GEÇİCİ KAPAK

Kapak tasarımı
devam ediyor.

BİDGE Yayınları

İnşaat Mühendisliğinde Akıllı Teknolojiler ve Gelecek Trendleri

Editör: Veli Batmaz

ISBN: -

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: -
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

İÇİNDEKİLER

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN İSTİNAT DUVARLARININ OPTİMUM TASARIMINDA KULLANILMASI 1

HİVREN NAİBOĞLU

GELENEKSEL AMPİRİK YAKLAŞIMLARDAN YAPAY ZEKAYA YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN (GMPE) GELİŞİMİ 32

MEHMET ALPYÜRÜR

BÖLÜM 0

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN İSTİNAT DUVARLARININ OPTİMUM TASARIMINDA KULLANILMASI

HİVREN NAİBOĞLU[1]

Giriş

Türkiye'nin büyük bölümünü kaplayan engebeli topoğrafya nedeniyle mühendislik yapıları inşa edilirken farklı zemin kotlarıyla karşılaşılması kaçınılmazdır. Farklı kotlar arasındaki stabiliteyi sağlamak ve zemini doğal şev açısından daha dik biçimde düşeyde tutabilmek amacıyla istinat (dayanma) yapıları uygulanmaktadır. Kot farkı bulunan zeminlerin oluşturduğu yatay itkiyi, tasarım aşamasında belirlenen bir emniyet payıyla taşıyacak biçimde boyutlandırılan istinat duvarları genellikle kâgir ya da betonarme olarak teşkil edilir (Türk Standartları Enstitüsü [TSE], 1990). Diyafram duvarlar, ağırlık, yarı ağırlık ve konsol duvarlar, donatılı zemin duvarları, gabyon duvarlar ve palplanş perdeler uygulamada kullanılan dayanma yapılarının başlıcalarıdır. Bu yapı ailesi içinde betonarme istinat duvarları, yapım sırasındaki teknik kolaylıklar ve

[1] Öğr. Gör. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Erciş Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Orcid: 0000-0003-4247-3482

malzeme teminindeki elverişlilik nedeniyle en sık tercih edilen çözümdür.

Dayanma yapısı türünün seçiminde duvar yüksekliği belirleyici bir ölçüt olarak öne çıkmaktadır. Kot farkının 3-4 m'yi geçmediği durumlarda ağırlık tipi duvarlar maliyet bakımından avantajlıdır; yaklaşık 7 m'ye varan yüksekliklerde konsol tipli betonarme çözümler öne çıkar, bu değerin aşıldığı projelerde ise payandalı sistemler gibi seçenekler daha ekonomik hâle gelir (Dağdeviren & Kaymak, 2018a). Uygulama alanı oldukça geniştir: eğimin fazla olduğu arazilerde araziden en iyi düzeyde faydalanmak, büyük dolgu ve yarma gerektiren yol güzergâhlarında kot farkını karşılamak, bina temellerinin güvenliğini sağlamak, erozyonu önlemek, köprü ayaklarını ve rıhtım yapılarını teşkil etmek ve malzeme depolama alanları oluşturmak bu yapıların tipik kullanım amaçları arasındadır (Öztürk & Öztürk, 2005).

Hesaplarda, toprak itkisinin etkisiyle duvar tabanında sınırlı bir dönmenin oluşabileceği kabul edilir. Bu elemanlar yatay itkiyi esas olarak öz ağırlıkları ve temel boyutları sayesinde dengeler; perde tipi dayanma yapılarına kıyasla daha rijit olduklarından şekil değiştirmeleri de oldukça sınırlı kalır. Yanal itkiler altında tabanda kayma, topuk etrafında devrilme, temel zemininde taşıma gücü aşımı ve arkasındaki zeminle birlikte toptan göçme (şev kayması) biçiminde yapısal ve geoteknik davranışlar sergileyebilirler. Bu nedenle istinat duvarlarının tasarımında farklı göçme mekanizmalarının bir arada ele alınması zorunludur; duvarın devrilmeye, tabanda ötelenmeye, zemin taşıma kapasitesinin aşılmasına ve genel stabilite kaybına karşı yeterli emniyete sahip olduğu ayrı ayrı doğrulanmalıdır. Bunlara betonarme kesitin moment ve kesme kapasitesine ilişkin yapısal tahkikler ile minimum donatı, donatı aralığı ve kenetlenme boyu gibi yönetmelik koşulları eklenir.

Betonarme istinat duvarlarının geleneksel tasarımı büyük ölçüde mühendisin deneyimine dayanır. Yapı geometrisi deneme-

yanılma esasına göre belirlenir; seçilen geçici tasarımın yönetmelikçe tanımlanan sınır durumlarını karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir ve sağlanmayan tahkikler için boyutlar büyütülerek işlem yinelenir. Bu yöntem güvenli tasarımlar üretir; ancak elde edilen çözümün maliyeti yine büyük ölçüde tasarımcının deneyimine bağlı kalır ve kısıtların sınır değerlerinden uzak, gereğinden konservatif kesitlerle sonuçlanma eğilimi taşır (Sheikholeslami et al., 2014). Dolayısıyla tasarım sınırlamaları altında malzemeden ve maliyetten tasarruf edebilmek için problemin bir optimizasyon problemi olarak ortaya konulması tasarımcı açısından belirgin bir avantaj sağlamaktadır.

Optimizasyon, tanımlı kısıtlar altında bir probleme ait aday çözümler içinden amaca en iyi hizmet edenin seçilmesi süreci olarak tanımlanabilir (Çelik et al., 2019). Optimizasyon problemlerinin çözümünde matematiksel programlama yöntemleri ile sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Çözüm uzayı geniş olan, süreksiz ve türevlenebilir olmayan, çok sayıda eşitsizlik kısıtı içeren problemlerde matematiksel algoritmalar tüm çözüm uzayını sistematik biçimde taramak durumunda kaldığından sonuca hesaplama açısından maliyetli bir şekilde ulaşır. Bu tür durumlarda çözüm uzayını olasılıksal biçimde tarayan ve kabul edilebilir sürede yeterince iyi çözümler üretebilen metasezgisel algoritmalardan yararlanmak daha elverişlidir. İstinat duvarlarında optimum tasarım için birden fazla göçme kriterinin, tasarım gereksiniminin ve geometrik sınırlamanın birlikte sağlanması gerektiğinden, ortaya çıkan problem tam olarak bu sınıfa girmektedir (Ghaemifard & Ghannadiasl, 2024).

Bu derlemede, betonarme istinat duvarlarının hem statik hem de deprem etkileri altında en uygun kesit boyutları ile donatı düzeninin metasezgisel yöntemlerle bulunmasını konu alan çalışmalar incelenmektedir. Çalışmanın amacı; söz konusu algoritmaların problem kurgusuna nasıl uyarlandığını, hangi amaç

fonksiyonları ve kısıt kümeleriyle çalıştıklarını, birbirlerine kıyasla ne tür başarımlar sergilediklerini ve hangi tasarım parametrelerinin sonuç üzerinde baskın olduğunu ortaya koymaktır. Bölümün ikinci kısmında istinat duvarı tasarımının optimizasyon problemi olarak kurulması ele alınmakta, üçüncü kısımda kullanılan metasezgisel yöntemler tanıtılmakta, dördüncü kısımda literatür tematik başlıklar altında incelenmekte, beşinci ve altıncı kısımlarda bulgular tartışılarak sonuçlandırılmakta, son kısımda ise alanın gelecek yönelimleri değerlendirilmektedir.

İstinat Duvarı Tasarımının Optimizasyon Problemi Olarak Kurulması

Tasarım Değişkenleri

Betonarme konsol istinat duvarının optimizasyonunda tasarım değişkenleri iki grupta toplanır. Birinci grup geometrik değişkenlerdir: perde (gövde) üst ve alt genişliği, temel plağı kalınlığı, temel genişliği, ön ampatman (topuk) ve arka ampatman (ökçe) uzunlukları ile varsa kayma kaması boyutları ve temel tabanının eğimi. İkinci grup donatı değişkenleridir: perde ve temel kesitlerindeki donatı çapı, donatı adedi veya aralığı ile kıvrım ve pilye düzenlemeleri. Erken dönem çalışmalarında yalnızca geometrik değişkenler dikkate alınırken, sonraki çalışmalarda değişken sayısı belirgin biçimde artmıştır; örneğin payandalı duvarların optimizasyonunda 17 tasarım değişkeni ve 46 kısıt içeren kurgular kullanılmıştır (Öztürk et al., 2020). Değişkenlerin sürekli mi yoksa ayrık (kesikli) mi tanımlandığı da önemli bir tercihtir; piyasada bulunan donatı çapları ve pratikte uygulanabilir boyut artışları göz önüne alındığında ayrık değişken tanımı uygulamaya daha yakın sonuçlar üretir (Uray & Çarbaş, 2021).

Amaç Fonksiyonu

Literatürde en yaygın amaç fonksiyonu, birim uzunluktaki duvarın toplam inşaat maliyetidir. Bu fonksiyon genellikle beton hacmi, donatı ağırlığı, kalıp alanı ve kazı–dolgu işlerinin birim fiyatlarıyla ağırlıklandırılmış toplamı biçiminde yazılır. İkinci bir yaklaşım, malzeme birim fiyatlarının zamana ve bölgeye göre değişkenliğinden bağımsız kalmak amacıyla duvarın toplam ağırlığını minimize etmektir (Kalemci et al., 2020). Üçüncü ve daha yeni bir yaklaşım ise amaç fonksiyonunu sürdürülebilirlik ölçütleriyle tanımlamaktır: CO2 salımı ve gömülü enerji, malzeme miktarlarının salım katsayılarıyla çarpılması yoluyla amaç fonksiyonuna dâhil edilmektedir (Kayabekir et al., 2020). Maliyet ile güvenlik sayısı, maliyet ile ağırlık veya maliyet ile CO2 salımının aynı anda ele alındığı çok amaçlı kurgularda ise sonuç tek bir noktaya indirgenmez; birbirine üstünlük kuramayan tasarımlardan oluşan Pareto-optimal bir küme ortaya çıkar (Kashani et al., 2022; Kaveh et al., 2013).

Kısıtlar ve Kısıt İşleme

Kısıt kümesi üç başlık altında toplanabilir. Geoteknik kısıtlar; devrilmeye karşı güvenlik sayısının, kaymaya karşı güvenlik sayısının ve taşıma gücü güvenlik sayısının yönetmelikçe öngörülen alt sınırların üzerinde kalmasını, taban basıncının zeminin emniyetli taşıma gücünü aşmamasını ve temel tabanında çekme gerilmesi oluşmamasını gerektirir. Yapısal kısıtlar; perde ve temel kesitlerinin moment ve kesme dayanımlarının etkiyen iç kuvvetleri karşılamasını, donatı oranlarının minimum ve maksimum sınırlar arasında kalmasını ve kenetlenme koşullarının sağlanmasını kapsar. Geometrik kısıtlar ise boyutların birbirleriyle tutarlı olmasını, imal edilebilir ve uygulanabilir kesitler üretilmesini güvence altına alır. Bu son grubun önemi son yıllarda özellikle vurgulanmıştır; geometrik uygunluk kısıtları tanımlanmadığında optimizasyonun fiziksel olarak anlamsız çözümler (ters konikleşen perde kesitleri,

geçersiz temel geometrileri) üretebildiği gösterilmiştir (Alsamia et al., 2026).

Taşıma gücünün hangi bağıntıyla hesaplandığı da sonucu etkileyen bir modelleme tercihidir. Meyerhof, Hansen ve Vesic yaklaşımlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada, çoğu durumda Meyerhof yöntemine dayalı nihai tasarımın daha düşük inşaat maliyetine karşılık geldiği, bu farkın duvar yüksekliği arttıkça azaldığı belirlenmiştir (Moayyeri et al., 2019).

Metasezgisel algoritmalar doğaları gereği kısıtsız optimizasyon için geliştirildiğinden, kısıtlar çoğunlukla ceza fonksiyonu yaklaşımıyla amaç fonksiyonuna eklenir. Bu yaklaşımda kısıtı ihlal eden bir çözümün uygunluk değeri, ihlal miktarıyla orantılı bir ceza terimiyle kötüleştirilir. Ceza katsayısının çok küçük seçilmesi uygun olmayan çözümlerin hayatta kalmasına, çok büyük seçilmesi ise arama uzayının kısıt sınırları çevresindeki verimli bölgelerinin taranamamasına yol açar. Nitekim kısıtları kabul edilebilir sınırlara daha çok yaklaştıran geliştirilmiş kısıt işleme şemalarının daha küçük boyut ve daha düşük maliyet ürettiği gösterilmiştir (Tayfur & Kamiloğlu, 2024).

Metasezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Sezgisel yöntemler, problem hakkındaki bilgiyi kullanarak makul sürede kabul edilebilir çözümler üreten fakat optimumu garanti etmeyen yaklaşımlardır. Metasezgisel yöntemler ise probleme özgü olmayan, üst düzey bir arama stratejisi tanımlayan ve bu stratejiyi farklı problem sınıflarına uyarlanabilir biçimde kuran algoritmalardır (Çelik et al., 2019). Bu algoritmaların başarımı, arama uzayının bütününü yoklayan keşif ile umut verici bölgelerde yoğunlaşan sömürü arasındaki dengeyi ne ölçüde iyi kurduklarına bağlıdır. Mühendislik tasarım süreçlerinin doğası gereği bir optimizasyon süreci olarak ifade edilebilmesi, bu algoritmaların yapısal ve geoteknik tasarımda hızla yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Metasezgisel algoritmalar çoğunlukla esinlendikleri doğal ya da toplumsal olayla aynı adı taşır. İstinat duvarı optimizasyonunda kullanılan başlıca algoritmalar ve esin kaynakları aşağıda özetlenmiştir.

- Genetik Algoritma (GA): Doğal seçilim ve genetik mutasyon süreçlerinden esinlenir; çaprazlama ve mutasyon operatörleriyle çözüm popülasyonunu evrimleştirir (Goldberg, 1989).
- Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO): Toplu hareket eden kuş ve balık gruplarının yiyecek ararken sergilediği ortak davranışı model alır; parçacıklar, bireysel olarak ulaştıkları en başarılı nokta ile grubun bulduğu en başarılı noktayı dikkate alarak hızlarını yeniler (Kennedy & Eberhart, 1995).
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO): Karıncaların besine ulaşmak için feromon izleriyle güzergâh belirlemesinden esinlenir (Dorigo et al., 1996).
- Tavlama Benzetimi (TB): Metallerin kontrollü soğutmayla tavlanması sürecinden esinlenir; sıcaklık parametresi düştükçe kötü çözümleri kabul etme olasılığı azalır (Kirkpatrick et al., 1983).
- Büyük Patlama–Büyük Çöküş (BP-BÇ): Evrenin genişleme ve büzülme döngüsünden esinlenir; dağılma ve ağırlık merkezine toplanma adımlarını dönüşümlü uygular (Erol & Eksin, 2006).
- Harmoni Arama (HA): Müzisyenlerin doğaçlama yoluyla uyumlu bir armoni arayışından esinlenir; hafıza dikkate alma, perde ayarlama ve rastgele seçim operatörlerini kullanır (Geem et al., 2001).

- Ateş Böceği Algoritması (ABA): Ateş böceklerinin ışık yoğunluğuna bağlı çekim davranışından esinlenir (Yang, 2009).
- Yarasa Algoritması (YA): Yarasaların ekolokasyonla yön ve uzaklık belirlemesinden esinlenir (Yang, 2010).
- Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO): Bir sınıftaki öğretmen-öğrenci etkileşiminden esinlenir; öğretmen ve öğrenci aşamaları olmak üzere iki fazda çalışır ve algoritmaya özgü parametre gerektirmez (Rao et al., 2011).
- Yapay Arı Kolonisi (YAK): İşçi, gözcü ve kâşif arıların nektar kaynaklarını keşfetme ve bu kaynaklara ilişkin bilgiyi kovan içinde aktarma biçimini taklit eder (Karaboga & Basturk, 2007).
- Diferansiyel Evrim (DE): Popülasyon bireyleri arasındaki farkları kullanarak yeni aday çözümler üreten evrimsel bir şemadır (Storn & Price, 1997).
- Jaya: Aday çözümleri her adımda popülasyonun en başarılı bireyine doğru çekip en başarısız bireyinden uzaklaştıran, ayar gerektiren özel bir parametresi bulunmayan bir yöntemdir (Rao, 2016).
- Gri Kurt Optimizasyonu (GKO): Gri kurtların sürü hiyerarşisi ve avlanma stratejisinden esinlenir (Mirjalili et al., 2014).
- Çiçek Tozlaşma Algoritması (ÇTA): Çiçekli bitkilerin biyotik ve abiyotik tozlaşma süreçlerinden esinlenir; Lévy uçuşlarıyla küresel arama yapar (Yang, 2012).

Bu algoritmalar arasında ÖÖTO, Jaya ve Rao ailesi gibi algoritmaya özgü parametre gerektirmeyen yöntemler, kullanıcının

parametre ayarlama yükünü ortadan kaldırdıkları için mühendislik uygulamalarında ayrıca ilgi görmektedir. Buna karşılık HA, ABA ve PSO gibi yöntemlerde perde ayarlama oranı, çekim katsayısı veya atalet ağırlığı gibi parametrelerin kalibrasyonu, elde edilen çözümün kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir (Mergos & Maintoglou, 2020).

Literatür İncelemesi

Evrimsel ve Sürü Zekâsı Tabanlı Yaklaşımlar

Kaveh et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Genetik Algoritma kullanılarak en iyi inşa edilebilirlik ile optimum istinat duvarı tasarımının birlikte gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon, fiyat ve kısıtların bir fonksiyonu olarak tanımlanmış; betonarme yapıların yalnızca maliyete dayalı optimizasyonunun küçük çaplı ve sık aralıklı donatı düzenlemeleri ürettiği, bunun da inşası zor ve kötü inşa edilen yapılarla sonuçlandığı vurgulanmıştır. Donatı sayısı, donatı sınırlamalarının bir göstergesi olarak amaç fonksiyonuna dâhil edilmiştir; daha az sayıda ve daha büyük çaplı donatının daha büyük aralıklarla yerleştirilmesi, daha az uygulama hatası, daha az karmaşık kalite kontrolü ve daha hızlı inşaat süreci anlamına geldiğinden inşa edilebilirliği iyileştirmektedir. Yazarlar, çok hedefli GA kullanıldığında uygulanabilirliği yüksek duvar tasarımlarına makul bir çözüm süresinde ulaşılabildiğini ve elde edilen Pareto cephesinin tatmin edici bir denge sunduğunu raporlamıştır.

Kayhan ve Demir (2016), konsol tipli betonarme dayanma duvarlarını PSO yardımıyla boyutlandırmış; yükleme olarak düşey yükler ile statik koşullardaki aktif ve pasif toprak basınçlarını esas almıştır. Depremin yol açabileceği dinamik etkiler kapsam dışında tutulmuştur. Çalışmada örnek olarak iki farklı zemin seçilmiş ve her iki zemin örneği için algoritmanın duyarlılığını sınamak üzere kontrol parametreleri birlikte değiştirilerek her zemin için elli koşu yapılmıştır. Bulgular, ele alınan yük durumu, zemin özellikleri ve

tasarım hedefi tanımlandığında konsol duvarlar için en uygun çözüme bu yöntemle ulaşılabildiğini ortaya koymuştur.

Dağdeviren ve Kaymak (2018b), taşıma kapasitesi yüksek zeminlere oturan betonarme dayanma duvarlarının en düşük maliyetle boyutlandırılmasını Yapay Arı Kolonisi algoritmasıyla araştırmıştır. Parametrik analizlerde geri dolgunun kayma direnci açısı, yüzeydeki ek yük, duvarın yüksekliği ve ön taraftaki pasif direnç değişken olarak ele alınmıştır. Geniş bir arama uzayında yürütülen analizler, bu tür zeminlerde toplam maliyeti en çok yükseklik değişkeninin yönlendirdiğini göstermiştir.

Nandha Kumar ve Suribabu (2017) tarafından yapılan çalışmada, Diferansiyel Evrim Algoritması kullanılarak eğimli bir dolguya maruz betonarme konsol istinat duvarının ağırlık azaltma optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Eğimli dolgu taşıyan duvar önce geleneksel yöntemle elle çözülmüş, ardından aynı problem Diferansiyel Evrim algoritmasıyla ele alınarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapısal optimizasyonla konsol istinat duvarında ağırlık azaltımının başarıyla sağlandığı; geleneksel çözüme kıyasla %15,525, PSO ile elde edilen çözüme kıyasla ise %8,622 malzeme tasarrufu elde edildiği belirlenmiştir.

Kalemci et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada, betonarme konsol istinat duvarının tasarımında Gri Kurt Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. ACI 318-05 koşulları ve Rankine toprak basıncı teorisi esas alınarak kurulan problemde amaç fonksiyonu, beton ve donatı miktarlarının dengelenmesi yoluyla duvarın toplam ağırlığının minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. Kısıt kümesi devrilme, eğilme ve taşıma gücüne karşı güvenlik sayıları ile kesitlerin moment ve kesme kapasitelerini içermektedir. Kayma kaması bulunan ve bulunmayan iki sayısal örnek üzerinde, 50 bireylik popülasyon ve 1000 iterasyonla 30 bağımsız koşu yapılarak algoritmanın geleneksel yinelemeli tasarım yaklaşımına

kıyasla düşük ağırlıklı ve uygulanabilir çözümler üretebildiği gösterilmiştir.

Mergos ve Maintoglou (2020), konsol tipli betonarme dayanma duvarlarının maliyetini en aza indirmek üzere Çiçek Tozlaşma Algoritmasını uygulamıştır. Algoritma parametrelerinin kalibrasyonuna ilişkin yapılan incelemede geçiş olasılığının 0,4–0,7 aralığında, popülasyon büyüklüğünün 20 birey ve Lévy uçuşu adım ölçek katsayısının 0,5 olarak seçilmesinin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Yöntemin geleneksel tasarım yaklaşımlarına göre önemli tasarruflar sağladığı ve aynı problem için Genetik Algoritma ile Parçacık Sürü Optimizasyonunu geride bıraktığı gösterilmiştir. Maliyet analizinde duvar yüksekliğinin maliyeti hızla artırdığı, sürşarj yükünün etkisinin ise daha kademeli olduğu ortaya konulmuştur.

Fiziksel ve Müziksel Esinli Yöntemler ile Melez Yaklaşımlar

Yepes et al. (2008), dayanma duvarlarının ekonomik boyutlandırılmasında Tavlama Benzetimi yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada taban sürtünme katsayısı, duvar dolgusu sürtünme açısı ve bordür sapmalarının sınırlandırılması gibi faktörlerin tasarımdaki önemine dikkat çekilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yöntemin konsol duvar problemine başarıyla uyarlanabildiğini ve sözü edilen üç faktörün tasarım üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Sheikholeslami et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada, stabilite kriterlerini karşılayan betonarme istinat duvarlarını optimum maliyetle elde edebilmek için Harmoni Arama ve Ateş Böceği algoritmalarının birlikte kullanıldığı melez bir optimizasyon yöntemi denenmiştir. Birkaç örnek üzerinde test edilen yöntemin geçerliliği doğrulanmış; yaklaşımın hesaplama açısından uygun olduğu ve güvenlik, stabilite ile malzeme sınırlamalarını sağlayan en düşük maliyetli tasarımları verebildiği gösterilmiştir. Aynı araştırma

grubunun sonraki çalışmasında bu melez şema geliştirilerek, gerçek zamanlı arama bilgisini saklayan bir hafıza yapısı, harmoni aramanın perde ayarlama operatörünün ateş böceği güncellemelerine katılması ve hesaplama yükünü azaltan bir üst sınır stratejisi eklenmiştir. Geliştirilen yaklaşımın, çözüm kalitesinden ödün vermeksizin gerekli yapısal analiz sayısını belirgin biçimde azalttığı belirlenmiştir (Sheikholeslami et al., 2016).

Payandalı dayanma duvarlarının yapım maliyetini düşürmeyi hedefleyen Molina-Moreno et al. (2017), harmoni aramayı eşik kabul yöntemiyle birleştiren melez bir algoritma geliştirmiştir. Toplam yüksekliği 4–16 m arasında değişen duvarlar üzerinde parametrik analiz yapılmıştır. Duvar-dolgu sürtünme açısının maliyet açısından en duyarlı tasarım değişkeni olduğu, dolgu malzemesi türünün optimum duvar maliyetini etkileyen asıl anahtar faktör olduğu ve payandalı duvarların optimizasyonunda kaymaya karşı güvenliğin devrilme kısıtından daha belirleyici olduğu ortaya konulmuştur. Çalışmada ayrıca optimizasyon sonuçlarına dayalı olarak temel plağı kalınlığının belirlenmesine ilişkin geliştirilmiş öneriler sunulmuştur.

Kaveh et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada, betonarme konsol istinat duvarlarının inşaat maliyetini minimize etmek üzere Plazma Üretimi Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. ACI 318-19 koşulları esas alınmış; statik durum için Rankine ve Coulomb, sismik durum için Mononobe-Okabe toprak basıncı teorileri uygulanmıştır. Kayma kamalı ve eğimli tabanlı duvarları içeren iki uygulama örneğinde yöntemin, Guguk Kuşu Arama ve ÖÖTO gibi yerleşik algoritmalara kıyasla verimli sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Parametresiz Algoritmalar: ÖÖTO ve Jaya

Temür ve Bekdaş (2018), sismik etkilere maruz konsol tipli betonarme dayanma duvarlarını en düşük maliyetle boyutlandırmak için Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon yöntemine

başvurmuştur. Farklı değişkenler üzerinde durularak en uygun yaklaşıma kolaylıkla ulaşılabildiği gösterilmiş; ayrıca yöntemin uygunluğunu ve başarımını belirlemek için literatürde sıkça kullanılan diğer yöntemlerle karşılaştırma yapılmış ve karşılaştırılan yöntemler arasında en tutarlı sonuçları ÖÖTO'nun ürettiği belirlenmiştir.

Öztürk (2018) tarafından yapılan çalışmada, konsol istinat duvarı tasarımı Jaya algoritmasıyla iki farklı kurguda optimize edilmiştir: yalnızca ağırlığın ya da yalnızca maliyetin en aza indirildiği tek hedefli kurgu ile bu iki ölçütün eşzamanlı gözetildiği çok hedefli kurgu. Optimizasyon sürecinin duvar boyutlarının ve donatı gereksinimlerinin ayrıntılı biçimde belirlenmesine imkân verdiği; geleneksel deneme-yanılma yönteminin aksine metasezgisel algoritmaların yönetmelik koşullarını sağlarken maliyet ve ağırlık verimliliğini sistematik biçimde elde edebildiği gösterilmiştir.

Öztürk et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada, payandalı betonarme istinat duvarlarının maliyet minimizasyonu ÖÖTO ve Jaya algoritmalarıyla ele alınmıştır. Duvar geometrisine ve donatı dağılımına ilişkin 17 tasarım değişkeni ile stabilite kontrollerini (zemin taşıma kapasitesi, devrilme, ötelenme), kesit dayanımı şartlarını ve boyut sınırlamalarını içeren 46 kısıt tanımlanmıştır. Çalışmanın ayırt edici yönü, sınırlı uygulanabilirliğe sahip geleneksel tasarım abaklarına dayanmak yerine SAP2000 yazılımının uygulama programlama arayüzünün MATLAB ile bütünleştirilerek optimizasyon süreci boyunca gerçekçi sonlu elemanlar analizinin yürütülmesidir. Wilcoxon testiyle yapılan istatistiksel başarım değerlendirmesinde, bu mühendislik uygulaması için ÖÖTO algoritmasının Jaya'dan daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Tayfur ve Kamiloğlu (2024) tarafından yapılan çalışmada, ÖÖTO algoritması ile bunun etmen tabanlı stratejilerle güçlendirilmiş geliştirilmiş sürümü betonarme istinat duvarlarına

uygulanmış ve literatürdeki genetik algoritma, evrim stratejileri ve parçacık sürü optimizasyonu sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş sürümün kısıt işleme başarımının daha yüksek olduğu, kısıtları kabul edilebilir sınırlara daha çok yaklaştırarak daha küçük tasarım boyutları ve daha düşük maliyet elde ettiği; böylece yapısal güvenliği korurken daha ekonomik tasarımlar ürettiği gösterilmiştir.

Dinamik Yükler ve Zemin Koşullarının Etkisi

Aydoğdu (2017) tarafından yapılan çalışmada, sismik yükleme altındaki betonarme konsol istinat duvarlarının maliyet optimizasyonu, Lévy uçuşlarıyla geliştirilmiş Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon algoritmasıyla ele alınmıştır. Lévy uçuşlarının algoritmanın küresel arama yeteneğini iyileştirdiği ve sismik etkilerin dâhil edilmesiyle büyüyen problemde yakınsama başarımını artırdığı gösterilmiştir.

Temür (2021) tarafından yapılan çalışmada, sismik etkiler altındaki konsol duvarların en uygun boyutlarını bulmak üzere ÖÖTO'nun melez bir sürümü geliştirilmiştir. Çalışma, sismik yüklemenin optimum geometriyi belirgin biçimde büyüttüğünü ve melez şemanın klasik ÖÖTO'ya kıyasla daha kararlı yakınsama sergilediğini ortaya koymuştur.

Uray ve Çarbaş (2021) tarafından yapılan çalışmada, Harmoni Arama algoritması kullanılarak konsol istinat duvarlarının en uygun tasarımı; beş zemin türü ile iki ayrı deprem senaryosu altında araştırılmıştır. Tasarım kısıtları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 esas alınarak kayma, devrilme ve taşıma gücü güvenlik sayıları üzerinden tanımlanmış; amaç fonksiyonu olarak duvar ağırlığı, tasarım değişkenleri ise ayrık olarak seçilmiştir. Deprem yükünün artmasıyla tasarım ölçütlerini karşılamak üzere duvar boyutlarının büyüdüğü; aynı deprem bölgesi içinde zemin kalitesi zayıfladıkça duvar boyutlarının ve dolayısıyla maliyetin çoğunlukla arttığı belirlenmiştir.

Khajehzadeh et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada, istinat duvarlarını da kapsayan geoteknik yapıların optimizasyonu için uyarlanabilir Salp Sürüsü algoritması önerilmiş ve yerleşik metasezgisel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi yakınsama davranışı sergilediği gösterilmiştir.

Çok Amaçlı ve Sürdürülebilirlik Odaklı Optimizasyon

Kayabekir et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada, betonarme istinat duvarlarının maliyeti ile CO2 salımı, stabilite koşulları korunarak harmoni arama optimizasyonuyla birlikte minimize edilmiştir. Perde yüksekliği ve temel genişliği gibi tasarım değişkenleri; kazı derinliği, sürşarj yükü ve malzeme maliyetlerini içeren farklı senaryolar altında incelenmiştir. Çalışma, maliyet ve gaz salımının eşzamanlı minimizasyonuyla istinat duvarları için çevre dostu bir tasarımın sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

Kashani et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada, betonarme konsol istinat duvarı tasarımı için dört çok amaçlı evrimsel algoritma karşılaştırılmıştır. İki optimizasyon stratejisi sınanmıştır: minimum maliyet ile maksimum güvenlik sayısı, ve minimum ağırlık ile maksimum güvenlik sayısı. Başarım karşılaştırması kapsama kümesi, çeşitlilik ve hiperhacim ölçütleriyle Friedman istatistiksel testi eşliğinde yapılmıştır. NSGA-II'nin her iki tasarım yaklaşımında da kapsama kümesi ölçütünde üstün olduğu, SPEA2'nin çeşitlilik ölçütünde öne çıktığı belirlenmiştir. Duyarlılık analizinde, sürtünme açısındaki değişimlerin güvenlik sayılarında en büyük kaymayı ürettiği; dolgu eğimindeki değişimlerin ise tasarım maliyetini en fazla etkilediği bulunmuştur.

Alsamia et al. (2026) tarafından yapılan çalışmada, nehir kıyısı beton ağırlık istinat duvarlarının tasarımı için stabilite, kullanılabilirlik ve geometrik uygunluk kısıtlarını birlikte içeren bir optimizasyon çerçevesi geliştirilmiştir. Aynı hesaplama koşulları altında 30 bağımsız koşuyla beş metasezgisel algoritma

değerlendirilmiştir. Geometrik kısıtların tanımlanmasının fiziksel olarak anlamsız tasarımların önlenmesi ve inşa edilebilirliğin güvence altına alınması bakımından zorunlu olduğu; Çiçek Döllenmesi Optimizasyonunun konservatif çözümlere kıyasla yaklaşık %19 malzeme azaltımıyla en düşük duvar ağırlığını verdiği; uyarlanabilir keşifli Yapay Arı Kolonisi yönteminin ise düşük istatistiksel dağılımla en gürbüz ve yinelenebilir yakınsama davranışını sergilediği belirlenmiştir. Çalışma, malzeme verimliliği ile yapısal gürbüzlük arasında algoritmalar arasında bir ödünleşim bulunduğunu göstermektedir.

Karşılaştırmalı Değerlendirme

İncelenen çalışmalar Tablo 1'de algoritma, amaç fonksiyonu ve öne çıkan bulgular bakımından özetlenmiştir.

Tablo 1. İstinat Duvarı Optimizasyonuna İlişkin Seçilmiş Çalışmaların Karşılaştırmalı Özeti

Çalışma	**Algoritma (amaç fonksiyonu)**	**Öne çıkan bulgu**
Yepes et al. (2008)	Tavlama Benzetimi (maliyet)	Taban sürtünme katsayısı, dolgu sürtünme açısı ve bordür sapması tasarımda belirleyicidir.
Kaveh et al. (2013)	Çok amaçlı GA (maliyet + inşa edilebilirlik)	Yalnızca maliyet odaklı optimizasyon inşası güç kesitler üretir; Pareto çözümü dengeyi kurar.
Sheikholeslami et al. (2014)	Melez HA + ABA (maliyet)	Melez şema, stabilite ve malzeme kısıtlarını sağlayan en düşük maliyetli tasarımı verir.
Kayhan & Demir (2016)	PSO (maliyet)	Zemin özellikleri ve tasarım amacına bağlı olarak optimum tasarım elde edilebilir.
Sheikholeslami et al. (2016)	Melez ABA-HA + üst sınır stratejisi (maliyet)	Gerekli yapısal analiz sayısı, çözüm kalitesi korunarak belirgin biçimde azalır.
Molina-Moreno et al. (2017)	Melez HA + eşik kabul (maliyet)	Dolgu malzemesi türü maliyeti belirleyen asıl faktördür; kayma kısıtı devrilmeden daha etkilidir.
Aydoğdu (2017)	BBO + Lévy uçuşu (sismik maliyet)	Lévy uçuşları küresel arama başarımını ve yakınsamayı iyileştirir.
Nandha Kumar & Suribabu (2017)	Diferansiyel Evrim (ağırlık)	Geleneksel çözüme göre %15,5; PSO çözümüne göre %8,6 malzeme tasarrufu.
Dağdeviren & Kaymak (2018b)	Yapay Arı Kolonisi (maliyet)	Sağlam zeminde maliyeti etkileyen asıl parametre duvar yüksekliğidir.

Çalışma	Algoritma (amaç fonksiyonu)	Öne çıkan bulgu
Temür & Bekdaş (2018)	ÖÖTO (deprem etkisinde maliyet)	ÖÖTO, karşılaştırılan algoritmalara göre daha güvenilir sonuçlar verir.
Öztürk (2018)	Jaya (ağırlık ve/veya maliyet)	Tek ve çok amaçlı kurgu, boyut ve donatının ayrıntılı belirlenmesine imkân verir.
Moayyeri et al. (2019)	PSO (maliyet)	Meyerhof yöntemine dayalı tasarım çoğunlukla daha düşük maliyet verir; fark yükseklikle azalır.
Mergos & Maintoglou (2020)	Çiçek Tozlaşma (maliyet)	ÇTA, GA ve PSO'yu geride bırakır; maliyet duvar yüksekliğiyle hızla artar.
Kalemci et al. (2020)	Gri Kurt Optimizasyonu (ağırlık)	Kayma kamalı ve kamasız duvarlarda düşük ağırlıklı, uygulanabilir çözümler üretir.
Öztürk et al. (2020)	ÖÖTO ve Jaya, SAP2000 bağlantılı (maliyet)	17 değişken ve 46 kısıt içeren payandalı duvar probleminde ÖÖTO, Jaya'dan üstündür.
Kayabekir et al. (2020)	Harmoni Arama (maliyet + CO2 salımı)	Maliyet ve salımın eşzamanlı minimizasyonuyla çevre dostu tasarım olanaklıdır.
Temür (2021)	Melez ÖÖTO (sismik maliyet)	Sismik yükleme optimum geometriyi büyütür; melez şema daha kararlı yakınsar.
Uray & Çarbaş (2021)	Harmoni Arama (ağırlık)	Deprem yükü arttıkça ve zemin kalitesi zayıfladıkça boyutlar ve maliyet artar.
Kaveh et al. (2022)	Plazma Üretimi Optimizasyonu (statik ve sismik maliyet)	Guguk Kuşu Arama ve ÖÖTO'ya kıyasla verimli sonuçlar verir.
Kashani et al. (2022)	NSGA-II, MOPSO, SPEA2, MVO (maliyet/ağırlık + güvenlik)	NSGA-II kapsama, SPEA2 çeşitlilik ölçütünde öne çıkar; sürtünme açısı en duyarlı değişkendir.
Khajehzadeh et al. (2022)	Uyarlanabilir Salp Sürüsü (maliyet)	Yerleşik metasezgisel yöntemlere kıyasla daha iyi yakınsama davranışı gösterir.
Tayfur & Kamiloğlu (2024)	ÖÖTO ve geliştirilmiş ÖÖTO (maliyet)	Geliştirilmiş kısıt işleme daha küçük boyut ve daha düşük maliyet sağlar.
Alsamia et al. (2026)	PSO, DDAO, ÇDO, GKO, AEABC (ağırlık)	Geometrik kısıtlar zorunludur; ÇDO %19 malzeme azaltımı, AEABC en gürbüz yakınsama.

Kaynak: Bölümde incelenen çalışmalardan yazar tarafından derlenmiştir.

Tartışma

İncelenen literatür, istinat duvarı tasarımının metasezgisel optimizasyon için elverişli bir problem sınıfı oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte bulguların bir arada değerlendirilmesi, alanın kendine özgü birkaç yapısal sorununu da görünür kılmaktadır.

Birinci konu, amaç fonksiyonu seçiminin sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisidir. Maliyet, ağırlık ve CO2 salımı birbirine yakın fakat özdeş olmayan optimumlar üretir. Maliyet tabanlı kurgular beton ve donatı birim fiyatlarının oranına duyarlıdır; bu oran ülkeye, bölgeye ve döneme göre değiştiğinden farklı çalışmaların maliyet sonuçları doğrudan karşılaştırılamaz. Ağırlık tabanlı kurgular bu duyarlılıktan kaçınır, ancak donatı ve betonun maliyet farkını göz ardı ettiğinden ekonomik en iyiye tam olarak karşılık gelmez (Kalemci et al., 2020; Öztürk, 2018). Sürdürülebilirlik ölçütlerinin amaç fonksiyonuna katıldığı çalışmalar ise maliyet-salım ödünleşiminin çoğu durumda dar bir bantta kaldığını, dolayısıyla ekonomik tasarımdan büyük ölçüde uzaklaşmadan çevresel iyileştirme sağlanabileceğini ortaya koymaktadır (Kayabekir et al., 2020).

İkinci konu, algoritma başarımlarının karşılaştırılabilirliğidir. Literatürde çok sayıda algoritmanın diğerlerinden üstün olduğu bildirilmektedir; ancak bu iddialar farklı sayısal örnekler, farklı kısıt kümeleri, farklı ceza fonksiyonları ve farklı popülasyon-iterasyon bütçeleri altında üretilmiştir. Bir algoritmanın üstünlüğünün istatistiksel olarak sınandığı çalışmalar görece azdır; Wilcoxon ve Friedman gibi testlerin kullanıldığı örnekler bu açığı kapatma yönünde olumlu bir eğilimi göstermektedir (Kashani et al., 2022; Öztürk et al., 2020). Aynı problemin aynı bütçeyle çözüldüğü denetimli karşılaştırmalar, algoritmalar arasındaki farkın çoğu zaman çözümün kalitesinden çok yakınsama hızı ve tekrarlanabilirlikte ortaya çıktığını göstermektedir (Alsamia et al., 2026).

Üçüncü konu, problem kurgusunun ayrıntı düzeyidir. Yalnızca geometrik değişkenlerle kurulan erken dönem modelleri, donatı düzenlemesini optimizasyon dışında bıraktığından pratikte doğrudan uygulanabilir bir proje üretmez. Değişken sayısının artırılması ve donatı ayrıntılarının modele katılması, çözüm uzayını

büyütmekle birlikte uygulamaya çok daha yakın sonuçlar vermektedir (Öztürk et al., 2020). Benzer biçimde, sonlu elemanlar analizinin optimizasyon döngüsüne bağlanması, tasarım abaklarının sınırlı geçerlilik alanından kurtulmayı sağlamakta, ancak hesaplama maliyetini belirgin biçimde artırmaktadır. Üst sınır stratejileri gibi hesaplama azaltıcı tekniklerin bu noktada işlevsel olduğu görülmektedir (Sheikholeslami et al., 2016).

Dördüncü konu, baskın tasarım parametrelerinin tutarlı biçimde öne çıkmasıdır. Birbirinden bağımsız çalışmalar duvar yüksekliğinin maliyet üzerinde en etkili değişken olduğunda birleşmektedir (Dağdeviren & Kaymak, 2018b; Mergos & Maintoglou, 2020). Bunu dolgunun içsel sürtünme açısı ve dolgu malzemesi türü izlemektedir (Kashani et al., 2022; ayrıca bkz. Molina-Moreno et al., 2017). Sürşarj yükünün etkisi duvar yüksekliğine kıyasla daha yumuşak bir eğilim göstermektedir (Mergos & Maintoglou, 2020). Sismik etkilerin hesaba katılması optimum geometriyi belirgin biçimde büyütmekte; aynı deprem bölgesinde zemin kalitesinin zayıflaması da maliyeti artırmaktadır (Temür, 2021; Uray & Çarbaş, 2021). Bu tutarlılık, optimizasyon sonuçlarının yalnızca sayısal bir çıktı olarak değil, ön boyutlandırma aşamasında kullanılabilecek mühendislik bilgisi olarak da değer taşıdığını göstermektedir.

Beşinci konu, inşa edilebilirlik ve uygulanabilirliktir. Salt maliyet odaklı optimizasyonun küçük çaplı ve sık aralıklı donatı düzenlemeleri üretme eğilimi, şantiyede uygulama hatası riskini ve kalite kontrol yükünü artırmaktadır (Kaveh et al., 2013). Benzer biçimde, geometrik uygunluk kısıtları tanımlanmadığında algoritmaların fiziksel olarak anlamsız kesitler üretebildiği gösterilmiştir (Alsamia et al., 2026). Bu nedenle inşa edilebilirliğin ya amaç fonksiyonuna bir bileşen olarak ya da kısıt kümesine açık koşullar biçiminde katılması gerekmektedir. Tasarım değişkenlerinin piyasada bulunan donatı çapları ve uygulanabilir boyut artışları

uyarınca ayrık tanımlanması da aynı amaca hizmet etmektedir (Uray & Çarbaş, 2021).

Son olarak, incelenen çalışmaların önemli bir bölümü belirli sayıda sayısal örnek üzerinden sonuç üretmektedir. Bu durum, elde edilen çıkarımların genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca çoğu çalışmada zemin parametreleri deterministik kabul edilmekte; zemin özelliklerindeki doğal değişkenlik ve model belirsizliği optimizasyona dâhil edilmemektedir. Güvenilirlik tabanlı tasarım yaklaşımlarının bu boşluğu doldurma potansiyeli taşıdığı düşünülmektedir.

Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında, betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımında metasezgisel algoritmaların kullanımına ilişkin literatür incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- İstinat duvarı tasarımı; çok sayıda geoteknik, yapısal ve geometrik kısıtın eşzamanlı olarak sağlanmasını gerektiren, süreksiz ve geniş çözüm uzaylı kısıtlı bir optimizasyon problemidir. Bu yapısı nedeniyle metasezgisel algoritmalar için elverişli bir uygulama alanı oluşturmaktadır.
- Metasezgisel yaklaşımlar, deneme-yanılmaya dayalı geleneksel tasarıma kıyasla malzeme ve maliyet bakımından kayda değer tasarruf sağlamaktadır. İncelenen örneklerde geleneksel çözüme göre %15 mertebesinde, konservatif çözümlere göre ise %19'a varan azaltımlar bildirilmiştir (Alsamia et al., 2026; Nandha Kumar & Suribabu, 2017).
- Duvar yüksekliği, optimum maliyeti belirleyen en baskın parametredir. Bunu dolgunun içsel sürtünme açısı ile

dolgu malzemesi türü izlemekte, sürşarj yükünün etkisi ise daha yumuşak bir eğilim göstermektedir.

- Sismik yüklemenin hesaba katılması optimum geometriyi büyütmekte ve problemi zorlaştırmaktadır. Aynı deprem bölgesi içinde zemin kalitesinin zayıflaması da duvar boyutlarını ve maliyeti artırmaktadır.
- Algoritmaya özgü parametre gerektirmeyen ÖÖTO ve Jaya gibi yöntemler, parametre kalibrasyonu yükünü ortadan kaldırdıkları için mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır. İstatistiksel testlerle desteklenen karşılaştırmalarda ÖÖTO'nun Jaya'ya göre daha başarılı olduğu bildirilmiştir (Öztürk et al., 2020).
- Melez algoritmalar, tek bir algoritmanın keşif ya da sömürü yönündeki eksikliğini telafi ederek çözüm kalitesini ve yakınsama kararlılığını iyileştirmektedir. Üst sınır stratejisi gibi hesaplama azaltıcı teknikler, gerekli yapısal analiz sayısını çözüm kalitesinden ödün vermeksizin düşürmektedir.
- Amaç fonksiyonunun yalnızca maliyet olarak tanımlanması, inşası güç kesitlerle sonuçlanabilmektedir. İnşa edilebilirliğin ve geometrik uygunluğun kısıt kümesine veya amaç fonksiyonuna açıkça katılması, optimizasyon çıktısının uygulanabilirliği açısından zorunludur.
- Son yıllarda amaç fonksiyonu maliyetten CO2 salımı ve gömülü enerji gibi sürdürülebilirlik ölçütlerine doğru genişlemiş; tek amaçlı kurgunun yerini çok amaçlı Pareto yaklaşımları almaya başlamıştır. Bu çalışmalar, ekonomik tasarımdan büyük ölçüde uzaklaşmadan çevresel iyileştirme sağlanabileceğini göstermektedir.

- Algoritma başarımlarının karşılaştırılmasında yöntem birliğinin bulunmayışı, literatürün en belirgin sınırlılığıdır. Ortak kıyas problemleri, eşit hesaplama bütçeleri ve istatistiksel anlamlılık testleri kullanılmadığında üstünlük iddiaları sınanabilir nitelik taşımamaktadır.

Değerlendirme ve Gelecek Perspektifi

Metasezgisel algoritmaların istinat duvarı tasarımına uygulanması, yaklaşık yirmi yıllık bir birikimle artık olgunlaşmış bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu birikimin pratiğe aktarılması bakımından en kritik eşik, üretilen çözümlerin proje ofisi gerçekliğiyle buluşmasıdır. Optimizasyon çıktısının doğrudan uygulanabilir bir betonarme projeye dönüşebilmesi için donatı ayrıntılarının, uygulanabilir boyut kademelerinin ve yönetmelik koşullarının modele eksiksiz biçimde katılması gerekmektedir. Bu yönde gelişen sonlu elemanlar destekli optimizasyon kurguları umut vericidir; bunların yaygınlaşması için hesaplama maliyetini düşüren vekil modeller ve üst sınır stratejileri gibi tekniklerin geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Alanın ikinci gelişim ekseni, belirsizliğin tasarıma dâhil edilmesidir. Mevcut çalışmaların büyük bölümünde zemin parametreleri tek bir deterministik değerle temsil edilmektedir. Oysa zemin özellikleri doğası gereği değişkendir ve bu değişkenlik güvenlik sayılarına doğrudan yansımaktadır. Güvenilirlik tabanlı optimizasyon ve gürbüz tasarım yaklaşımlarının metasezgisel algoritmalarla birleştirilmesi, belirsizlik altında da yeterli güvenliği koruyan ekonomik tasarımların elde edilmesini sağlayabilir. Bu doğrultuda, güvenlik sayılarına en duyarlı değişkenin sürtünme açısı olduğuna ilişkin bulgu, olasılıksal modellemede hangi parametrelere odaklanılması gerektiğine dair açık bir yön göstermektedir (Kashani et al., 2022).

Üçüncü eksen, yapay öğrenme yöntemlerinin optimizasyon süreciyle bütünleştirilmesidir. Optimizasyon koşularından elde edilen geniş veri kümeleri kullanılarak, optimum tasarım değişkenlerini doğrudan tahmin eden vekil modeller kurulabilmektedir. Böyle bir model, ön boyutlandırma aşamasında saniyeler içinde iyi bir başlangıç çözümü üretebilir ve bu çözüm metasezgisel algoritmaya tohum olarak verilerek yakınsama hızlandırılabilir. Benzer biçimde, algoritma parametrelerinin arama sırasında çevrim içi olarak ayarlandığı uyarlanabilir ve pekiştirmeli öğrenme destekli şemalar, parametre kalibrasyonu sorununu yapısal olarak çözme potansiyeli taşımaktadır (Khajehzadeh et al., 2022).

Dördüncü eksen, sürdürülebilirliğin tasarım ölçütü olarak kurumsallaşmasıdır. CO2 salımı ve gömülü enerjinin amaç fonksiyonuna katıldığı çalışmalar, düşük karbonlu kavramsal tasarımların maliyet açısından da rekabetçi olabileceğini göstermektedir. Bu yönelimin, çimento içeriği azaltılmış betonlar, geri dönüştürülmüş agregalar ve alternatif donatı malzemeleri gibi seçeneklerin optimizasyon değişkenleri arasına katılmasıyla derinleşmesi beklenmektedir. Yaşam döngüsü maliyeti ve yaşam döngüsü değerlendirmesinin, yalnızca ilk inşaat maliyeti yerine amaç fonksiyonunun temeli hâline gelmesi, alanın orta vadeli hedeflerinden biri olarak görünmektedir.

Beşinci eksen, literatürün kendi içindeki karşılaştırılabilirlik sorununun çözülmesidir. Alanın ortak kıyas problemleri, açık erişimli veri ve kod paylaşımı, eşit hesaplama bütçeleri ve standart istatistiksel raporlama ölçütleri üzerinde uzlaşması, yeni bir algoritmanın gerçekten katkı sağlayıp sağlamadığının nesnel biçimde değerlendirilmesini mümkün kılacaktır. Aksi hâlde, birbirinden bağımsız çok sayıda en iyi iddiasının biriktiği fakat bunların birbirine göre konumunun belirsiz kaldığı bir literatür oluşması riski sürmektedir.

Sonuç olarak, metasezgisel algoritmaların istinat duvarı tasarımında kullanımı; malzeme ve maliyet tasarrufu, tasarım süresinin kısalması ve tasarımcı deneyimine bağımlılığın azalması bakımından somut yararlar sağlamaktadır. Optimizasyon temelli tasarım anlayışının olgunlaşması ve yapı mühendisliği pratiğinde daha geniş ölçekte benimsenmesi, malzeme ve enerji kaynaklarının tasarruflu kullanımına imkân tanıyarak ekonomik ve çevresel kazanımlar sağlayacak; ayrıca ileride önerilecek yeni yöntemlere de sağlam bir zemin oluşturacaktır.

Kaynakça/References

Alsamia, S., Koch, E., & Mayassah, M. (2026). Constraint-aware and economic optimization of riverbank retaining walls using metaheuristic algorithms. *Water, 18*(3), 434. https://doi.org/10.3390/w18030434

Aydoğdu, İ. (2017). Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights. *Engineering Optimization, 49*(3), 381–400. https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1191837

Çelik, Y., Yıldız, İ., & Karadeniz, A. T. (2019). Son üç yılda geliştirilen metasezgisel algoritmalar hakkında kısa bir inceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 463–477.

Dağdeviren, U., & Kaymak, B. (2018a). Simetrik ağırlık istinat duvarlarının optimum tasarımı. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (40), 45–57.

Dağdeviren, U., & Kaymak, B. (2018b). Yapay arı koloni algoritması kullanılarak betonarme istinat duvarlarının optimum maliyet tasarımını etkileyen parametrelerin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33*(1), 239–253.

Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 26*(1), 29–41. https://doi.org/10.1109/3477.484436

Erol, O. K., & Eksin, I. (2006). A new optimization method: Big Bang–Big Crunch. *Advances in Engineering Software, 37*(2), 106–111. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.04.005

Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *Simulation, 76*(2), 60–68. https://doi.org/10.1177/003754970107600201

Ghaemifard, S., & Ghannadiasl, A. (2024). Usages of metaheuristic algorithms in investigating civil infrastructure optimization models: A review. *AI in Civil Engineering, 3*, 17. https://doi.org/10.1007/s43503-024-00036-4

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.

Kalemci, E. N., İkizler, S. B., Dede, T., & Angın, Z. (2020). Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. *Structures, 23*, 245–253. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.09.013

Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization, 39*(3), 459–471. https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x

Kashani, A. R., Gandomi, A. H., Azizi, K., & Camp, C. V. (2022). Multi-objective optimization of reinforced concrete cantilever retaining wall: A comparative study. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 65*(9), 262. https://doi.org/10.1007/s00158-022-03318-6

Kaveh, A., Akbari, H., & Hosseini, S. M. (2022). Plasma generation optimization for optimal design of reinforced concrete cantilever retaining wall structures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46*(2), 1177–1200. https://doi.org/10.1007/s40996-020-00566-8

Kaveh, A., Kalateh-Ahani, M., & Fahimi-Farzam, M. (2013). Constructability optimal design of reinforced concrete retaining walls using a multi-objective genetic algorithm. *Structural Engineering and Mechanics, 47*(2), 227–245.

Kayabekir, A. E., Akbay Arama, Z., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Geem, Z. W. (2020). Eco-friendly design of reinforced concrete retaining walls: Multi-objective optimization with harmony search applications. *Sustainability, 12*(15), 6087. https://doi.org/10.3390/su12156087

Kayhan, A. H., & Demir, A. (2016). Betonarme konsol istinat duvarlarının parçacık sürü optimizasyonu ile optimum tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22*(3), 129–135. https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/article/261049

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Avustralya, 1942–1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968

Khajehzadeh, M., Iraji, A., Majdi, A., Keawsawasvong, S., & Nehdi, M. L. (2022). Adaptive salp swarm algorithm for optimization of geotechnical structures. *Applied Sciences, 12*(13), 6749. https://doi.org/10.3390/app12136749

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Jr., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science, 220*(4598), 671–680. https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671

Mergos, P. E., & Maintoglou, F. (2020). Optimum design of reinforced concrete retaining walls with the flower pollination algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 61*(2), 575–585. https://doi.org/10.1007/s00158-019-02380-x

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software, 69*, 46–61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007

Moayyeri, N., Gharehbaghi, S., & Plevris, V. (2019). Cost-based optimum design of reinforced concrete retaining walls considering different methods of bearing capacity computation. *Mathematics, 7*(12), 1232. https://doi.org/10.3390/math7121232

Molina-Moreno, F., García-Segura, T., Martí, J. V., & Yepes, V. (2017). Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms. *Engineering Structures, 134*, 205–216. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.042

Nandha Kumar, V., & Suribabu, C. R. (2017). Optimal design of cantilever retaining wall using differential evolution algorithm. *International Journal of Optimization in Civil Engineering, 7*(3), 433–449.

Öztürk, H. T. (2018). Betonarme konsol istinat duvarlarının minimum maliyet ve ağırlıkla optimum tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6*(4), 1258–1268. https://doi.org/10.29130/dubited.435059

Öztürk, H. T., Dede, T., & Türker, E. (2020). Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. *Structures, 25*, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020

Öztürk, T., & Öztürk, Z. (2005). Deprem bölgelerinde yapılacak prefabrike betonarme istinat duvarlarının tasarımı. *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye.

Rao, R. V. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization

problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations, 7*(1), 19–34. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.8.004

Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design, 43*(3), 303–315. https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015

Sheikholeslami, R., Gholipour Khalili, B., Sadollah, A., & Kim, J. H. (2016). Optimization of reinforced concrete retaining walls via hybrid firefly algorithm with upper bound strategy. *KSCE Journal of Civil Engineering, 20*(6), 2428–2438. https://doi.org/10.1007/s12205-015-1163-9

Sheikholeslami, R., Gholipour Khalili, B., & Zahrai, S. M. (2014). Optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using hybrid firefly algorithm. *International Journal of Engineering and Technology, 6*(6), 465–470.

Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization, 11*(4), 341–359. https://doi.org/10.1023/A:1008202821328

Tayfur, B., & Kamiloğlu, H. A. (2024). Optimization of cantilever retaining wall design using improved teaching-learning-based optimization algorithms. *Fırat University Journal of Experimental and Computational Engineering, 3*(2), 134–150. https://doi.org/10.62520/fujece.1430236

Temür, R. (2021). Optimum design of cantilever retaining walls under seismic loads using a hybrid TLBO algorithm. *Geomechanics and Engineering, 24*(3), 237–251.

Temür, R., & Bekdaş, G. (2018). Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24*(6), 1043–1050. https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/article/498366

Türk Standartları Enstitüsü. (1990). *TS 7994 Zemin dayanma yapıları: Sınıflandırma, özellikleri ve projelendirme esasları*. Türk Standartları Enstitüsü.

Uray, E., & Çarbaş, S. (2021). Dynamic loads and different soil characteristics examination on optimum design of cantilever retaining walls utilizing harmony search algorithm. *International Journal of Engineering and Applied Sciences, 13*(4), 140–154. https://doi.org/10.24107/ijeas.1033802

Yang, X.-S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. In O. Watanabe & T. Zeugmann (Eds.), *Stochastic algorithms: Foundations and applications (SAGA 2009)* (pp. 169–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14

Yang, X.-S. (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In J. R. González, D. A. Pelta, C. Cruz, G. Terrazas, & N. Krasnogor (Eds.), *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)* (pp. 65–74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6

Yang, X.-S. (2012). Flower pollination algorithm for global optimization. In J. Durand-Lose & N. Jonoska (Eds.), *Unconventional computation and natural computation* (pp. 240–249). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27

Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., & González-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth-retaining walls by

simulated annealing. *Engineering Structures, 30*(3), 821–830. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.023

BÖLÜM 1

GELENEKSEL AMPİRİK YAKLAŞIMLARDAN YAPAY ZEKAYA YER HAREKETİ TAHMİN MODELLERİNİN (GMPE) GELİŞİMİ

MEHMET ALPYÜRÜR[1]

GMPE Kavramı ve Deprem Mühendisliğindeki Rolü

Deprem mühendisliğinde Yer Hareketi Modelleri (Ground Motion Models - GMM) olarak da anılan yer hareketi tahmin denklemleri (GMPE), kaynak, yayılım yolu ve yerel zemin özelliklerine bağlı olarak bir sahada beklenen kuvvetli yer hareketi düzeyini (PGA, PGV, PGD, %5 sönümlü elastik spektral ivme $S_a(T)$, Arias İntansitesi I_a vb.) matematiksel olarak tahmin eden bağıntılardır. GMPE'ler, Olasılıksal ve Tanımlamalı (Deterministik) Sismik Tehlike Analizlerinin (PSHA ve DSHA) temel girdisini oluşturmakta; bina yönetmeliklerindeki tasarım spektrumlarının belirlenmesinde ve kentsel risk azaltma stratejilerinde hayati rol oynamaktadır. Bir GMPE, temel olarak yer hareketi şiddet ölçütünü (Intensity Measure-IM; örneğin PGA, PGV, $S_a(T)$ vb.) depremin ana fiziksel parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade eder. Genel log-normal formülasyonu şu şekildedir:

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-6878-5874

$$\ln(IM) = f_{source}(M) + f_{path}(R, M) + f_{site}(V_{S30}, Z) + f_{fault}(F) + \varepsilon \quad (1)$$

Bu yapıyı oluşturan temel bileşenler şunlardır:

- *Kaynak Etkisi* **(f_{source}):** Depremin büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak açığa çıkan toplam enerjiyi ve spektral genliği belirler. Büyük depremlerde genliğin doyuma ulaşması (magnitude saturation) gibi doğrusal olmayan davranışlar bu terimde modellenir.
- *Yol Etkisi* **(f_{path}):** Dalgaların odak noktasından sahayla buluştuğu noktaya kadar katettiği mesafe (R_{jb}, R_{rup}, R_{hyp}) boyunca geometrik yayılma (geometrical spreading) ve anelastik sönümlenme (anelastic attenuation / Q faktörü) nedeniyle enerji kaybetmesini açıklar.
- *Saha ve Zemin Etkisi* **(f_{site}):** Odak kayadan (engineering bedrock) yüzeye ulaşan sismik dalgaların, üst zemin katmanlarında uğradığı genlik büyütmesi (amplifikasyon) veya yüksek kayma gerilmeleri altında gösterdiği doğrusal olmayan (non-linear) zemin davranışını temsil eder. Ana parametre V_{S30} (üst 30 metrenin ortalama kayma dalgası hızı) olmakla birlikte, derin havza etkileri için $Z_{1.0}$ ve $Z_{2.5}$ (1.0 km/s ve 2.5 km/s kayma dalgası hızına ulaşan derinlikler) parametreleri de denkleme dahil edilir.
- *Faylanma Mekanizması* **(f_{fault}):** Odak mekanizmasının (doğrultu atımlı, ters/bindirme, normal faylanma) yer hareketi genliği üzerindeki etkilerini ayırır.

GMPE'ler, yalnızca akademik analizlerin değil, pratik mühendislik uygulamalarının ve yasal mevzuatların da temel omurgasını oluşturur.

- *Sismik Tehlike Analizleri (DSHA ve PSHA):*
    - *Deterministik Analizler (DSHA):* Belirlenen senaryo depremi (M_w) ve en kritik mesafe (R) için sahadaki kilit şiddet parametrelerinin üst sınırlarını belirlemede kullanılır.
    - *Olasılıksal Analizler (PSHA):* Bir bölgedeki bütün olası kaynakların, tekrarlanma oranlarının ve mesafe dağılımlarının birlikte modellenmesiyle, seçilen bir zaman aralığında (örneğin 50 yıl içinde %10 ya da %2 gibi) aşılma ihtimaline karşılık gelen tehlike eğrileri ve tasarım spektrumları bu yolla hesaplanır.
- *Tasarım Spektrumlarının Oluşturulması ve Yönetmelikler:*

Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH) ve TBDY-2018 başta olmak üzere, ulusal ve uluslararası bina yönetmeliklerindeki spektral ivme katsayıları (S_{DS}, S_{D1} vb.), sahadaki GMPE hesaplamalarının çoklu model yaklaşımlarıyla (Mantık Ağaçları / Logic Trees) haritalandırılmasıyla türetilir.

- *İvme Kaydı Seçimi ve Ölçeklendirme (Selection ve Scaling):*

Bir yapının doğrusal olmayan zaman tanım alanında (NLTHA) analiz edilmesi için seçilecek gerçek ivme kayıtları, genellikle hedef spektrum (Target Spectrum) veya koşullu ortalama spektrum (Conditional Mean Spectrum - CMS) yaklaşımıyla belirlenir; bu hedef spektrumların türetilmesinde GMPE çıktıları temel girdi olarak kullanılır.

- *Belirsizlik Yönetimi (Aleatory ve Epistemic Uncertainty):*

- *Rastlantısal Değişkenlik (Aleatory Uncertainty - σ_{total}):* Yer hareketinin doğasından kaynaklanan ve engellenemeyen saçılımı ifade eder. GMPE'ler bu belirsizliği grup içi (ϕ) ve gruplar arası (τ) bileşenlere ayırarak olasılıksal risk hesaplarına dahil eder.
- *Bilgi Eksikliğine Dayalı Belirsizlik (Epistemic Uncertainty):* Bölgeye uygun veri yetersizliğinden doğan belirsizliği, mantık ağaçlarında (Logic Trees) farklı GMPE'lere ağırlık katsayıları atayarak minimize etmeye katkı sağlar.

İlk Dönem Ampirik Azalım İlişkileri (1960–1980'ler)

Ampirik yer hareketi tahmin modellerinin (GMPE) tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1960–1980 yılları arası ilk verisel veri tabanlarının oluşturulduğu, regresyon tekniklerinin şekillendiği ve olasılıksal tehlike analizlerinin (PSHA) ihtiyaç duyduğu temel matematiksel altyapının kurulduğu dönemdir. Kuvvetli ivme kayıtçılarının yaygınlaşmasıyla birlikte ilk ampirik yer hareketi azalım ilişkileri 1960'ların sonunda ortaya çıkmıştır. Kuvvetli yer hareketi verilerinin oldukça kısıtlı olduğu bu dönemde ilk ilişkiler, yalnızca En Büyük Yer İvmesini (PGA) tahmin etmeye odaklanmış ve birincil parametre olarak deprem büyüklüğü (M) ile uzaklığı (R) esas almıştır.

Esteva ve Rosenblueth (1964): Literatürdeki ilk ampirik azalım ilişkilerinden birini önermişlerdir. Yer hareketinin uzaklıkla sönümünü ve büyüklükle üstel artışını ifade eden genel fonksiyonel formu tanımlamışlardır:

$$PGA = C_1 \cdot e^{C_2 M} \cdot (R + C_3)^{-C_4} \qquad (2)$$

Benzer bir dönemde, *Kanai (1961), Milne ve Davenport (1969):* Japonya ve Kanada verilerini kullanarak benzer log-

doğrusal modeller geliştirmiş, ivme azalımının temelde geometrik yayılma ve malzeme sönümüne dayandığını ortaya koymuşlardır.

1970'ler: Spektral Parametreler ve Zemin Etkisinin Katılımı

1971 San Fernando depremi sonrasında veri sayısının hızla artması, modellerin sadece pik değerleri (PGA) değil, yapısal tepki açısından kritik olan Tepki Spektrumlarını (SA) da tahmin edecek şekilde genişlemesini sağlamıştır.

Schnabel ve Seed (1973): Kaya sahalar için ivme azalım eğrilerini yayımlayarak zemin türünün yer hareketi genliği üzerindeki baskın etkisini vurgulamışlardır. Bir yıl sonra *Trifunac (1976):* Büyüklük, uzaklık ve kaba zemin sınıflamalarını (kaya, sert zemin, yumuşak zemin) içeren Fourier genlik spektrumu ve tepki spektrumu modellerini geliştirmiştir. Bu çizgide, *McGuire (1978):* İstatiksel regresyon analizlerini standartlaştırarak PSHA hesaplamalarına doğrudan entegre edilebilen spektral ivme ilişkilerini türetmiştir.

1980'ler: Metodolojik Devrim ve Fay Yakın Saha Etkileri

1980'li yıllarda veri kalitesinin artmasıyla birlikte, iki aşamalı regresyon teknikleri geliştirilmiş, yeni fay uzaklığı tanımları yapılmış ve yakın saha doyum (saturation) kavramı fonksiyonel formlara eklenmiştir.

Joyner ve Boore (1981): İki aşamalı regresyon (two-stage regression) yöntemini sektöre kazandırmış ve faya olan en yakın yatay uzaklık olarak bilinen Joyner-Boore uzaklığını (R_{jb}) tanımlamışlardır. Aynı yıl, *Campbell (1981):* Ruptür yüzeyine olan en kısa mesafe (R_{rup}) tanımını literatüre sokmuş, yakın sahada ivmenin büyüklükle sınırsız artmayacağını ifade eden "doyum" (saturation) terimini modele eklemiştir. Bu yaklaşıma paralel olarak, *Sadigh vd. (1986):* Kaliforniya verilerine dayalı olarak kaya ve zemin sahalar için ayrı katsayılara sahip spektral azalım ilişkilerini

sunmuşlardır (1997'de nihai makale olarak basılmıştır). Öte yandan, *Idriss (1985):* Büyüklüğe bağlı uzaklık sönüm oranlarını (magnitude-dependent decay) dikkate alan esnek modeller geliştirmiştir.

Bu ilk dönem modelleri, sınırlı ivme veritabanlarına dayanmaları nedeniyle genellikle doğrusal regresyon tekniklerini ve basit noktasal kaynak varsayımlarını kullanmıştır. Aşağıda bu dönemde geliştirilen GMPE'lerin genel karakteristiği ve sınırlandırmaları özetlenmektedir.

1960–1980 dönemi uygulamalarına bakıldığında, tahmin edilen büyüklükler ağırlıklı olarak PGA ve PGV ile sınırlı kalmış, spektral ivme ancak 1970'lerin sonundan itibaren modellere dahil edilebilmiştir. Uzaklık ölçütü olarak başlangıçta yalnızca merkez üssü uzaklığı ve odak uzaklığı kullanılmış; Rjb ve Rrup gibi fay temelli tanımlar ise ancak 1980'lerde literatüre girmiştir. Büyüklük ölçeği olarak yerel magnitüd ve yüzey dalgası magnitüdü tercih edilmiş; zemin koşulları ise Vs30 gibi nicel bir parametre kullanılmaksızın yalnızca "kaya" veya "zemin" gibi kaba kategorilerle temsil edilmiştir. Faylanma mekanizması ise bu dönemde çoğu zaman göz ardı edilmiş ya da sabit kabul edilmiştir.

Çok Parametreli ve Bölgesel Ampirik Modeller (1990–2000'ler)

1990–2000'li yıllar, ampirik yer hareketi tahmin modellerinin (GMPE) basit kestirim denkleminden çıkarak karmaşık, çok parametreli ve tektronik rejimlere özel (bölgesel) formülasyonlara dönüştüğü dönemdir. Bu süreçte kuvvetli yer hareketi veri tabanlarının genişlemesi, veri kalitesinin artması ve PEER (*Pacific Earthquake Engineering Research Center*) gibi kurumların koordinasyonu metodolojik bir devrim yaratmıştır.

1990'lar: Parametrik Çeşitlilik ve V_{s30} Standardizasyonu

1990'larda modeller, doyuma ulaşan yerel büyüklükler (M_L, M_S) yerine fiziksel temelli Moment Büyüklüğü (M_w) ölçeğine geçmiş; zemin koşulları ise kaba nitel tanımlardan V_{s30} (üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı) parametresine evrilmiştir.

Ambraseys vd. (1996): Avrupa ve Orta Doğu verilerini kullanarak bölgesel ölçekte ilk kapsamlı spektral ivme azalım ilişkilerini türetmişlerdir. Aynı dönemde, *Abrahamson ve Silva (1997):* Faylanma mekanizması (doğrultu atımlı, ters, normal) ve asılı blok (*hanging-wall*) etkisini modele dahil eden ilk geniş kapsamlı ilişkilerden birini sunmuşlardır. Buna paralel olarak, *Boore, Joyner ve Fumal (1997):* Zemin etkisini doğrudan V_{s30} değişkenine bağlayan regresyon modelini geliştirerek modern saha sınıflandırmasının temelini atmışlardır. Bu yaklaşımla eş zamanlı olarak, *Sadigh vd. (1997):* Kırılma mekanizması ve saha sınıfı farklarını ayrı katsayılarla tanımlayan, mühendislik pratiğinde uzun yıllar standart kabul edilen modeli yayımlamışlardır.

1990'lı yıllardan itibaren kayıt ağlarının genişlemesi ve fay kırılma fiziğinin daha iyi anlaşılmasıyla GMPE'ler karmaşıklaşmıştır. Abrahamson ve Youngs (1992), deprem içi (*intra-event*) ve depremler arası (*inter-event*) varyasyonları birbirinden ayıran Rastgele Etkiler (*Random-Effects*) regresyon metodolojisini standart hale getirmiştir.

Bu dönemde gelişen modeller (Sadigh vd., 1997; Abrahamson ve Silva, 1997):

- Fay mekanizmalarını (doğrultu atımlı, ters, normal),
- Üst blok (*hanging wall*) ve alt blok (*footwall*) etkilerini,
- Zemin türünü kategorik sınıflandırmalar (Kaya/Zemin) yerine sürekli değişkenlerle ifade etme ihtiyacını modellerine yansıtmıştır.

Küresel Veri Tabanları Çağı ve Modern Ampirik Modeller (2000'ler–Günümüz)

2000'li yıllarda tektonefizyografik rejim ayrımı (Aktif Kabuk, Yitim Zonu ve Kararlı Kıtasal Bölgeler) netleşmiş ve doğrusal olmayan zemin davranışı modellerde açıkça tanımlanmıştır. 2008 yılında tamamlanan NGA-West1 (Next Generation Attenuation) projesi ise veri tabanlarını küreselleştirerek çok parametreli GMPE çağını başlatmıştır.

Akkar ve Bommer (2007): Avrupa ve Akdeniz kuşağı yer hareketi kayıtlarını kullanarak bölgesel faktörlerin ve faylanma tiplerinin spektral genlikler üzerindeki etkisini modellemişlerdir. Bu dönemin en kapsamlı adımı ise *NGA-West1 Modelleri (2008):* Bu dönemde dört ayrı ekip tarafından paralel olarak geliştirilen modeller, ortak bir noktada buluşarak yırtılma üst derinliği (Z_{tor}), sediman havza derinliği ($Z_{1.0}, Z_{2.5}$), doğrusal olmayan zemin tepkisi ve faya göre konum geometrisini (R_x) hesaba katmıştır.

Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından başlatılan NGA (Next Generation Attenuation) projeleri, GMPE gelişiminde bir dönüm noktası olmuştur. NGA-West1 (2008) ve NGA-West2 (2014) veritabanları, dört ayrı ekibin ürettiği modelleri tek bir çatı altında toplayarak binlerce kaliteli ivme kaydını araştırmacıların hizmetine sunmuştur. Bu küresel modellerin yanında, Avrupa ve Türkiye ölçeğinde geliştirilen Akkar vd. (2014), Kale vd. (2015) ve ESM veritabanına dayanan Kotha vd. (2020) modelleri öne çıkmıştır.

1990'lar ile 2000'li yılların GMPE'leri karşılaştırıldığında belirgin bir metodolojik sıçrama göze çarpar. Büyüklük ölçeği 1990'larda zaten moment büyüklüğüne (Mw) geçmiş olmakla birlikte, 2000'li yıllarda bu ölçeğin dayandığı veri tabanı çok daha geniş ve homojen hale gelmiştir. Zemin parametresi tarafında 1990'ların Vs30 ve kaba sınıf temelli yaklaşımının yerini,

2000'lerde sürekli Vs30 değişkeni ve doğrusal olmayan zemin tepkisi fonksiyonları almıştır. Saha geometrisi 1990'larda yalnızca Rjb ve Rrup ile ifade edilirken, 2000'li yıllarda bunlara Rx, havza derinliği (Z1.0, Z2.5) gibi ilave parametreler eklenmiştir. Fay mekanizması ise 1990'ların nitel kategorilerinden (ters/doğrultu atımlı), 2000'li yıllarda eğim açısı, yırtılma açısı ve asılı blok faktörü gibi sürekli değişkenlerle tanımlanan daha ayrıntılı bir yapıya evrilmiştir.

Modern ampirik GMPE'lerde girdi parametresi olarak:

- V_{s30} (Üst 30 metrenin ortalama kayma dalgası hızı),
- $Z_{1.0}$ ve $Z_{2.5}$ (1.0 km/s ve 2.5 km/s kayma dalgası hızına sahip sediman derinlikleri),
- Doğrusal olmayan zemin davranışı (*non-linear site response*) fonksiyonları yer almaktadır.

Ampirik Modellerin Kısıtları ve Veriye Dayalı Yaklaşımlara Duyulan İhtiyaç

Geleneksel ampirik yer hareketi tahmin modelleri (GMPE) regresyon analizlerine dayalı sağlam bir altyapı sunsa da, önceden tanımlanmış parametrik formlar ve veri kısıtları nedeniyle fiziksel süreçlerin tüm karmaşıklığını temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlamalar, verilerdeki doğrusal olmayan ilişkileri esnek bir şekilde öğrenebilen makine öğrenmesi ve veriye dayalı (data-driven) yaklaşımlara olan ihtiyacı doğurmuştur (Derras vd., 2014). Aşağıda geleneksel ampirik yaklaşımlar ile veriye dayalı modellerin temel özellikleri karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır.

Ampirik Modellerin Temel Kısıtları

- *Fonksiyonel Form Rijitliği:* Geleneksel regresyon modelleri, ivme sönümünü ve büyüklük ölçeklenmesini önceden

varsayılan log-doğrusal veya üstel fonksiyonlara zorlar. Bu rijit yapı, karmaşık kaynak-yol-saha etkileşimlerini aşırı basitleştirir (Douglas, 2003).

- *Veri Seyrekliği ve Ekstrapolasyon Riski:* Büyük büyüklükteki ($M_w > 7.5$) ve fay yakın sahasındaki ($R_{rup} < 10$ km) ivme kayıtlarının azlığı, modellerin bu kritik bölgelerde fiziksel olarak tutarsız tahminler (örneğin aşırı doyum hataları) üretmesine yol açar.
- *Aşırı Parametreleşme ve Çoklu Doğrusallık***:** Modellere yeni parametreler ($Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, Z_{tor}, R_x) eklendikçe, regresyon katsayıları arasında yüksek korelasyon (multicollinearity) oluşur ve model kararsızlaşır.
- *Durağan Kalıntı Belirsizliği (σ):* Veri tabanları büyüse ve yeni parametreler eklense bile, ampirik modellerin standart sapması (σ_{total}) belirgin bir şekilde düşürülememekte, rastlantısal (aleatory) belirsizlik yüksek kalmaktadır (Kotha vd., 2016).

Veriye Dayalı Yaklaşımlara Duyulan İhtiyaç ve Sağladığı Avantajlar

- *Esnek ve Parametresiz (Non-parametric) Modelleme:* Yapay Sinir Ağları (YSA), Rastgele Orman (RF) ve XGBoost gibi algoritmalarda önsel bir matematiksel denklem varsayımı yoktur; model, girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi doğrudan veriden öğrenir.
- *Yüksek Boyutlu Veri İşleme:* Veriye dayalı yaklaşımlar, zemin profilinin tamamı (V_s profili), spektral içerikler ve 3B hız modelleri gibi çok sayıda karmaşık girdiyi aşırı uyum (overfitting) riski olmadan işleyebilir.
- *Fizik Destekli Makine Öğrenmesi (PINN):* Veri kısıtının olduğu bölgelerde fizik kurallarını (sönüm ilkeleri, sınır

şartları) kayıp fonksiyonuna (loss function) dahil ederek hem veriden öğrenen hem de fiziksel olarak mantıklı tahminler yapan hibrit modeller kurulabilmektedir.

Geleneksel ampirik modeller ile makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar arasındaki fark beş eksende özetlenebilir. Model yapısı açısından ampirik modeller önceden tanımlanmış parametrik denklemlere dayanırken, veriye dayalı modeller parametresiz ve veri odaklı esnek mimariler kullanır. Girdi kapasitesi bakımından ampirik modeller Mw, R ve Vs30 gibi sınırlı sayıda değişkenle çalışırken, ML modelleri çok boyutlu ve karmaşık veri setlerini işleyebilir. Yakın saha ve büyük büyüklük senaryolarında ampirik modellerin ekstrapolasyon hatası yüksek kalırken, ML modelleri veri odaklı desen tanıma sayesinde bu bölgelerde daha güçlü bir performans sergileyebilmektedir. Açıklanabilirlik açısından ise durum tam tersi bir eğilim gösterir: ampirik modeller açık matematiksel formülasyonları sayesinde yüksek açıklanabilirliğe sahipken, ML modelleri SHAP veya LIME gibi açıklanabilir yapay zeka yöntemlerine ihtiyaç duyar. Son olarak belirsizlik yönetiminde ampirik modeller sabit veya basit varyans yapıları kullanırken, ML modelleri derin öğrenme ve Bayesyen yaklaşımlarla daha dinamik bir belirsizlik temsiline olanak tanır.

Bu kısıtlar, herhangi bir fonksiyonel form dayatması yapmaksızın karmaşık ve lineer olmayan ilişkileri öğrenebilen Makine Öğrenmesi (ML) ve Yapay Zeka (AI) yaklaşımlarının kullanımını tetiklemiştir.

Yer Hareketi Tahmininde Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Makine Öğrenmesine Genel Bakış ve GMPE ile Paralellikler

Geleneksel GMPE geliştirme süreci esasen bir istatistiksel regresyon işlemidir. Makine öğrenmesi (ML) ise yüksek boyutlu girdi matrisleri ($\mathbf{X} = \{M_w, R_{jb}, V_{s30}, \dots\}$) ile hedef büyüklük ($Y =$

$\ln(IM)$) arasındaki çok boyutlu transfer fonksiyonunu veriden öğrenen bir denetimli öğrenme (*supervised learning*) yaklaşımı sunar.

Geleneksel Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Yapay Sinir Ağları (ANN / MLP): Deprem mühendisliğinde ML kullanımının ilk örneklerindendir. Güllü ve Erçelebi (2007) Türkiye verileri üzerinde, Derras vd. (2012, 2014) ise Avrupa ve NGA veritabanlarında Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarilerini kullanarak spektral ivme ve non-elastik tepki spektrumlarını başarıyla tahmin etmişlerdir.

Destek Vektör Regresyonu (SVR): Düşük boyutlu veri setlerinde küresel optimizasyon sağlama yeteneğiyle öne çıkar (Gandomi vd., 2011).

Karar Ağacı Tabanlı Topluluk (Ensemble) Modelleri:

Random Forest (Rastgele Orman): Trugman ve Shearer (2018), Karar Ağaçları topluluğunun ampirik modellere kıyasla artık varyansını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM, CatBoost): Güncel çalışmalarda (Kong vd., 2019), karmaşık zemin-yapı etkileşimleri ve yer hareketi tahmininde en yüksek R^2 ve en düşük RMSE değerlerini veren algoritmalar olarak öne çıkmaktadır.

Derin Öğrenme (Deep Learning) Yaklaşımları

Derin Sinir Ağları (DNN): Çok sayıda gizli katman (> 3) kullanarak yüksek dereceden non-lineer etkileşimleri modeller.

Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN / LSTM / GRU): Yer hareketinin spektral periyotlar boyunca gösterdiği sürekliliği ($S_a(T)$ spektrumu) zaman dizisi benzeri bir ardışıklıkla öğrenmek için kullanılır.

Evrişimli Sinir Ağları (CNN): Ham ivme zaman serilerinden veya faya ait 2B/3B geometrik görüntülerden doğrudan özellik çıkarımı gerçekleştirir.

Yapay Zeka Tabanlı GMPE Geliştirme Metodolojisi ve İş Akışı

Yapay zeka tabanlı bir GMPE geliştirilirken izlenecek metodolojik iş akışı 5 temel adımdan oluşur:

[Veri Hazırlığı ve Filtreleme] ➔ [Öznitelik Mühendisliği] ➔ [Gruplandırılmış Veri Bölümleme] ➔ [Hiperparametre Optimizasyonu] ➔ [Belirsizlik ve Artık Analizi]

Veri Hazırlığı ve Ön İşleme (Preprocessing)

- Verilerin homojenleştirilmesi (AFAD, NGA-West2 veya ESM veritabanlarından gürültüden arındırılmış ivme kayıtlarının seçilmesi).
- Filtre frekans sınırları (f_{hp}, f_{lp}) dikkate alınarak kullanılabilir periyot aralığının belirlenmesi.
- Aykırı değerlerin (*outliers*) Tukey veya Isolation Forest yöntemleriyle tespiti.

Öznitelik Mühendisliği (Feature Engineering)

Girdi matrisi X şu temel fiziksel bileşenleri barındırmalıdır:

Kaynak (S): Moment Büyüklüğü (M_w), Odak Derinliği (Z_{tor}), Fay Mekanizması (RAK).

Yol (P): R_{jb}, R_{rup}, R_{hyp}, Anelastik Azalım Parametreleri.

Saha (G): V_{s30}, $Z_{1.0}$, $Z_{2.5}$, Baskın Periyot (T_0).

Veri Bölümleme ve Veri Sızıntısını (Data Leakage) Önleme

Geleneksel rastgele veri ayırma (*Random Train-Test Split*) sismoloji verilerinde **veri sızıntısına** yol açar. Aynı depreme ait ivme

kayıtlarının hem eğitim hem test setine düşmesi modelin ezberlemesine (*overfitting*) neden olur. Bu nedenle **GroupKFold (Event-Based Splitting)** uygulanmalı; belirli deprem olayları tamamen test setinde tutulmalıdır.

Hiperparametre Optimizasyonu

Ağ derinliği, öğrenme oranı (*learning rate*), ağaç sayısı (*n_estimators*) gibi parametreler Bayesyen Optimizasyon (*Optuna* veya *BayesianOptimization* kütüphaneleri) kullanılarak K-katlı çapraz doğrulama (K-Fold Cross Validation) ile optimize edilmelidir.

Belirsizlik Analizi (Aleatory Variability)

Makine öğrenmesi modelleri toplam artığı (ϵ) tahmin eder. Ancak sismik tehlike analizinde kullanılabilmesi için toplam varyansın (σ_{total}^2), depremler arası (τ^2) ve deprem içi (ϕ^2) bileşenlerine ayrıştırılması gerekir:

$$\sigma_{total}^2 = \tau^2 + \phi^2 \qquad (3)$$

Bu işlem, ML modelinin tahmin artıkları üzerine *Karışık Etkili Modeller (Mixed-Effects Regression)* uygulanarak gerçekleştirilir.

Gelişmekte Olan Yönler ve Açık Araştırma Alanları

Yukarıda özetlenen iş akışı, mevcut ML-GMPE literatürünün büyük bölümünü kapsasa da, alanın hâlâ olgunlaşmakta olan ve gelecekteki uygulamalar için doğrudan potansiyel taşıyan dört yönü ayrıca vurgulanmayı hak etmektedir:

- *Transfer Öğrenmesi ve Simülasyon Destekli Veri Artırma:* Kayıt yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde (ör. Doğu Anadolu fay sistemi), büyük küresel veri tabanları (NGA-West2, ESM) üzerinde önceden eğitilmiş ağların ince ayar (fine-tuning) yoluyla yerel veri setlerine uyarlanması ve

stokastik/fiziks tabanlı simülasyonlardan üretilen sentetik kayıtlarla eğitim setinin zenginleştirilmesi, veri seyrekliğinden kaynaklanan ekstrapolasyon riskine somut bir çözüm sunmaktadır.

- *Artık-Düzeltmeli Hibrit Modeller:* ML algoritmasını sıfırdan bir GMPE olarak değil, geleneksel bir modelin (ör. NGA-West2 ailesi) kalıntılarını (residuals) öğrenen bir düzeltme katmanı olarak konumlandırmak; ekstrapolasyon bölgelerinde ampirik modelin fiziksel kararlılığını korurken, veri yoğun bölgelerde ML'nin örüntü yakalama gücünden yararlanılmasını sağlar (Kong vd., 2019).
- *Non-ergodik ve Mekansal Olarak Değişken Modelleme:* Klasik ergodik varsayımını terk ederek istasyona ve yola özgü sistematik etkileri (site-to-site, path-to-path bileşenleri) ayrıştıran non-ergodik yaklaşımlar (Kotha vd., 2016), ML'nin yüksek boyutlu girdi işleme kapasitesiyle birleştirildiğinde, bu bölümde sunulan depremler-arası/deprem-içi varyans ayrıştırmasının ötesine geçen ilave bir belirsizlik azaltma potansiyeli taşımaktadır.
- *Derin Bayesyen ve Dağılım Tabanlı Belirsizlik Nicelemesi:* Karışık etkili artık analizine ek olarak, Monte Carlo Dropout, derin topluluk (deep ensemble) ve nicel regresyon (quantile regression) gibi epistemik belirsizliği doğrudan model çıktısından üreten teknikler, özellikle veri seyrek bölgelerde (büyük deprem büyüklüğü ve fay yakın sahası gibi) tahmin güvenilirliğinin raporlanmasında tamamlayıcı bir araç sunar.

Model Performans Değerlendirmesi ve Fiziksel Tutarlılık Kontrolleri

İstatistiki Başarım Ölçütleri

Modellerin başarısı tek başına R^2 ile ölçülemez. Şu istatistiksel parametreler birlikte değerlendirilmelidir:

- *Kök Ortalama Kare Hata (RMSE):*

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\ln IM_{obs,i} - \ln IM_{pred,i}\right)^2} \qquad (4)$$

- *Ortalama Mutlak Hata (MAE)*
- *Logaritmik Artık Analizi (R_i):*

$$R_i = \ln\left(IM_{obs,i}\right) - \ln\left(IM_{pred,i}\right) \qquad (5)$$

Artıkların M_w, R_{jb} ve V_{s30} ile değişiminde eğimin sıfıra yakınlığı (tarafsızlık / *unbiasedness*) denetlenmelidir.

Fiziksel Tutarlılık Kontrolleri (*Sanity Checks*)

Yapay zeka modelleri verideki matematiksel örüntüyü öğrenirken fiziksel gerçeklikle çelişen sonuçlar üretebilir (*non-physical behavior*). Bu nedenle eğitilen ML-GMPE modeline şu sentetik testler uygulanmalıdır:

- *Mesafe Azalım Tutarlılığı:* M_w sabit tutulduğunda, R_{jb} arttıkça IM değerinin monotonik olarak azalması gerekir.
- *Büyüklük Doygunluğu (Magnitude Saturation):* Büyük büyüklüklerde ($M_w > 7.5$), faya yakın mesafelerde ivme genliğinin artış hızının doymaya ulaşması kontrol edilmelidir.
- *Zemin Büyütmesi Tutarlılığı:* Düşük V_{s30} değerlerinde yüksek spektral ivme büyütmesi elde edilmeli, ancak yüksek

PGA değerlerinde lineer olmayan zemin davranışı sönümlemesi gözlemlenmelidir.

Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) ve Fizik Kısıtlı Modeller (PINN)

"Kara Kutu" (*Black-Box*) Eleştirisi

Geleneksel mühendislik disiplinleri, karar süreçlerinde şeffaflık arar. Derin öğrenme ve Karmaşık Topluluk Modelleri yüksek tahmin başarısı sunsa da "kara kutu" olmaları nedeniyle kritik altyapıların sismik tasarımında doğrudan kullanımda dirençle karşılaşmaktadır.

Açıklanabilir Yapay Zeka (XAI) Yöntemleri

Bu güvensizliği aşmak için XAI teknikleri ML-GMPE modellerine entegre edilmektedir:

- *SHAP (SHapley Additive exPlanations):* Oyun teorisine (Shapley, 1953; Lundberg ve Lee, 2017) dayanan SHAP, her bir girdi parametresinin (M_w, R_{jb}, V_{s30}) üretilen tahmin üzerindeki marjinal katkısını nicel olarak hesaplar.
- *LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations):* Belirli bir veri noktası etrafında modeli yerel olarak açıklanabilir kılan doğrusal yaklaşımlar sunar.

Fizik Bilgili Sinir Ağları (Physics-Informed Neural Networks - PINNs)

Yapay zeka ile sismoloji arasındaki en ileri köprü PINN mimarileridir (Raissi vd., 2019). Standart bir sinir ağında kayıp fonksiyonu (*loss function*) sadece veri hatasını (MSE_{data}) minimize ederken; PINN modelinde kayıp fonksiyonuna fiziksel kısıtlar eklenir:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{data} + \lambda_1 \mathcal{L}_{wave_equation} + \lambda_2 \mathcal{L}_{monotonicity} \quad (6)$$

Bu sayede model, verinin az olduğu alanlarda (örn. $M_w > 8.0$ veya $R_{jb} < 5$ km) bile fizik kurallarına (dalga yayılım denklemleri, enerji korunumu, monotonik azalım) aykırı tahminler üretemez.

Sonuçlar ve Gelecek Vizyonu

Deprem mühendisliğinde yer hareketi tahmin modelleri (Ground Motion Prediction Equations – GMPE), yalnızca akademik bir araç değil, aynı zamanda mühendislik uygulamalarının ve yasal düzenlemelerin temel dayanak noktasıdır. Bu modeller, kaynak özellikleri, dalga yayılım yolları ve yerel zemin koşullarını dikkate alarak, belirli bir sahada beklenen kuvvetli yer hareketini matematiksel bağıntılarla öngörür. Böylece, olasılıksal ve deterministik sismik tehlike analizlerinin vazgeçilmez girdisini oluşturur; bina yönetmeliklerindeki tasarım spektrumlarının belirlenmesinde ve kentsel risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar.

GMPE'lerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1960'lardan itibaren ivme kayıt cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte ilk ampirik azalım ilişkilerinin ortaya çıktığı görülür. Bu dönemde modeller, çoğunlukla deprem büyüklüğü ve uzaklık parametrelerine dayalı basit fonksiyonel formlar kullanmış, ancak veri kısıtlılığı nedeniyle zemin koşulları ve faylanma mekanizması gibi faktörler göz ardı edilmiştir. 1970'lerden itibaren spektral parametrelerin ve zemin etkilerinin modellere dahil edilmesiyle daha gerçekçi tahminler yapılmaya başlanmış, 1980'lerde ise iki aşamalı regresyon teknikleri ve yakın saha doyum kavramı literatüre girmiştir. 1990'lı yıllar, moment büyüklüğü ölçeğine geçiş ve Vs30 parametresinin standart hale gelmesiyle metodolojik bir sıçrama yaratmış; 2000'li yıllarda ise küresel veri tabanlarının oluşturulması ve NGA-West projeleriyle çok parametreli, bölgesel ve doğrusal olmayan zemin davranışını içeren modern modeller geliştirilmiştir.

Bununla birlikte, geleneksel ampirik modellerin fonksiyonel form rijitliği, veri seyrekliği ve yüksek belirsizlik düzeyi gibi sınırlamaları, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara olan ihtiyacı doğurmuştur. Yapay sinir ağları, rastgele ormanlar ve gradient boosting algoritmaları, karmaşık kaynak-yol-saha etkileşimlerini esnek biçimde öğrenebilmekte; derin öğrenme yöntemleri ise ivme zaman serilerinden doğrudan özellik çıkarımı yaparak daha güçlü tahminler sunmaktadır. Ayrıca, fizik bilgili sinir ağları (PINN) ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) teknikleri, modellerin hem yüksek doğruluk hem de mühendislik açısından şeffaflık sağlamasına katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, GMPE'lerin evrimi, klasik regresyon temelli yaklaşımlardan veri odaklı ve fiziksel kısıtlı hibrit modellere doğru ilerlemektedir. Geleceğin sismik tehlike değerlendirmeleri, verinin sunduğu esnek öğrenme gücü ile fiziğin sağlam sınırlarını birleştiren bu hibrit sistemlere dayanacak; böylece daha güvenilir, açıklanabilir ve sahaya özgü deprem tehlike haritalarının oluşturulmasına olanak tanıyacaktır.

Yer hareketi tahmin modellerinin ampirik regresyon denkleminden veri yönelimli ve fiziksel kısıtlı yapay zeka sistemlerine evrimi, sismik tehlike analizinde yeni bir paradigma başlatmıştır. Bu dönüşüm, geleneksel yöntemlerin güvenilirliği ile modern algoritmaların yüksek tahmin kapasitesini birleştiren hibrit bir geleceğe işaret etmektedir.

Geleneksel GMPE'lerin Sürdürülebilir Rolü

Geleneksel GMPE'ler, fiziksel olarak açıkça tanımlanabilen parametrik yapıları ve mühendislik pratiğindeki köklü geçmişleri sayesinde Olasılıksal Sismik Tehlike Analizlerinin (PSHA) temel taşı olmaya devam etmektedir. Düzenleyici kurumlar ve ulusal bina yönetmelikleri (örneğin TBDY-2018, Eurocode 8, ASCE 7)

tarafından resmi kabul görmüş olmaları, bu modellerin hukuki ve teknik standart belirleyici konumunu korumasını sağlamaktadır.

Yapay Zeka Tabanlı Modellerin Sunduğu Metodolojik Sıçrama

Yapay zeka ve makine öğrenmesi yaklaşımları, veri setlerindeki doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri ve kaynak-yol-saha etkileşimlerini önceden varsayılmış rijit fonksiyonel formlara zorlamadan öğrenir.

Belirsizlik Yönetimi: Karma etkili (mixed-effects) analizlerle desteklenen algoritmalar, modellerdeki rastlantısal belirsizliği ve artık varyansı ($\sigma_{total} = \sqrt{\tau^2 + \phi^2}$) belirgin ölçüde düşürür.

Mevcut GMPE yaklaşımı ile literatürün işaret ettiği gelecek vizyonu üç eksende karşılaştırılabilir. Model mimarisi açısından bugün ya parametrik regresyona ya da saf veri odaklı "kara kutu" algoritmalara dayanılırken, gelecekte dalga yayınım fiziği ve sönüm sınırlarıyla kısıtlanmış PINN mimarilerinin yaygınlaşması beklenmektedir. Açıklanabilirlik boyutunda mevcut durumda katsayılar üzerinden sınırlı bir fiziki yorumlama yapılabilirken, geleceğin modellerinin SHAP ve LIME gibi XAI yöntemleriyle kararlarının fiziksel gerekçesini sunan şeffaf yapılara dönüşmesi öngörülmektedir. Yönetmelik uyumu açısından ise bugünkü statik ve bölgesel ortalamalara dayalı haritaların yerini, sahaya özgü (site-specific) ve veri zenginliği yüksek, daha esnek sismik tehlike haritalarının alması beklenmektedir.

Çok Boyutlu Veri Entegrasyonu: Tek bir V_{s30} değeri yerine tüm V_s derinlik profilini, 3B sediman havza geometrilerini ($Z_{1.0}, Z_{2.5}$) ve sismik ağ kayıtlarını doğrudan işleme kapasitesine sahiptir.

Gelecek Vizyonu: PINN ve XAI Destekli Hibrit Yaklaşımlar

Geleceğin sismik tehlike değerlendirmeleri, geleneksel yöntemlerin fiziki doğrulanabilirliği ile yapay zekanın yüksek temsil gücünü sentezleyen hibrit sistemlere dayanacaktır.

Verinin sunduğu esnek öğrenme gücü ile fiziğin sarsılmaz koruma sınırlarını birleştiren bu hibrit modeller, yeni nesil sismik tehlike haritalarının oluşturulmasında ve depreme dirençli yapı tasarım standartlarının geliştirilmesinde temel rol oynayacaktır.

Kaynakça

Abrahamson, N. A ve Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127.

Abrahamson, N. A ve Youngs, R. R. (1992). A stable algorithm for regression analysis using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 505-510.

Akkar, S. ve Bommer, J. J. (2007). Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), 511–530

Akkar, S., Sandıkkaya, M. A. ve Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 359-387.

Ambraseys, N. N., Simpson, K. A. ve Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering ve Structural Dynamics*, 25(4), 371-400.

Campbell, K. W. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070.

Derras, B., Bard, P. Y., Cotton, F. ve Bekkouche, A. (2012). Adapting the neural network approach to PGA prediction: An example based on the KiK-net data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(4), 1446-1461.

Derras, B., Bard, P. Y. ve Cotton, F. (2014). Towards fully data-driven ground-motion prediction models for Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 495-516.

Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61(1-2), 43-104.

Esteva, L. ve Rosenblueth, E. (1964). Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. *Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 2(1), 1-18.

Gandomi, A. H., Alavi, A. H., Mousavi, M. ve Tabatabaei, S. M. (2011). A hybrid computational approach to derive new ground-motion prediction equations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(4), 717-732.

Güllü, H. ve Erçelebi, E. (2007). A neural network approach for attenuation relationships: An application using Turkish strong ground motion dataset. *Engineering Geology*, 93(3-4), 65-81.

Joyner, W. B. ve Boore, D. M. (1981). Peak acceleration and velocity from strong-motion records including the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the seismological Society of America*, *71*(6), 2011-2038.

Idriss, I. M. (1985). Evaluating seismic risk in engineering practice. *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 12-16 August 1985.

Kanai, K. (1961). An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39, 85-95.

Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A. ve Hamzehloo, H. (2015). A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV and 5%-damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 963-980.

Kong, Q., Trugman, D. T., Ross, Z. E., Bianco, M. J., Meade, B. J. ve Gerstoft, P. (2019). Machine learning in seismology: Turning data into insights. *Seismological Research Letters*, 90(1), 3-14.

Kotha, S. R., Bindi, D. ve Cotton, F. (2016). Partially non-ergodic region-specific GMPE for Europe and Middle-East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(4), 1245-1263.

Kotha, S. R., Weatherill, G., Bindi, D. ve Cotton, F. (2020). A regionally-adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 4091–4125.

Lundberg, S. M. ve Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

McGuire, R. K. (1978). Seismic ground motion parameter relations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 481-490.

Milne, W. G. ve Davenport, A. G. (1969). Distribution of earthquake risk in Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 729-754.

Raissi, M., Perdikaris, P. ve Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.

Sadigh, K., Egan, J. A. ve Youngs, R. R. (1986). Specification of ground motion for seismic design of long period structures. *Earthquake Notes*, 57(1), 13.

Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F. ve Youngs, R. R. (1997). Attenuation relations for shallow crustal earthquakes

based on California strong motion data. *Seismological Research Letters*, 68(1), 180-189.

Schnabel, P. B ve Seed, H. B. (1973). Accelerations in rock for earthquakes in the western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(2), 501-516.

Shapley, L. S. (1953). A value for n-person games. In H. W. Kuhn ve A. W. Tucker (Eds.), Contributions to the Theory of Games II (pp. 307-317). Princeton University Press.

Trifunac, M. D. (1976). Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion–dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(1), 189-219.

Trugman, D. T. ve Shearer, P. M. (2018). Strong correlation between stress drop and peak ground acceleration for recent M 1–4 earthquakes in the San Francisco Bay area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 929-945.


BİDGE