlikte kullanılması sayesinde su dağıtım şebekelerinde optimizasyon tabanlı analizler etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon problemleri, mühendislikten ekonomiye, yapay zekâdan çevre sistemlerine kadar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Gerçek hayat problemlerinin çoğu; doğrusal olmayan, çok değişkenli, kısıtlı, çok amaçlı ve yüksek boyutlu yapıdadır. Bu tür problemlerde klasik gradyan tabanlı yöntemler, yerel minimumlara takılma veya ekonomik olmamaları nedenleriyle tercih edilmemektedir. Bu bağlamda geliştirilen metasezgisel optimizasyon algoritmaları, deterministik olmayan, esnek ve probleme özgü olmayan yapıları sayesinde karmaşık problemlerin çözümünde güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 2 Meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması.



Meta-sezgisel algoritmalar, karmaşık ve geniş arama uzayına sahip olan, geleneksel matematiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı zorlu optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan yüksek seviyeli arama stratejileridir. Bu algoritmalar, genellikle doğadaki süreçlerin

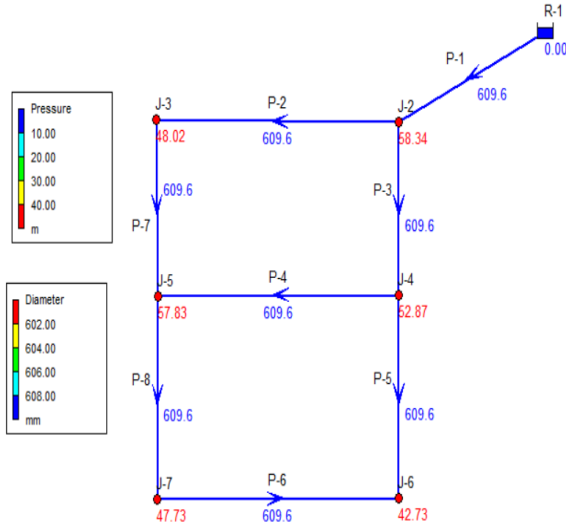
(biyolojik, fiziksel veya sosyal) matematiksel modellerine dayanır ve türev bilgisine ihtiyaç duymadan global optimuma ulaşmayı hedeflerler (Bilal ve Pant, 2020). Şekil 2’de metasezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması verilmiştir. Daha kapsamlı farklı açılardan sınıflandırmalar olmakla birlikte burada sadece genel bir çerçeve çizmek için basit bir sınıflandırma ve örnek algoritmalar sunulmuştur. Doğada meydana gelen süreçler, belirli denge ve optimizasyon ilkeleri çerçevesinde gerçekleşmektedir. Doğal sistemlerin işleyişi incelendiğinde, çevresel koşullara uyum sağlama, olumsuzlukları minimize etme ve kaynakları etkin kullanma yönünde gelişmiş mekanizmaların varlığı dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, doğadaki olayların oluşum süreçlerinin, canlıların yaşam stratejilerinin ve problemlerin doğal yollarla nasıl bertaraf edildiğinin sistematik bir gözlem ve analizle ele alınması, söz konusu sistemlerin ardındaki düzenin ve etkinliğin anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Kâinata konulmuş bu kanunların işleyiş biçiminin kavranması, insanlığın karşı karşıya olduğu karmaşık problemlere yönelik çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesinde ilham verici bir çerçeve sunmakta; özellikle doğadan esinlenen yöntemlerin mühendislik, bilim ve karar verme süreçlerinde uygulanmasına zemin hazırlamaktadır. Tek başına kullanılan algoritmaların yerel optimumlara takılma veya yüksek hesaplama maliyeti gibi zayıflıklarını gidermek için farklı algoritmalar birleştirilerek hibrit olarak kullanmak mümkündür. Maliyetin en aza indirilmesi ve güvenilirliğin en üst düzeye çıkarılması gibi birbiriyle çelişen hedefleri aynı anda optimize etmek için çok amaçlı optimizasyon algoritmaları da geliştirilmiştir. Algoritmaların performansı, sahip oldukları parametrelere yüksek derecede duyarlıdır. Seçilen parametreler bir problemde iyi sonuç verirken başka bir problemde aynı iyi sonucu verememektedir. Bu durum önemli bir dezavantajdır. Probleme özgü optimum parametre değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu eksikliklerinin giderilmesi halinde, özellikle mühendislik problemlerinin çözümünde önemli bir

potansiyele sahip oldukları açıktır. Bu çalışmada 9 farklı algoritma Alperovits ve Shamir test şebekesinde maliyet optimizasyonu için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Alperovits ve Shamir Şebekesi

Şekil 3 Optimizasyon öncesi Alperovits ve Shamir şebekesi Epanet tasarımı.



Alperovits ve Shamir şebekesi 8 boru, 6 düğüm noktası ve bir rezervuardan oluşmaktadır. Her bir boru 1,000 m uzunluğunda olup, Williams – Hazen katsayısı $C_{WH}=130$ olarak alınmıştır. Şebeke Epanet programıyla rastgele seçilen başlangıç çapları kullanılarak tasarlanmıştır. Başlangıç tasarımının kolay ve kısa sürede yapılması için bütün boruların başlangıç çap değeri aynı seçilmiştir. Şebekede düğüm noktalarında istenen minimum basınç değeri 30 m olarak

belirtilmiştir. Bu tasarımda da mevcut kısıtlara bağlı kalarak tasarım yapılmıştır.

Şebekede kullanılan ticari boru çapları ile boru çapına karşılık gelen boru birim maliyeti Tablo 2’de, optimizasyon öncesi şebekenin EPANET tasarımı Şekil 3’te, düğüm noktasındaki zemin kotu, ihtiyaç debisi ve boruların uzunluğu ile rastgele seçilen başlangıç boru çapları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 2 Alperovits ve Shamir şebekesi için kullanılacak ticari çap ve birim maliyet değerleri.

Çap (inç)	Çap (mm)	Birim maliyet (Birim/m)
1	25.4	2
2	50.8	5
3	76.2	8
4	101.6	11
6	152.4	16
8	203.2	23
10	254	32
12	304.8	50
14	355.6	60
16	406.4	90
18	457.2	130
20	508	170
22	558.8	300
24	609.6	550

Tablo 3 Alperovits ve Shamir şebekesi optimizasyon öncesi düğüm noktası ve bağlantı özellikleri.

Düğüm ID	Kot (m)	Talep (m ³ /s)	Bağlantı ID	Çap (mm)
J-2	150	100.00	P-2	609.6
J-3	160	100.00	P-3	609.6
J-4	155	120.00	P-4	609.6
J-5	150	270.00	P-5	609.6
J-6	165	330.00	P-8	609.6

J-7	160	200.00	P-6	609.6
R-1	210	-1,120.00	P-7	609.6
			P-1	609.6

Alperovits ve Shamir şebekesinin optimizasyonu sonucunda kullanılan GA, ABC, PSO, HS, ACO, BBO, SA, DE, IWO algoritmaları düğüm noktasında aynı basınç değerine, borularda aynı hız, debi ve çap değerine dolayısıyla aynı maliyeti (419,000 birim) elde etmiştir. 148 farklı şebeke tasarım seçeneği arasından kısa sürede optimal tasarım değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4 Alperovits ve Shamir şebekesinin GA, PSO, ABC, HS, ACO, DE, BBO, SA ve IWO algoritmaları ile optimizasyon sonucunda elde edilen değerler.

Düğüm ID	Basınç (m)	Bağlantı ID	Çap (mm)	Hız (m/s)	Akım (m ³ /s)	Bağlantı ID
J-2	53.25	P-2	254.00	1.85	336.87	12.78
J-3	30.46	P -3	406.40	1.46	683.13	4.80
J-4	43.45	P -4	101.60	1.12	32.57	14.65
J-5	33.80	P -5	406.40	1.14	530.56	3.00
J-6	30.44	P -8	25.40	0.31	0.56	6.75
J-7	30.55	P -6	254.00	1.10	200.56	4.89
R-1	0.00	P -7	254.00	1.30	236.87	6.66
		P -1	457.20	1.90	1,120.00	6.75

Tablo 5 Alperovits ve Shamir şebekesi için kullanılan algoritmaların performanslarının karşılaştırılması.

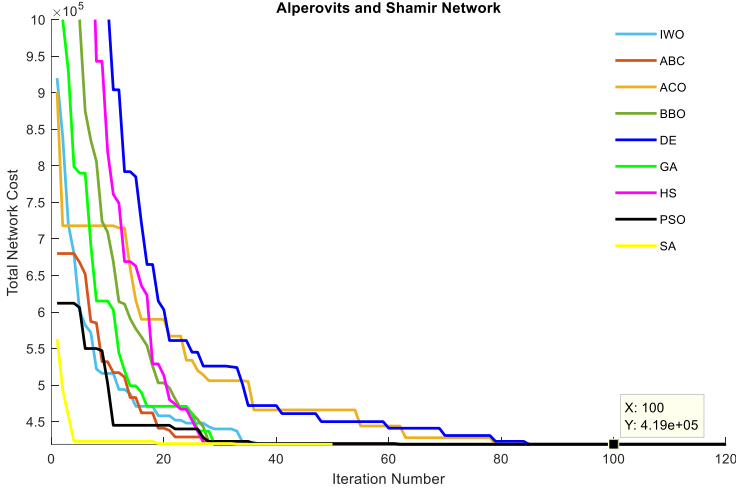
Yöntem	Maliyet (birim)	Değerlendirme sayısı	Optimum maliyete ulaşma süresi (saniye)
SA	419,000	780	9
IWO	419,000	1,480	3
ABC	419,000	2,252	3
BBO	419,000	2,320	4
GA	419,000	4,800	3
PSO	419,000	7,200	5
HS	419,000	16,500	7

ACO	419,000	17,000	13
DE	419,000	72,250	30

Alperovits ve Shamir şebekesinin metasezgisel optimizasyon metotları ile yürütülen maliyet optimizasyon çalışmaları incelendiğinde, aynı sınırlayıcılar altında bulunan en düşük maliyet değeri 419,000 birim olduğu görülmektedir (Tablo 5). Bu çalışmada da literatürde elde edilen optimum değere kullanılan bütün algoritmalarla (GA, ABC, PSO, HS, ACO, DE, BBO, SA, IWO) ulaşılmıştır. Kullanılan algoritmaların performanslarının karşılaştırılması için toplam değerlendirme sayıları ve optimum maliyete ulaşma süreleri hesaplanmış ve Tablo 5’te sunulmuştur. Yapılan çalışmalarla 419,000 birim maliyetin altına inilememiştir ancak farklı değerlendirme sayılarıyla aynı sonuçlar elde edilmiştir. Böyle küçük bir test şebekesi olan Alperovits ve Shamir şebekesinde düşük değerlendirme sayısı ve kısa sürelerde sonuca ulaşılmasına karşın daha büyük şebekelerde optimizasyon işleminin saatler sürmesi düşünülüyor. Bu yüzden en düşük maliyeti elde etmek kadar optimum sonuca kısa sürede ulaşma kabiliyeti de çok önem arz etmektedir. Elde edilen bulgular, optimum maliyete ulaşma süreleri bakımında GA (3 saniye), ABC (3 saniye), IWO (3 saniye), ve BBO (4 saniye), algoritmaları en iyi performans sergilemişlerdir. DE algoritması hem değerlendirme sayısı (72,250) hem de optimum maliyete ulaşma süresi (30 saniye) bakımından en kötü performansı sergilemiştir. Daha önce yapılan çalışmaların değerlendirme sayıları incelendiğinde 419,000 birim maliyete en az değerlendirmeye Geem (2009) PSO ve HS algoritmalarını hibrit bir şekilde kullanarak 204 değerlendirmeye ulaşmıştır. Bu çalışmada ise en az değerlendirme sayısı olan 780 değerlendirme sayısı Tavlama Benzetimi (SA) algoritması ile ulaşmıştır. Burada asıl ele alınan konu algoritmaların yakınsama hızlarının değişken olması probleme göre performanslarının değişmesidir. Şekil 4, farklı meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının iterasyon sayısına bağlı olarak toplam

şebeke maliyetini nasıl düşürdüğünü karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Şekil 4 Alperovits ve Shamir şebekesinin IWO, ABC, ACO, BBO, DE, GA, HS, PSO ve SA yöntemleri ile maliyet optimizasyonu.



Şekil 4 incelendiğinde, tüm algoritmalar iterasyon ilerledikçe amaç fonksiyonunu azaltmakta, yani çözüm kalitesini iyileştirmektedir. Bu durum, algoritmaların küresel minimuma doğru yakınsadığını göstermektedir. PSO ve SA algoritmalarının ilk iterasyonlarda çok hızlı bir maliyet düşüşü sağladığı ve erken aşamada kararlı çözüme ulaştığı görülmektedir. DE ve ACO, daha yavaş yakınsamakla birlikte uzun iterasyonlar sonunda maliyeti kademeli olarak düşürmeye devam etmektedir; bu durum, küresel arama kabiliyetlerinin güçlü olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla, doğadan esinlenen ve evrimsel algoritmaların aynı probleme farklı arama-yakınsama stratejileriyle yaklaştığını söylemek mümkündür. Hızlı yakınsama gerektiren uygulamalarda PSO ve SA öne çıkarken, çözüm uzayının karmaşık ve çok modlu olduğu problemlerde DE, ACO ve HS gibi algoritmaların daha güvenilir sonuçlar sunabileceği söylenebilir. Çünkü bu algoritmalar optimuma daha fazla

değerlendirme ve daha uzun sürede ulaşmalarına rağmen kademeli olarak sürekli bir iyileştirme sergilemişlerdir. Bu durum global arama kabiliyetlerinin daha üstün olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, su dağıtım ağı optimizasyon problemi farklı meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak çözülmüş ve algoritmaların performansları toplam ağ maliyetinin iterasyon sayısına bağlı değişimi üzerinden karşılaştırılmıştır. İncelenen algoritmalar arasında IWO, ABC, ACO, BBO, DE, GA, HS, PSO ve SA yer almakta olup, her bir algoritmanın yakınsama davranışı ve çözüm kalitesi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm algoritmaların iterasyon ilerledikçe amaç fonksiyonunu düşürerek kabul edilebilir çözümlere yakınsadığını göstermektedir. Bununla birlikte, yakınsama hızı ve erken iterasyonlardaki performans açısından algoritmalar arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle PSO ve SA algoritmaları, düşük iterasyon sayılarında toplam ağ maliyetinde hızlı bir düşüş sağlayarak erken aşamada kararlı çözümlere ulaşmıştır. Bu durum, söz konusu algoritmaların pratik mühendislik uygulamalarında hesaplama süresi açısından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

GA, ABC ve IWO algoritmaları ise orta düzeyde bir yakınsama hızı sergilemiş, çözüm süreci boyunca dengeli ve istikrarlı bir iyileşme göstermiştir. Buna karşılık DE, ACO ve HS algoritmalarının daha yavaş yakınsadığı, ancak iterasyonlar ilerledikçe maliyeti kademeli olarak düşürmeye devam ettikleri görülmüştür. Bu davranış, ilgili algoritmaların keşif kabiliyetlerinin güçlü olduğunu ve yerel minimumlara takılma riskinin görece daha düşük olduğunu göstermektedir. Ancak, yakınsama süresi ve çözüm stabilitesi dikkate alındığında, algoritma seçiminin problemin karmaşıklığı ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- Afshar, M. (2009). Application of a compact genetic algorithm to pipe network optimization problems.
- Alperovits, E., ve Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 13(6), 885–900.
- Babu, K. J., ve Vijayalakshmi, D. (2013). Self-adaptive PSO-GA hybrid model for combinatorial water distribution network design. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 4(1), 57–67.
- Baek, C. W., vd. (2010). Development of a PDA model for water distribution systems using harmony search algorithm. *KSCE Journal of civil engineering*, 14(4), 613–625.
- Batmaz, V., ve Kayaalp, N. (2023). Optimization of water distribution networks using hybrid BBO-IWO algorithm. *Urban Water Journal*, 20(2), 205–222.
- Batmaz, V., ve Ugur, I. B. (2025). Circulatory system-based optimization algorithm with dynamic penalty function for optimum design of large-scale water distribution networks. *Engineering optimization*, 57(2), 427–458.
- Bilal, ve Pant, M. (2020). Parameter optimization of water distribution network—a hybrid metaheuristic approach. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(6), 737–749.
- da Conceicao Cunha, M., ve Ribeiro, L. (2004). Tabu search algorithms for water network optimization. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 746–758.
- Dandy, G. C., ve Engelhardt, M. (2006). Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains. *Journal of water resources planning and management*, 132(2), 79–88.
- Dong, X.-l., vd. (2012). A comparative study of differential evolution and genetic algorithms for optimizing the design of

- water distribution systems. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(9), 674–686.
- Eliades, D. G., vd. (2016). EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. Proc. 14th international conference on computing and control for the water industry (ccwi),
- Eusuff, M. M., ve Lansey, K. E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of water resources planning and management*, 129(3), 210–225.
- Ezzeldin, R., vd. (2014). Integer discrete particle swarm optimization of water distribution networks. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 5(1), 04013013.
- Ezzeldin, R., vd. (2023). Hybrid optimization algorithms of firefly with GA and PSO for the optimal design of water distribution networks. *Water*, 15(10), 1906.
- Fujiwara, O., ve Khang, D. B. (1990). A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water resources research*, 26(4), 539–549.
- Geem, Z. W. (2006). Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering optimization*, 38(03), 259–277.
- Geem, Z. W. (2009). Harmony search optimisation to the pump-included water distribution network design. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 26(3), 211–221.
- Mansouri, R., ve Mohamadizadeh, M. (2017). Optimal design of water distribution system using central force optimization and differential evolution. *Int. J. Optim. Civil Eng*, 7(3), 469–491.
- Mohan, S. a., ve Babu, K. J. (2010). Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 117–126.

- Moosavian, S. A. (2018). *Optimal design of water distribution networks under uncertainty* University of British Columbia].
- Muluk, C., vd. (2013). Türkiye'de Suyun Durumu ve Su yönetiminde yeni yaklaşımlar: Çevresel Perspektif [An environmental perspective: Waters of Turkey and new perspectives on water management]. Istanbul, Turkey: Is Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Dernegi-Doga Koruma Merkezi. In.
- Ostfeld, A., ve Tubaltzev, A. (2008). Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 134(2), 107–118.
- Özdağlar, D., vd. (2006). Kompleks Su Dağıtım Şebekelerinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. *Teknik Dergi*, 17(82), 3851–3867.
- Rossman, L. A. (1999). The EPANET programmer's toolkit for analysis of water distribution systems. In *WRPMD'99: Preparing for the 21st Century* (pp. 1–10).
- Schaake Jr, J. C., ve Lai, D. (1969). Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design.
- Simpson, A. R., vd. (2001). Selection of parameters for ant colony optimization applied to the optimal design of water distribution systems. Proc. Int. Congress on Modeling and Simulation, Canberra, Australia,
- Suribabu, C. (2010). Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, 12(1), 66–82.
- Worldometer. (2025). *Mevcut Dünya Nüfusu*. Retrieved 20 Aralık 2025 from <https://www.worldometers.info/tr/dunya-nufusu/>
- Yılmaz, V., vd. (2020). Optimization of water distribution networks using artificial bee colony algorithm. *Niğde Ömer*

*Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1),
377–392.*

BÖLÜM 5

SİGALOV EMMANUEL YEVSEYEVİÇ'İN HAYATI, YAPI MÜHENDİSLİĞİ'NE KATKILARI VE TÜRKİYE'DEKİ AKADEMİK ETKİSİ

KANAT BURAK BOZDOĞAN¹

Giriş

Bilim dünyasına önemli katkılar sağlamış bilim insanlarının yaşam öykülerinin bilinmesi ve gelecek kuşaklara aktarılması, hem bu bilim insanlarına duyulan saygının bir gereği hem de genç kuşakların bilimsel çalışmalara yönlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Kuşkusuz, bireylere yaşarken hak ettikleri değerin verilmesi en ideal olandır; ancak ne yazık ki uygulamada bu durumla yeterince sık karşılaşmamaktadır.

Bu kitap bölümünde, ülkemizde yeterince tanınmayan Rus inşaat mühendisi ve bilim insanı Emmanuel Yevseyeviç Sigalov'un yaşamı, yapı mühendisliği alanına yaptığı bilimsel katkılar ve çalışmalarının Türkiye'deki akademik literatüre olan etkisi incelenecektir. Bu çalışma, aynı zamanda Sigalov'un çalışmalarını ülkemizde tanıtan ve geliştiren Sıracettin Bilyapı'ı anma amacını taşımaktadır. Bunun yanı sıra, önemli çalışmalarıyla yapı mühendisliği literatürüne katkı sunmuş; Yıldırım Ertutar, Ömer

¹ Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7528-2418

Zafer Alku, Ümit Çelebi ve Bengi Arısoy gibi hayatta olan değerli bilim insanlarına da bir saygı ifadesi niteliğindedir.

Hayatı

Sigalov Emmanuel Yevseyeviç (Resim 1), 10 Kasım 1908’de Herson’da dünyaya gelmiştir.

Resim 1 Sigalov Emmanuel Yevseyeviç



Kaynak: Moscow State University of Civil Engineering (2009).

1935 yılında Moskova İnşaat Enstitüsünün gece bölümünü birincilikle bitirmiştir. Sigalov Emmanuel Yevseyeviç, 1941–1945 yılları arasında İkinci Dünya Savaşı sırasında Kızıl Ordu’da inşaat mühendisi olarak görev yapmış; bu süre zarfında birçok operasyona katılmış ve Leningrad (bugünkü St. Petersburg) yakınlarında yaralanmıştır (Resim 2). Savaş sırasında gösterdiği katkılar nedeniyle kendisine Vatanseverlik Nişanı, Kızıl Yıldız Nişanı ve 11 kez madalya verilmiştir (Moskova Devlet İnşaat Üniversitesi [MGSÜ], 2009).

Resim 2 Sigalov Emmanuel Yevseyeviç'in askerlik günleri



Kaynak: Moscow State University of Civil Engineering (2009).

Sigalov Emmanuel Yevseyeviç, 1938 yılında Sima Solomonovna ile evlenmiş ve bu evlilikten iki kız çocuğu dünyaya gelmiştir. Akademik çalışmalarının yanı sıra matematik, tarih, edebiyat, yabancı diller ve sanat alanlarına ilgi duyan Sigalov, resimle uğraşmış, şiirle ilgilenmiş ve piyano çalmıştır. 31 Ocak 2001 tarihinde hayatını kaybeden Emmanuel Yevseyeviç Sigalov, inşaat mühendisliği alanında yaptığı çalışmalarla bilim dünyasına önemli katkılar bırakmıştır.

İnşaat Mühendisliği'ne Olan Katkıları

Sigalov Emmanuel Yevseyeviç, Rusya'nın en köklü ve saygın üniversitelerinden biri olan Moskova İnşaat Mühendisliği Üniversitesinde 1935 yılında yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak akademik kariyerine başlamış; 1948 yılında doçent unvanını alarak aynı üniversitede tam zamanlı olarak görev yapmaya devam etmiştir (Moskova Devlet İnşaat Üniversitesi [MGSÜ], 2009). Akademik

alışmalarının yanı sıra, özellikle endüstriyel yapıların tasarımı ve inşaat süreçleri alanındaki bilgi ve deneyimini farklı ülkelere aktarmış; bu kapsamda Türkiye’de Cumhuriyet’in erken dönem sanayileşme hamleleri çerçevesinde inşa edilen Nazilli Tekstil Fabrikası (1935–1936) ve Kayseri Tekstil Fabrikası (1934–1935) projelerinde görev almıştır. Söz konusu projelerde uygulanan hızlı inşaat teknikleri, rasyonel taşıyıcı sistem çözümleri ve planlama yaklaşımları, Türkiye’de modern endüstriyel yapı anlayışının gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Sigalov, bu çalışmalarının yanı sıra Rusya ve Polonya’da da çeşitli mühendislik projelerinde yer alarak uluslararası ölçekte etkin bir mühendislik pratiği ortaya koymuştur.

1974 yılında profesör unvanını alan Sigalov Emmanuel Yevseyeviç, 1990 yılında emekli oluncaya kadar farklı dersler vermiş; bu süreçte 12 doktora tezi ile çok sayıda yüksek lisans tezine danışmanlık yapmıştır. Sigalov Emmanuel Yevseyeviç, inşaat mühendisliğinin yapı mekaniği alanında 100’n üzerinde bilimsel çalışma yayımlamıştır. alışmaları ağırlıklı olarak betonarme ve öngerilmeli yapılar, yapıların dinamik ve deprem davranışları, çok katlı yapıların modellenmesi ve hesap yöntemleri ile kabuklar ve temeller için geliştirilen yeni hesap yaklaşımları üzerine yoğunlaşmıştır.

Prof. Sigalov, Prof. V. N. Baykov ve Murashev V.I ile birlikte “*Betonarme Yapılar zerine Genel Kurs*” adlı kitaplar yazmış (Murashev vd,1976; Sigalov & Murashev,1981); eser daha sonra İngilizce, Fransızca, İşpanyolca, Arapça ve Portekizce olmak üzere beş farklı dilde yayımlanmıştır (Resim 3).

Resim 3 Sigalov Emmanuel Yevseyeviç'in kitapları



Kaynak: Moscow State University of Civil Engineering (2009).

Çalışmalarının Türkiye Etkileşimi

Sigalov Emmanuel Yevseyeviç'in çalışmalarını Türkiye'de ilk kez tanıtan ve geliştiren isim Sıracettin Bilyap olmuştur (Resim 4). Rus asıllı olan Sıracettin Bilyap (1923–1996)'in Rusça adı Serj Poraponoff'tur. Bilyap, 1953 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesinden “yüksek mühendis” olarak mezun olmuş; 1959 yılında ise aynı üniversiteden “doktor mühendis” unvanını almıştır. Akademik çalışmalarını inşaat mühendisliğinin yapı mekaniği alanında yürüten Bilyap, Sigalov'un geliştirdiği kuramsal yaklaşımların Türkiye'de tanınmasına ve uygulanmasına önemli katkılar sağlamıştır.

Resim 4 Sıracettin Bilyap



Sıracettin Bilyap, aynı zamanda Türkiye'nin resmî ilk satranç şampiyonu olup, yurt dışında katıldığı çok sayıda turnuvadan derecelerle dönmüştür. Akademik ve mesleki yaşamı boyunca İstanbul Teknik Üniversitesi, Ege Üniversitesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi gibi yükseköğretim kurumlarında; ayrıca Devlet Su İşleri (DSİ) ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) gibi kamu kuruluşlarında görev almış, bunun yanı sıra bir süre serbest inşaat mühendisi olarak da çalışmıştır.

Bilyap, özellikle Sigalov'un perde-çerçeve sistemlerin statik ve dinamik (serbest titreşim) analizine yönelik çalışmalarını Türkiye'de *“Perde-Çerçeve Sistemlerin Diferansiyel Denklem Yöntemiyle Çözümü”* başlığı altında tanıtmış; bu yöntemin geliştirilmesine çalışma arkadaşlarıyla birlikte önemli katkılar sağlamıştır.

Bu kapsamda, başta Yıldırım Ertutar, Ömer Zafer Alku ve Ümit Çelebi olmak üzere birçok değerli akademisyen ve inşaat mühendisinin doktora tezlerine danışmanlık yapmıştır. Ayrıca, kendisi ve çalışma arkadaşları bu alanda çok sayıda yüksek lisans tezi ve bilimsel çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, dönemin teknik ve hesaplama olanakları dikkate alındığında, söz konusu araştırmaların son derece nitelikli ve özgün olduğu görülmektedir. Aşağıda sunulan alt bölümde bu çalışmaların genel bir değerlendirmesi ve özeti verilecektir.

Perde-Çerçeve Sistemler Üzerine Türkiye’de Üretilmiş Çalışmalar

Sıracettin Bilyap, bu konudaki ilk çalışmasını 1978 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi Dergisi'nde yayımlamıştır (Bilyap, 1978). Söz konusu çalışma, perde-çerçeve sistemlerin statik analizinin diferansiyel denklemlerin çözümü yoluyla elde edilmesini kapsamaktadır.

Daha sonra, 1979 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayınları kapsamında iki adet kitap yayımlamıştır (Bilyap, 1979a; Bilyap, 1979b). Aynı yazarın yine 1979 yılına ait bir makalesi daha bulunmaktadır (Bilyap, 1979c). Bu çalışmalarda, perde-çerçeve sistemin statik yükler altındaki davranışı ele alınmış olup, söz

konusu sistem için elde edilen diferansiyel denklem Denklem (1)'de gösterildiği şekilde ifade edilmiştir.

$D \frac{dy^4}{dx^4} - K_s k^2 \frac{dy^2}{dx^2} - \frac{K_s}{D_0} M_0 - p(x) = 0$	(1)
--	-----

Burada y , yatay yer değiştirme fonksiyonunu; K_s , çerçevenin kayma rijitliğini; D , düşey elemanların (perdeler ve kolonlar) eğilme rijitlikleri toplamını; D_0 , eksenel kuvvetlerden kaynaklanan şekil değiştirmelerin eğilme davranışına karşılık gelen rijitliği; M_0 , dış kuvvetlerin x seviyesindeki momentini ve $p(x)$, yatay doğrultuda etkiyen yayılı yükü ifade etmektedir. k^2 ise Denklem (2)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$k^2 = 1 + \frac{D}{D_0}$	(2)
---------------------------	-----

Burulmalı perde-çerçeve sistemler için ise Bilyap ve çalışma arkadaşları tarafından bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir (Bilyap, 1981; Bilyap vd., 1986; Bilyap vd., 1987a; Bilyap vd., 1987b; Çelebi & Bilyap, 1991a; Çelebi & Bilyap, 1991b; Çelebi & Bilyap, 1992). Ömer Zafer Alku, döşemelerin kendi düzlemleri içinde eğilmesinin perde-çerçeve sistemlerin yapısal davranışına etkisini incelemiştir (Alku, 1981).

Ömer Zafer Alku (Resim 5), çalışmasında kesikli perde-çerçeve sistemlerin statik analizi için iki bölgede tanımlanan diferansiyel denklemlerin çözümüne dayalı bir yöntem geliştirmiş; önerilen yaklaşımın uygunluğunu literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur (Alku, 1986). Yıldırım Ertutar (Resim 6) ise değişken kesitli çerçevelerin statik analizi için yöntemi geliştirerek çözüm sürecinde pratik bağıntılar önermiştir (Ertutar, 1987). Alku ve Ertutar (1989), mafsallı bağlantılı kirişlere sahip birleşik çerçevelerin kayma rijitliği için bir bağıntı geliştirmişlerdir.

Yıldırım Ertutar ve Bengi Arısoy farklı açıklık sayısına sahip birleşik çerçevelerin eşdeğer kayma rijitliğinin bulunması için bir

dizi çalışma yapmışlardır (Ertutar & Arısoy,1993a; Ertutar & Arısoy,1993b; Ertutar & Arısoy,1994). Mehmet Ersen Ülküdaş kayma yer değiştirmeleri önemli mertebede olan perdeler için bir diferansiyel denklem yaklaşımı önermiştir (Ülküdaş,1997).

Resim 5 Ömer Zafer Alku



Resim 6 Yıldırım Ertutar



Bir başka çalışmada, perde-çerçeve sistemlerin spektral analizi amacıyla mod birleştirme yöntemine esas dinamik karakteristikler, ilk üç mod için Sigalov'un çalışmaları temel alınarak elde edilmiş ve önerilen yaklaşımın geçerliliği gösterilmiştir (Bozdoğan vd.,2005). Başka bir çalışmada ise perde altının mafsallı

olması durumu için sistemin dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve mühendislik uygulamalarında pratik kullanım amacıyla sunulmuştur (Bozdogan & Ozturk,2016).

Diğer bir araştırmada, perde-çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan analizi için diferansiyel denkleme dayalı bir fiziksel model kullanılmıştır (Halimi & Bozdogan,2023).

Dündar ve Kırıl, perde-çerçeve sistemlerinin diferansiyel denklem yöntemiyle çözümünü gerçekleştiren bir bilgisayar programı sunmuşlardır (Dündar & Kırıl,1986). Atımtay ve çalışma arkadaşları ise perde-çerçeve sistemlerin statik analizine ilişkin temel denklemleri farklı bir bakış açısıyla yorumlayarak literatüre katkıda bulunmuştur (Tekeli vd., 2013; Tekeli & Atımtay, 2015).

Kaynakça

Alku, O. Z. (1981). Döşemelerin kendi düzlemlerinde eğilmesi durumunda perde-çerçeve sistemlerinin incelenmesi. *II. Ulusal Teknik Kongre Bildirileri* içinde (ss. 122–129). Trabzon, Türkiye.

Alku, Ö. Z. (1986). Kademeli veya kesik perdeler içeren binaların yatay kuvvetler etkisinde yaklaşık hesabı. *Deprem Araştırma Bülteni*, 13(53), 5–31.

Alku, Ö. Z., & Ertutar, Y. (1989). Mafsallı bağlantı kirişli bir açıklıklı birleşik çerçevenin kayma rijitliği. *Deprem Araştırma Bülteni*, 16(66), 90–100.

Baykov, V. N., & Sigalov, E. E. (1983). *Reinforced concrete structures: Vol. 2. Design of buildings and structures* (A. Kuznetsov, Trans.). Moscow: Mir Publishers. (Original work published 1978).

Bilyap, S. (1978). Über die Kippung des I-Trägers mit stetig veränderlicher Höhe. *E.Ü. İnşaat Fakültesi Dergisi*, 2.

Bilyap, S. (1979a). Betonarme yüksek yapılarda perde-çerçeve sistemlerinin yatay yüklere göre hesabı. İzmir: Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayınları No. 2.

Bilyap, S. (1979b). Betonarme yüksek yapılarda burulmasız perde-çerçeve sistemlerinin yatay kuvvetlere göre yaklaşık hesap yöntemleri ve dinamik karakteristikleri. İzmir: Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayınları No. 3.

Bilyap, S. (1979c). On the solution of combined frame and shear wall systems subjected to lateral loads. *International Journal for Housing Science*.

Bilyap, S. (1981). Perde-çerçeve sistemlerinde burulmalı durum için yaklaşık bir çözüm yöntemi. *Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi Dergisi*. İzmir.

Bilyap, S., & Alku, Ö. Z. (1983). Kademeli perde ve kat yüksekliği farklı çerçeveli sistemler üzerine. *III. Ulusal Mekanik Kongresi Bildirileri* (ss. 166–175). Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Bilyap, S., & Alku, Ö. Z. (1984). *Betonarme karkas yapıların yatay deprem etkisi hesabı*. İzmir: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayınları.

Bilyap, S., Ertutar, Y., & Alku, Ö. Z. (1986). Perde-çerçeve sistemlerinde burulma etkileri için yaklaşık bir yöntem. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 328, 14–17.

Bilyap, S., Ertutar, Y., & Alku, Ö. Z. (1987a). Çerçevelerin yatay yükler çerçevesinde burulma katsayısı yöntemi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Haber Bülteni*, 11, 11–13.

Bilyap, S., Ertutar, Y., & Alku, Ö. Z. (1987b). *Perde-çerçeve sistemlerinde burulma etkileri*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları.

Bilyap, S., & Çelebi, Ü. (1991). Burulmalı perde-çerçeve sistemlerinin hesabında sürekli burulma çubuğu analojisi yöntemi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Konferansı Bildirileri*. İzmir.

Bozdoğan, K. B., Öztürk, D., & Nuhoglu, A. (2005). Çok katlı yapıların sürekli sistem hesap modeline göre dinamik analizi için pratik bir yöntem. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 23(4), 65–77.

Bozdoğan, K. B., & Ozturk, D. (2016). A method for dynamic analysis of frame-hinged shear wall structures. *Earthquakes and Structures*, 11(1), 45–61. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.1.045>

Çelebi, Ü., & Bilyap, S. (1991a). Burulmalı perde-çerçeve sistemlerinin hesabında sürekli burulma çubuğu analojisi yöntemi. *Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi Bildirileri*. İstanbul.

Çelebi, Ü., & Bilyap, S. (1991b). Burulmalı perde-çerçeve sistemlerinin hesabında eksenel şekil değiştirmelerin göz önüne alınması. *VII. Ulusal Mekanik Kongresi Bildirileri*. Antalya.

Çelebi, Ü., & Bilyap, S. (1992). Burulmalı perde-çerçeve sistemlerinin hesabında düşey taşıyıcı elemanların burulma şekil değiştirmelerinin göz önüne alınması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 5. Mühendislik Haftası Bildirileri*. Isparta.

Dündar, C., & Kiral, E. (1986). *Perdeli yapı sistemlerinin bilgisayar ile hesabı*. Adana: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi & TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

Ertutar, Y. (1987). Yatay yüklerin etkisi altında bulunan ve çerçeve kayma rijitliği yapı yüksekliğince nonlinear değişen yapılarda yatay yerdeğiştirmelerin hesabı. *Deprem Araştırma Bülteni*, 14(57), 83–92.

Ertutar, Y., & Arısoy, B. (1993a). Üç açıklıklı birleşik çerçevenin kayma rijitliğinin hesabı. *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongresi*, Cilt 1. Gazi Mağusa, KKTC.

Ertutar, Y., & Arısoy, B. (1993b). İki açıklıklı birleşik çerçeve sisteminin kayma rijitliğinin hesabı. *VIII. Ulusal Mekanik Kongresi*. Antalya.

Ertutar, Y., & Arısoy, B. (1994). Computation of the shear stiffness for the combined shear wall with multi-span systems. *Housing Science*, 18(2), 105–112.

Ertutar, Y. (1995). Simetrik olmayan boşluklu perdelerin kayma rijitliğinin hesabı. *Deprem Araştırma Bülteni*, 22(73), 40–45.

Halimi, A. R., & Bozdoğan, K. B. (2023). A simplified model proposal for non-linear analysis of buildings. *Earthquakes and Structures*, 24(5), 353–364.
<https://doi.org/10.12989/eas.2023.24.5.353>

Moscow State University of Civil Engineering. (2009). *Sigalov Emmanuily Yevseyevich: From the series "Our jubilees"*. Moscow: MGSÜ Press.

Murashev, V. I., Sigalov, E. E., & Baikov, V. N. (1976). *Design of reinforced concrete structures* (G. Leib, Trans.; H. C. Creighton, Trans. Ed.). Moscow: Mir Publishers.

Sigalov, E. E., & Murashev, V. A. (1978). *Design of structures for earthquake resistance*. Moscow: Mir Publishers.

Tekeli, H., Atimtay, E., & Turkmen, M. (2013). A simplified method for determining sway in reinforced concrete dual buildings and design applications. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(15), 1156–1172. <https://doi.org/10.1002/tal.761>

Tekeli, H., & Atimtay, E. (2015). A simplified non-linear procedure for buildings with shear walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 168(1), 56–66. <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00062>

Ülküdaş, M. E. (1997). Kayma davranışı gösteren perde duvarlı yapılar için bir diferansiyel denklem yöntemi yaklaşımı. *Sıracettin Bilyap hocamızın saygın anısına: Yeni Deprem Yönetmeliği ve Uygulama Sorunları Sempozyumu bildiriler kitabı* içinde. İzmir.

