



Araştırma Makalesi / Research Article

Yerel zemin koşullarının ve deprem ivmelerinin betonarme yüksek katlı binaların performansına etkisi

The Effect of Local Soil Conditions and Earthquake Zones on the Performance of High-Rise RC Buildings

Jülide Yüzbaşı¹, Fatih Avcıl^{2*}, Aydın Büyüksaraç³, Mehmet Salih Keskin⁴, Ercan Işık⁵, Enes Arkan⁶

¹ Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, jyuzbasi@cu.edu.tr,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-5666>

² Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, favcil@beu.edu.tr,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6550-550X>

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çan Meslek Yüksekokulu, absarac@comu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4279-4158>

⁴ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mskeskin@dicle.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-4437>

⁵ Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, eisik@beu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8057-065X>

⁶ Bitlis Eren Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, earkan@beu.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6588-7234>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 4 Mart 2025
Revizyon 3 Eylül 2025
Kabul 5 Eylül 2025
Online 30 Eylül 2025

Anahtar Kelimeler:

Deprem, çok katlı, betonarme,
hasar, yerel zemin, deprem bölgesi,
hedef yer değiştirme

ÖZ

Artan nüfus yoğunluğu kentleşmeyi hızlandırmış ve dünya genelinde çok katlı betonarme binaların yaygın olarak tercih edilen bir seçenek haline gelmesine neden olmuştur. Bu yapıların dinamik yükleri taşıyabilme kapasitesine sahip olmaları hem yapısal karakteristiklerine hem de yerel zemin koşulları ile deprem düzeyleri gibi yapısal olmayan faktörlere bağlıdır. Bu makale, betonarme çok katlı yapıların performansını, farklı yerel zemin koşulları ve deprem bölgelerinin etkileri açısından incelemektedir. Yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılan hedef yer değiştirmeler bağlamında bu etkiler incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda seçilen 12 katlı betonarme yapı modeli üzerinden dört farklı yerel zemin sınıfı ve dört farklı deprem düzeyi dikkate alınarak yapısal analizler ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, zemin kaynaklı hasarların yanı sıra çok katlı betonarme yapılarda oluşan hasarlar 2023 Kahramanmaraş depremleri ışığında incelenmiştir. Çalışma ile farklı yerel zemin koşulları ve farklı deprem düzeylerinin yanı sıra farklı deprem aşılma olasılıkları için elde edilen hedef yer değiştirmeler karşılaştırılarak öneriler yapılmıştır. Maksimum yer ivmesi arttıkça ve yerel zemin koşulları zayıfladıkça yapılardan beklenen hedef yer değiştirmeler artmaktadır. Hatay ili için en büyük hedef yer değiştirme değerleri elde edilirken, Adıyaman ilinde ise en küçük hedef yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 March 2025
Received in revised form 3 September 2025
Accepted 5 September 2025
Available online 30 September 2025

Keywords:

Earthquake, multi-storey, rc,
damage, local soil, earthquake
zone, target displacement

ABSTRACT

The rise in population density has accelerated urbanization, making reinforced concrete multi-storey buildings a widely preferred choice for construction globally. The capacity of these structures to withstand dynamic loads depends on both their structural characteristics and non-structural factors, such as local soil conditions and earthquake levels. This article examines the performance of reinforced concrete multi-storey structures concerning the effects of different local soil conditions and earthquake zones. These effects are analyzed in the context of target displacements used to determine the earthquake performance of structures. For this purpose, structural analyses were conducted separately, considering four local soil classes and four earthquake levels on a selected 12-storey reinforced concrete structure model. In addition to ground-related damages, the study examines damages to multi-storey reinforced concrete structures in light of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. The study compares the target displacements obtained for various local soil conditions, earthquake levels, and earthquake exceedance probabilities and offers recommendations based on the findings. As the maximum ground acceleration increases and local ground conditions weaken, the target displacements expected from the structures increase. While the largest target displacements were obtained for Hatay province, the lowest target displacement values were obtained for Adıyaman province.

Doi: 10.24012/dumf.1651028

* Sorumlu Yazar

Giriş

Betonarme çok katlı yapılar, modern inşaat dünyasında, büyük şehirlerdeki konut ve ticaret alanlarının gereksinimlerini karşılamak amacıyla yaygın olarak inşa edilmektedir. Bu tür yapılar, zemin ile etkileşimleri, deprem riski ve yapı güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle Türkiye gibi deprem tehlikesi yüksek ülkelerde, yerel zemin koşullarının ve farklı deprem düzeylerinin etkileri, yapıların güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Yapıların tasarımı ve performansı, yalnızca tasarım ve malzeme seçiminden değil, aynı zamanda zeminin ve çevresel koşulların etkilerinden de büyük ölçüde etkilenmektedir.

Yerel zemin koşulları; temel taşıma kapasitesi, zemin sıvılaşma riski, zemin deformasyonu ve yer hareketi gibi faktörleri içermektedir. Yerel zemin koşulları, yapıların temel taşıma kapasitesinden sismik davranışına kadar pek çok özelliğini etkilemektedir. Zemin koşulları yapıların stabilitesini, hareketlerini ve genel olarak güvenliğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarında zemin-deprem-yapı etkileşiminin doğru olarak ortaya konulması kritik bir öneme sahiptir. Zemin sınıfları, genellikle zeminin taşıma kapasitesine, esneklik ve rijitlik özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Zemin koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi, yapı tasarım ve değerlendirilmesinde yapı-zemin etkileşiminin gerçekçi olarak elde edilmesine imkan tanıyacaktır. Zemin ve yapı arasındaki etkileşim, deprem anındaki yapısal davranışı büyük ölçüde etkileyebilmektedir. Bu etkileşim, çok katlı yapıların tasarımında dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biridir [1]-[9].

Bunların yanı sıra, yapıların tasarımında dikkate alınacak parametrelerden biri de yapının bulunduğu veya inşa edileceği bölgenin deprem tehlikesidir. Aktif deprem kuşağında yer alan diğer bölgelerde olduğu gibi, Türkiye’de de yapıların tasarımında deprem tehlikesi dikkate alınmaktadır. 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem yönetmeliğinde deprem bölgeleri olarak dikkate alınan bu parametre güncel yönetmelikte ise deprem tehlikesi olarak dikkate alınmaktadır. 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem bölgeleri haritasında Türkiye, 1. dereceden 4. dereceye kadar farklı deprem bölgelerine ayrılmıştır. 1. derecede yer alan bölgelerde yapılar daha büyük sismik yükler altına gireceğinden daha yüksek tasarım kriterlerine sahip olmalıdır. Bunların yanı sıra, performans dayalı deprem mühendisliği kapsamında diğer yapılarda olduğu gibi, çok katlı yapıların olası bir depremde performanslarının belirlenmesinde hedef yer değiştirmeler kullanılmaktadır. Bu noktada, betonarme yüksek yapıların tasarımında ve inşasında hedef yer değiştirmelerin belirlenmesi ve bu hedeflere ulaşılmasının sağlanması kritik bir öneme sahiptir. Çok katlı yapılar, yer değiştirme limitlerini aşmamalı ve yapısal elemanlar, istenmeyen deformasyonları engellemek amacıyla doğru bir şekilde tasarlanmalıdır. Bu makale kapsamında betonarme çok katlı yapılarda hedef yer değiştirmelerin önemi, yerel zemin koşulları ve deprem tehlikesi bağlamında değerlendirilmiştir.

Betonarme yapılarda yerel zemin koşulları ve deprem düzeylerinin incelendiği çalışmaların yanı sıra yerel zemin koşullarının deprem üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda yapıların sismik davranışı üzerindeki etkileri farklı sonuç değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Dorum vd. [10], deprem

bölgesi ve yerel zemin koşullarının yapı maliyetine etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Galal ve Naimi [11], 20 ve 6 katlı betonarme bina modelleri için zemin sınıflarının etkisini yakın alan depremlerini dikkate alarak belirlemeye çalışmışlardır. Tabatabaiefar vd. [12] çerçeveli yapı sistemlerinin sismik performanslarını zeminlerin dinamik özelliklerini kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Yön vd. [13] farklı deprem bölge ve yerel zemin koşullarının etkisini beş katlı betonarme yapı özelinde incelemişlerdir. Yön ve Calayır [14] farklı zemin sınıflarının betonarme yapıların deprem davranışına etkisini ortaya koymaya çalışmışlardır. Karapetrou vd. [15] sünek olmayan yüksek betonarme binaların deprem performanslarını zemin-yapı etkileşimi kapsamında değerlendirmişlerdir, binalarda deprem performansını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Yeşil ve Ateş [16] yaptıkları çalışmada, Düzce ili özelinde farklı yerel zemin sınıflarının yapısal hasar ve performans etkilerini incelemişlerdir. Özşahin ve Eroğlu [17] yerel zemin koşullarının deprem duyarlılığına etkisini Erzincan ili özelinde incelemişlerdir. Akyıldız vd. [18] TBDY-2018’de verilen beş farklı yerel zemin sınıfını kullanarak betonarme yapı için kesit tesirlerini karşılaştırmışlardır. Aykaç vd. [19] zeminlerin dinamik davranışlarını belirlemede kullanılan kayma dalgası hızı (V_s) değerlerini kullanarak, deprem-hasar ilişkisini 2011 Van depremi ($M_w=7.1$) özelinde değerlendirmişlerdir. Pitilakis ve Petridis [20] mevcut yapılar için hasar görebilirlik eğrilerini zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak elde etmişlerdir ve zemin büyütme etkisinin yapısal hasar olasılıklarını artırdığını göstermiştir. Özgür ve Bozdoğan [21] on katlı üç farklı betonarme yapı modeli için farklı yerel zemin sınıflarını kullanarak yapısal analizler gerçekleştirmiş ve yapı-zemin etkileşiminin sismik tasarım parametrelerine etkisini ortaya koymaya çalışmışlardır. Requena-Garcia-Cruz vd. [22] orta yükseklikteki betonarme binalarda zemin-yapı etkileşimini Lizbon özelinde incelemişlerdir ve sismik kırılma hızı üzerinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır. Fiamingo vd. [23] depremde hasar almış bir yapı için zemin etkisini analitik olarak incelemişlerdir. Eroğlu ve İpek [24] beş katlı betonarme yapıda farklı temel tipleri kullanılarak zemin-yapı etkileşimini incelemişlerdir. Büyüksaraç vd. [25] çok katlı yapı planlanan bir alanda zemin özelliklerini incelemişler ve (sert kaya tabakasına ulaşılan derinlik çok fazla olduğu koşullarda sismik temel derinliği bilgisinin V_s hız değerine bağlı olarak elde edilebileceğine dair örnek bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ekmen ve Avcı [26] Kahramanmaraş depremlerinin sismik kayıtlarını kullanarak farklı zemin sınıfları deprem etkilerini yapay zeka uygulamaları ile ortaya koymaya çalışmışlardır. Işık vd. [27] yerel zemin koşullarından kaynaklı hasarları ve bu koşullarının yapı performansına etkisini detaylı olarak incelemişlerdir. Algin vd. [28] kapsamlı olarak elde edilen zemin verilerini kullanarak yüksek katlı betonarme bir yapının sismik performansını değerlendirmişlerdir. Trifunac [29] yerel zemin koşulları ve deprem yer hareketi ile birçok çalışmayı derleyerek, yerel zemin koşullarının etkilerini ortaya koymaya çalışmıştır. Bu çalışmaların yanı sıra, deprem karakteristiklerinin, farklı türde zemin ve temellerin etkilerini inceleyen ve bunların farklı taşıyıcı sistemlerin deprem performansına etkisi üzerine çalışmalar da literatürde kendine yer bulmuştur [30]-[43].

Bu çalışmalara ek olarak, yapılarda hedef yer değiştirmelerin yapı performansları üzerindeki etkilerinin incelendiği

çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Uçar vd. [44] betonarme çerçeve tür yapılarda hedef yer değiştirme değerlerini, PSV (pseudo spectral velocity) spektrumu ve enerji dengesi etkileşimini dikkate alarak belirlemişlerdir. Monavari vd. [45] betonarme yapılar için elde ettikleri hedef yer değiştirme değerlerini FEMA-356'da verilen sınır değerler ile karşılaştırmışlardır. Fardis ve Panagiotakos [46] betonarme yapılarda deplasmaya dayalı tasarım için önerilen ve yapılan uygulamaları değerlendirmişlerdir. Işık vd. [47] farklı ülkeler için deprem verilerini kullanarak orta yükseklikteki betonarme binalar için hedef yer değiştirme değerlerini elde etmişlerdir. Işık vd. [48] Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan yirmi farklı yerleşim birimi için öngörülen ve ölçülen ivme değerlerini kullanarak, betonarme yapı modeli için hedef yer değiştirme değerlerini karşılaştırmışlardır.

Bu çalışma kapsamında, yerel zemin kaynaklı hasarlar ve çok katlı betonarme binalarda meydana gelen hasarlar 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş depremleri ışığında değerlendirilmiştir. 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ($M_w=7.7$ ve $M_w=7.6$), betonarme yapıların performans düzeylerinin yeterli düzeyde olmadığını gözler önüne sermiştir. Bu depremlerin ardından yapılan çalışmalar, yapılarda bulunan düzensizlik ve olumsuzlukların hasarların ana nedeni olduğunu göstermektedir. Gözleme dayalı olarak yapılan hasar değerlendirmeleri ile sayısal analizler uygulanarak yapılan çalışmalar bu durumu açıkça ortaya koymaktadır. Akar vd. [49] Adıyaman iline bağlı Gölbaşı ilçesinde betonarme yapılarda meydana gelen hasarların yanı sıra zemin kaynaklı hasarları gözleme dayalı olarak değerlendirmişlerdir. İnce [50] ve Işık vd. [51] Adıyaman ilindeki betonarme yapı hasarlarını değerlendirirken, Avşın vd. [52] Kahramanmaraş ilindeki betonarme yapı hasarlarını değerlendirmişlerdir. Deprem bölgesinde özellikle betonarme yapı hasarlarının incelendiği çalışmaların büyük bir bölümü gözleme dayalı hasar değerlendirilmesini içermektedir. Bu çalışmaların bir kısmında, farklı parametreler dikkate alınarak sayısal analizler de gerçekleştirilmiştir [53]-[63].

Depremler sırasında, yapıların davranışı büyük ölçüde yerel zemin özellikleri ve deprem bölgesine bağlı olarak değişmektedir. Zemin koşulları, yapıların titreşim frekansını ve yer değiştirmelerini etkileyebilir. Çok katlı yapılar, deprem sırasında daha fazla dinamik kuvvetlere ve yer değiştirmelere maruz kalabilmektedir. Bu faktörler yapıların sismik davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada bu iki faktörün, yapıların deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılan hedef yer değiştirmeler üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla 12 katlı betonarme yapı modeli oluşturulmuştur. Bu model için öncelikle farklı yerel zemin grupları dikkate alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yerel zemin sınıfları olarak dünya genelinde daha yaygın bir şekilde kullanılan Eurocode-8'de verilen dört farklı zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Bir diğer değişken olarak, deprem bölgesi etkisini ortaya koymak için 0.1g, 0.2g, 0.3g ve 0.4g olmak üzere dört farklı en büyük yer ivmesi (PGA) seçilmiş; seçilen betonarme yapı modeli için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca çok katlı yapılarda oluşan hasarlar 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ışığında incelenmiştir. Bu depremlerden en çok etkilenen Hatay, Kahramanmaraş ve Adıyaman il merkezlerinde farklı aşılma olasılıkları için elde edilen PGA değerleri kullanılarak sayısal analizler

gerçekleştirilmiştir. Çalışma, yerel zemin sınıfı, deprem bölgesi ve deprem düzeyi olmak üzere üç farklı değişkenin, yapıların hedef yer değiştirmeleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel amacı, özellikle son 30 yılda yaygın olarak inşa edilmeye başlanan çok katlı betonarme yapılarda, yapısal olmayan parametrelerin etkilerinin ortaya konmasıdır.

06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Zemin Kaynaklı Hasarlar

Zayıf zeminler, daha fazla yer değiştirme ve sıvılaşma riski taşıyabilirken, sert zeminler daha az deformasyon gösterir ve dolayısı ile üzerindeki yapılar daha stabil olabilir. Deprem sırasında sıvılaşan zeminler, temelin taşıma kapasitesini ciddi şekilde düşürebilir. Özellikle suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerin deprem sırasında oluşan tekrarlı gerilmeler nedeniyle zeminin boşluk suyu basıncındaki aşırı artışına paralel olarak kayma mukavemetindeki ve rijitliğindeki ciddi düşüş, sıvılaşmaya neden olur. Bu durum, özellikle çok katlı yapıların stabilitesini tehlikeye atabilir. Zemin sıvılaşması, yapının temelinde yer değiştirmelere yol açarak, yapıların performansını doğrudan etkileyebilir. Sert zeminlerde yapılar genellikle daha rijit bir davranış sergilerken, yumuşak zeminlerde yapı, daha esnek hareketler gösterir. Adıyaman iline bağlı Gölbaşı ilçesinde zemin kaynaklı gözlemlenen hasar örnekleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Adıyaman ili Gölbaşı ilçesinde zemin kaynaklı hasar örnekleri

06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Çok Katlı Yapılarda Oluşan Hasarlar

2023 Kahramanmaraş depremleri, Türkiye'nin güneydoğusunda büyük yıkıma yol açan, özellikle Kahramanmaraş, Gaziantep, Adıyaman, Hatay, Osmaniye, Adana, Malatya ve Diyarbakır illerinde ciddi etkiler bırakan, dokuz saat arayla aynı günde $M_w=7.7$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğünde iki ana depremle gerçekleşmiştir. Bu depremlerin özellikle çok katlı betonarme yapılarda büyük hasarlara yol açmasıyla inşaat sektörü ve afet yönetimi açısından önemli dersler çıkarılmıştır. Herhangi bir yapısal hasar almayan çok katlı betonarme yapı örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Çok katlı yapılarda oluşan büyük deprem kuvvetlerini karşılamak üzere kullanılan betonarme perdeler bu tür yapılardaki hasar seviyelerini büyük ölçüde sınırlandırmıştır.



Şekil 2. Hasarsız çok katlı bina örnekleri

Taşıyıcı elemanlarında herhangi bir hasar gözlemlenmeyen ancak yapısal olmayan elemanlarda hafif düzeyde hasar almış çok katlı betonarme yapı örnekleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Hafif hasarlı çok katlı betonarme yapı örnekleri

Aynı gün içerisinde birbirine yakın lokasyonlarda yaşanan iki büyük depremten dolayı binlerce yapı toptan göçmeye maruz kalmıştır. Çok katlı betonarme yapılarda da toptan göçmeler gerçekleşmiştir. Toptan göçmeye maruz kalmış çok katlı betonarme bir yapı örneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Toptan göçmeye maruz kalmış betonarme yapının deprem öncesi ve sonrası durumu

Betonarme yapılarda, kolon yüksekliklerinin yapı içerisinde değişiminden dolayı oluşan kısa kolon düzensizliği çok katlı betonarme yapılarda da etkisini göstermiştir. Bunun yanı sıra betonarme yapılarda katlar arası rijitlik/dayanım değişiminin göreceli olarak sebep olduğu yumuşak/zayıf kat düzensizliği de çok katlı betonarme yapılarda hasarlara neden olmuştur. Kısa kolon ve yumuşak/zayıf kat düzensizliği kaynaklı gözlemlenen hasar örnekleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Kısa kolon ile yumuşak/zayıf kat hasar örnekleri

Betonarme çerçeveleri meydana getiren taşıyıcı elemanlarda yetersiz kenetlenme, yük altında taşıyıcı elemanların birlikte çalışmasına engel olmuştur. Bu durumda bu elemanlar arasındaki süreklilik ortadan kalkmış ve hasara neden olmuştur. Yetersiz betonarme çerçeve sonucu oluşan hasar örneği Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yetersiz betonarme çerçeve kenetlenmesi sonucu oluşan hasar örneği

Çok katlı betonarme yapılarda çerçeve dışına çıkılarak oluşturulan kapalı ağır çıkmalar da hasarların nedenlerinden biridir. Aynı zamanda yapıda bulunan pencere ve kapı boşlukları, deprem esnasında boşluk momentine maruz kalarak hafif çaplı hasarlara neden olabilmektedir. Bu iki nedene bağlı olarak oluşan hasar örnekleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Ağır çıkma ve pencere boşluklarından dolayı gözlemlenen hasar örneği

Betonarme yapıları meydana getiren iki ana yapı malzemesi olan beton ve donatının özellikleri hasarların ana nedenleri arasındadır. Yetersiz beton örtü kalınlığından (pas payı) dolayı donatılarda meydana gelen korozyon, betonda uygun olmayan agrega kullanımı, kötü donatı işçiliği, düşük dayanımlı beton, donatı-beton arası yetersiz kenetlenme,

düşük dayanımlı beton özellikle kolonlarda farklı düzeylerde yapısal hasarlara neden olmuştur (Şekil 8). Şekil 8’de ayrıca boyuna donatıda kopma örneği bulunmaktadır.



Şekil 8. Beton ve donatı kusurlarından dolayı oluşan farklı düzeylerdeki hasar örnekleri

Betonarme yapılarda mekânları ayırmak ve dış etkilere korumak amacı ile kullanılan dolgu duvarların düşük malzeme özellikleri ve kötü duvar işçiliğinden dolayı çok büyük hasarlara maruz kalmıştır. Bu tür duvarlarda eskiden olduğu gibi kaba sıvanın uygulanmaması, onun yerine doğrudan alçı sıva uygulanması bu tür taşıyıcı olmayan elemanlarda hasarları olumsuz olarak etkilemiştir. İç ve dış

dolgu duvarlarda gözlemlenen hasar örnekleri Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Betonarme yapılarda dolgu duvarlarda meydana gelen hasarlar

Özellikle 2000 yılı öncesi inşa edilen çok katlı binalarda derelerden elde edilen agregaların kullanıldığı betonlarda hasarların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Yapısal Analizler

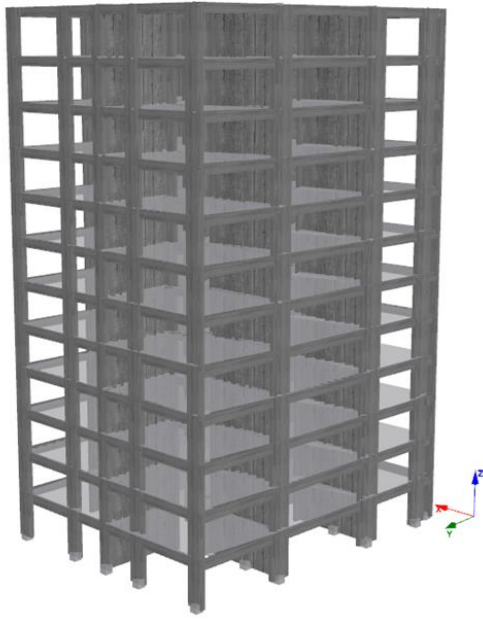
Çalışmanın bu kısmında, çok katlı betonarme yapıları temsil etmesi için örnek olarak seçilen betonarme yapı için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı zemin sınıfları ve farklı deprem bölgelerinin etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılan analizlerde, statik itme analizi kullanılmıştır. Her bir yapısal model, Seismostruct [64] yazılımı kullanılarak modellenmiş ve bu programda analizlere tabi tutulmuştur. Zemin sınıflarının etkisini ortaya koymak amacıyla, dünyada daha yaygın olarak kullanılan Eurocode-8’de verilen dört farklı zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Bu zemin sınıflarına ait karakteristik özellikler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Zemin sınıfları ve özellikleri (Eurocode-8) [65]

Zemin Sınıfı	Stratigrafik profilin tanımı	V_{s30} (m/s)	N_{SP} (blows/30cm)	C_u (kPa)
A	Yüzeyde en fazla 5 m’lik zayıf malzeme içeren kaya veya diğer kaya benzeri jeolojik formasyonlar	>800	---	---
B	En az birkaç on metre kalınlığında, mekanik özelliklerin derinlikle birlikte kademeli olarak arttığı, çok yoğun kum, çakıl veya çok sert kil sedimanları	360-800	>50	>250
C	Kalınlığı birkaç on metreden birkaç yüz metreye kadar değişen yoğun veya orta yoğunlukta kum, çakıl veya sert kilden oluşan derin sedimanter birimler	180-360	15-50	70-250
D	Gevşek ila orta kohezyonlu az toprak (bazı yumuşak kohezyonlu tabakalarla veya tabakalar olmaksızın) veya baskın olarak yumuşak ila sıkı kohezyonlu toprak sedimanları.	<180	<15	<70

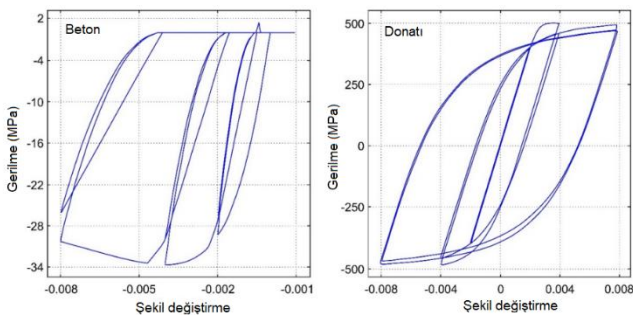
Betonarme çerçevenin yanı sıra betonarme perdeler içeren yapıda her bir kat 3m olup toplam yapı yüksekliği 36m’dir. Herhangi bir düzensizlik içermeyen yapı modelinde, malzeme C35-B420C olarak seçilmiştir. Bina, X doğrultusunda 21.50m iken Y doğrultusunda 26.60m uzunluğunda olup, toplam kat alanı 571.90 m²’dir. Yapısal analizlerde değişken olarak zemin sınıfı ve en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri değişken olarak seçilmiştir.

Modellemesi yapılan binaya ait 3 boyutlu model Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Örnek yapı için oluşturulan 3 boyutlu yapısal model

Tüm yapısal modellerde kolonlar ve kirişler için kuvvete dayalı plastik mafsallı çerçeve elemanları (infrmFBPH) dikkate alınmıştır. Bu elemanlar, yayılı inelastisiteyi kuvvete dayalı formülasyonla modeller, yalnız plastisiteyi sonlu bir uzunlukla sınırlandırmaktadır. Kesit içindeki gerilme-şekil değiştirme dağılımını doğru bir şekilde temsil etmek için yeterli sayıda fiber eleman kullanılmalıdır. Seçilen kesitler için toplam 150 fiber eleman tanımlanmıştır. Seçilen plastik mafsallı uzunluğu (L_p/L), %16.67 olarak dikkate alınmıştır. Taşıyıcı elemanlarda malzeme modelleri seçimi yapılırken donatı için Menegotto-Pinto (stl_mp) malzeme modeli dikkate alınırken, beton için ise Mander vd. (con_ma) malzeme modeli analizlerde kullanılmıştır. Kullanılan bu malzeme modelleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 11'de gösterilmiştir.



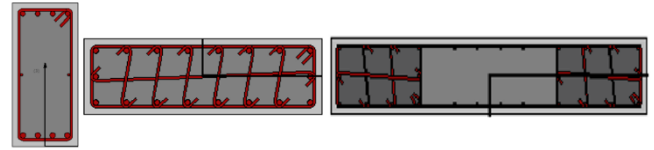
Şekil 11. Beton ve donatı için kullanılan malzeme modelleri

Bu çalışma kapsamında oluşturulan betonarme yapı modeli için dikkate alınan taşıyıcı eleman boyutları ve diğer yapısal parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Betonarme yapı modeli için dikkate alınan parametreler

Parametre	Değer
Kirişler	300 x 600 mm
Döşeme kalınlığı (mm)	140 mm
Kat yüksekliği (m)	3 m
Beton pas payı (mm)	25 mm
Kolonlar	300x950mm; 300x700mm
Betonarme perdeler	300x1900mm
Sönüm oranı	5%
Yapı önem derecesi	II
Hedef yer değiştirme	0.34m

Çalışmada dikkate alınan örnek betonarme yapıda kullanılan kiriş, kolon ve betonarme perde için örnek en kesitler Şekil 12'de gösterilmiştir.



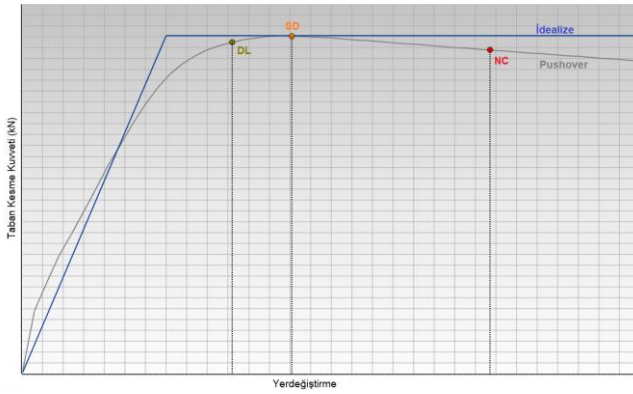
Şekil 12. Taşıyıcı elemanlara ait örnek en kesitler

Çalışmada dikkate alınan her yapı modeli için ayrıca statik itme analizi yapılmıştır. Bu tür bir analiz, yapıların deprem etkisinde nasıl davranacağını hesaplamak için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Statik itme analizi, yapıların deprem gibi dinamik yükler altında nasıl davranacağını anlamak amacıyla yapılan, nonlineer statik bir analiz yöntemidir. Analiz yardımı ile taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelebilecek hasar seviyeleri belirlenebilir. Statik itme analizi, "tepe yer değiştirmesi – taban kesme kuvveti" koordinatları ile itme eğrisinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu eğri, yapının başlangıç durumundan kararsız hale gelene kadar artan yük etkisi altında taban kesme kuvvetlerine karşılık gelen çatı deplasman değerlerini gösteren bir etkileşim diyagramıdır. Statik itme analizinin temel amacı, yapının hangi katlarında ve hangi elemanlarında hasar oluşacağını, yapının ne zaman çökmeye başlayacağını veya kapasitesinin tükeneceğini tahmin etmektir [66]-[70]. Çalışma kapsamında dikkate alınan her bir yapısal model için yapılan statik itme analizlerinde hedef yer değiştirmeler elde edilmiştir. Performansa dayalı deprem mühendisliğinde, yapı elemanlarının belirli performans sınırlarına ulaştığında hasar tahmini için hedef yer değiştirmelerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır [71], [72]. Dünya çapında çok daha yaygın olarak kullanılan Eurocode-8'de (Bölüm 3) hedef yer değiştirmeler sınır durumlar dikkate alınarak elde edilmektedir [65], [73], [74]. Çalışmada dikkate alınan sınır durum değerlerinin detaylı açıklamaları Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Sınır durumlar (Eurocode 8-Part 3) [65], [74]

Sınır Durumu	Tanımlama	Dönüş Periyodu (Yıl)	Aşılma Olasılığı (50 Yılda)
Sınırlı Hasar Durumu (DL)	Sadece hafif hasar, yapısal olmayan bileşenlerdeki hasar ekonomik olarak onarılabilir	225	0.20
Önemli Hasar Sınır Durumu (SD)	Taşıyıcı ve yapısal olmayan bileşenler önemli ölçüde hasar görmüş, onarımı ekonomik değil	475	0.10
Göçmenin Önlenmesi (NC)	Ağır hasarlı, düşük dayanım ve rijitlik, büyük yer değiştirmelere rağmen göçmenin gerçekleşmemesi	2475	0.02

Eurocode-8'e göre dikkate alınan bu sınır durumlar, idealize edilmiş ve statik itme eğrileri Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Tipik itme ve idealize edilmiş kapasite eğrileri

Bu çalışma kapsamında öncelikle iki farklı değişken dikkate alınarak 7 farklı model için yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem bölgesi ve yerel zemin sınıfının değişken olarak seçildiği sayısal analizlerde dikkate alınan yapısal modellerdeki değişkenler Tablo 4'te verilmiştir. Tüm yapısal modellerde sönüm oranı %5 olarak seçilmiştir. Deprem bölge değişiminin incelenmesi yapılırken, Türkiye'de 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem yönetmeliğinde belirtilen dört farklı deprem bölgesi dikkate alınmıştır.

Tablo 4. Oluşturulan yapısal modellerdeki değişkenler

Model	PGA (g)	Yerel Zemin Sınıfı
Model I	0.100	ZA
Model II	0.200	ZA
Model III	0.300	ZA
Model IV	0.400	ZA
Model V	0.400	ZB
Model VI	0.400	ZC
Model VII	0.400	ZD

Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreceli kat ötelemesinin (Δ_{imax}), o katta aynı doğrultudaki ortalama göreceli ötelemeye oranını (Δ_{iort}) ifade eden burulma düzensizliği katsayısı her bir katta 1.2'den daha küçük olarak elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda ilk 10 mod için elde edilen kütleles katılım oranlarının toplamı, yapının toplam kütlelerinin %80' inden fazlasını kapsamaktadır.

Oluşturulan toplam yedi farklı yapısal model için yapılan analizler sonucunda yapının periyodu, taban kesme, etkin ve

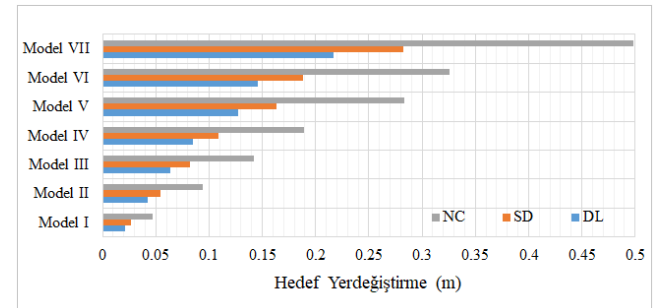
efektif rijitlik değerlerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Zemin sınıfı ve PGA değişimlerinin periyodu etkilemediği, tüm modeller için yapı periyodu 0.497s, taban kesme kuvveti 33755.26kN, etkin rijitlik 1009678.70kN/m ve efektif rijitlik değeri ise 300407.61 kN/m olarak elde edilmiştir.

Seçilen bu iki değişken özellikle yapıların sismik performanslarının belirlenmesinde kullanılan hedef yer değiştirmeleri büyük ölçüde etkilemiştir. Dikkate alınan bu yedi farklı yapısal model için elde edilen hedef yer değiştirmelerin karşılaştırılması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Farklı yapısal modeller için elde edilen hedef yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Model	Hedef yer değiştirmeler (m)		
	DL	SD	NC
Model I	0.021	0.027	0.047
Model II	0.042	0.054	0.094
Model III	0.064	0.082	0.142
Model IV	0.085	0.109	0.189
Model V	0.127	0.163	0.283
Model VI	0.146	0.188	0.326
Model VII	0.217	0.282	0.498

Deprem tehlikesinin artması ile birlikte yapıdan beklenen hedef yer değiştirmeler artmıştır. Benzer şekilde, yerel zemin koşullarının zayıflaması ile birlikte de hedef yer değiştirmelerde artış meydana gelmiştir. Bu da yapılarda daha büyük depremlerde zayıf zemin koşullarının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçların grafik üzerinde gösterimi Şekil 14'te yapılmıştır.



Şekil 14. Hedef yer değiştirmelerin karşılaştırılması

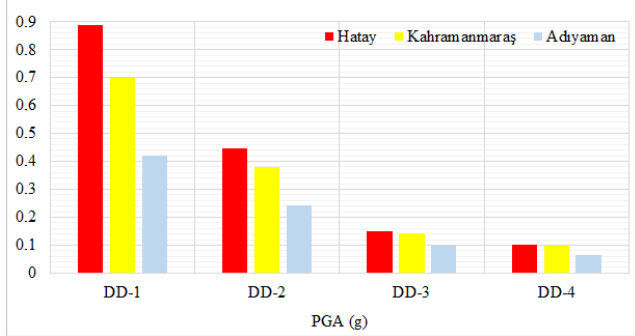
Bu çalışma kapsamında ayrıca, yapısal modellerin yanı sıra 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden en fazla etkilenen Hatay, Kahramanmaraş ve Adıyaman il merkezlerinde seçilen herhangi bir konum için yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Dört farklı aşılma olasılığı dikkate alınarak bu üç il için yapılan analizlerde yerel zemin sınıfı, ortalama yerel zemin sınıfı olan ZC seçimi ile gerçekleştirilmiştir. Bu üç il için farklı aşılma olasılıkları için İnteraktif Web Deprem Uygulaması üzerinden elde edilen PGA değerleri ve model isimleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Kahramanmaraş depremlerinin en çok etkilediği üç il için farklı aşılma olasılıkları için elde edilen PGA değerleri

İl	PGA (g)			
	DD-1	DD-2	DD-3	DD-4

Hatay	0.890	0.446	0.148	0.100
Kahramanmaraş	0.699	0.380	0.142	0.097
Adıyaman	0.419	0.241	0.098	0.065

Çalışmada dikkate alınan bu üç il için farklı aşılma olasılıkları için PGA değerlerinin karşılaştırılması Şekil 15'te yapılmıştır.



Şekil 15. Farklı aşılma olasılıkları PGA değerlerinin karşılaştırılması

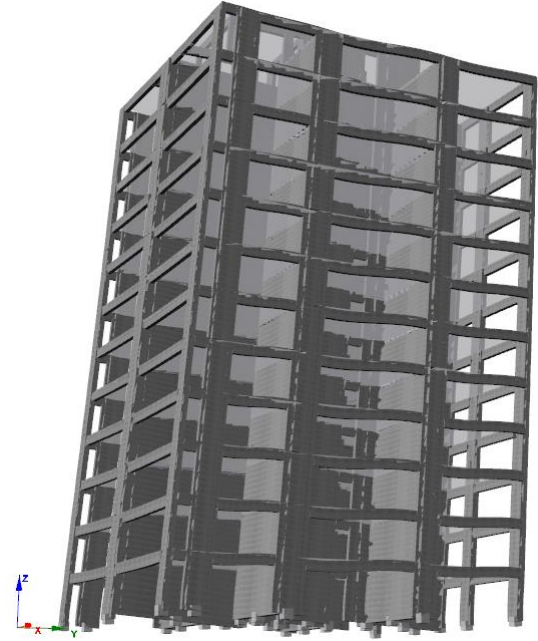
En büyük PGA değerleri Hatay ili için elde edilirken, en düşük değerler Adıyaman için elde edilmiştir. Farklı aşılma olasılıkları dikkate alınarak üç il için gerçekleştirilen yapısal analizler sonucu elde edilen hedef yer değiştirmelerin karşılaştırılması Tablo 7'de yapılmıştır.

Tablo 7. Farklı aşılma olasılıkları için elde edilen hedef yer değiştirmelerin karşılaştırılması

İl		Hedef Yerdeğiştirmeler (m)		
		DL	SD	NC
Hatay	DD-1	0.326	0.418	0.724
	DD-2	0.163	0.209	0.363
	DD-3	0.054	0.070	0.204
	DD-4	0.037	0.047	0.081
Kahramanmaraş	DD-1	0.256	0.328	0.569
	DD-2	0.139	0.178	0.309
	DD-3	0.052	0.067	0.116
	DD-4	0.035	0.046	0.079
Adıyaman	DD-1	0.153	0.197	0.341
	DD-2	0.088	0.113	0.196
	DD-3	0.036	0.046	0.080
	DD-4	0.023	0.031	0.053

En büyük hedef yer değiştirme değerleri, deprem tehlikesinin en büyük olduğu Hatay ili için elde edilirken, en düşük hedef yer değiştirmeler ise en düşük deprem tehlikesine sahip Adıyaman için elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında örnek olarak seçilen betonarme bina için gerçekleştirilen statik itme analizinden elde edilen sonuç deformasyon durumu, 3 boyutlu model üzerinden örnek olarak Şekil 16'da gösterilmiştir. Bu deformasyon durum örneği, yerel zemin sınıfının ZA ve PGA değerinin 0.3g olması için oluşturulan yapısal modelden elde edilmiştir.



Şekil 16. Örnek olarak seçilen betonarme yapının deformasyon durumu

Sonuçlar ve Tartışma

Zemin ve yapı etkileşimi, yapının deprem anındaki davranışını etkileyen kritik bir parametredir. Bu makalede, betonarme yüksek yapıların farklı yerel zemin koşulları ve farklı deprem bölgeleri üzerindeki etkileri incelenmiş, çeşitli analizler ve örnekler ile bu etkilerin yapı güvenliği üzerine olan sonuçları tartışılmıştır. Çalışmada üç farklı değişken düşünülmüştür. İlk parametre yerel zemin sınıfı, ikinci parametre deprem bölgesi ve üçüncü parametre olarak da farklı deprem yer hareket düzeyleri dikkate alınmıştır. Zemin sınıfı değişkeni için dünyada daha yaygın olarak kullanılan Eurocode-8'de verilen dört farklı zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Deprem bölgesi için de 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem yönetmeliğinde yer alan dört farklı deprem bölgesi dikkate alınmıştır. Farklı aşılma olasılıkları için ise üç farklı il için dört farklı yer hareket düzeyi seçilerek, yerel zemin koşullarının etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.

Bu çalışma, çok katlı betonarme yapılar için yerel zemin sınıfı, deprem bölgesi ve deprem düzeyi etkilerini bir arada değerlendirerek, yapıların hedef yer değiştirmeleri üzerindeki birleşik etkilerini sayısal olarak ortaya koymaktadır. Depremlerde en fazla yapısal hasarın olduğu üç farklı ilin farklı deprem aşılma olasılıkları ve farklı yerel zemin koşullarının hedef yer değiştirmelere etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bunun yanı sıra, ülkemizde son 30 yılda yaygınlaşan çok katlı betonarme yapı stokunun yapısal olmayan parametreler ışığında performansını incelemesi ise çalışmanın yenilikçi yönünü oluşturmaktadır. Özellikle 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında oluşan hasarların ışığında, hedef yer değiştirme analizlerinin gerçekleştirilmiş olması, çalışmayı hem güncel hem de uygulamaya yönelik hale getirmektedir. Farklı iller bazında yapılan karşılaştırmalar sayesinde, yerel zemin koşullarının ve maksimum yer ivmesinin yapısal taleplere etkisi detaylı

biçimde ortaya konulmuştur. Bu bütüncül yaklaşım, hem mevcut yapı stokunun performans temelli değerlendirilmesinde hem de yeni yapıların tasarımında dikkate alınması gereken önemli parametreleri ortaya koyarak çalışma alanına özgün bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Yerel zemin koşullarının zayıflaması, özellikle yumuşak ve gevşek zemin sınıflarına geçilmesi durumunda, deprem sırasında yapıya iletilen yer hareketlerinin genliği ve süresinde belirgin artışlara olabilmektedir. Bu durum, PGA değerlerinde artışa yol açarak yapıların maruz kaldığı sismik talepleri önemli ölçüde yükseltmektedir. Artan yer ivmesi ve uzayan titreşim süreleri, yapıların deplasman taleplerini artırmakta ve dolayısıyla hedef yer değiştirme değerleri daha büyük seviyelere ulaşmaktadır. Bu etki, özellikle doğrusal olmayan davranışın baskın olduğu statik itme analizi ve zaman tanım alanında yapılan analizlerde daha belirgin hale gelmekte; yapı performans düzeylerinin değerlendirilmesinde daha hassas parametrik analizlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, zemin özelliklerindeki değişimlerin doğru şekilde modellenmesi, hedef yer değiştirme değerlerinin gerçekçi bir biçimde tahmin edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yerel zemin koşullarının zayıflaması ve PGA değerinin artması ile birlikte yapıların deprem performansları için öngörülen hedef yer değiştirmeler daha büyük değerler almaktadır. Bu nedenle hem yerel zemin sınıfı hem de PGA, hedef yer değiştirme değerlerinin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu

bağlamda en büyük PGA değeri elde edilen Hatay ili için en büyük hedef yer değiştirmeler elde edilirken, en düşük PGA değerine sahip Adıyaman için en düşük hedef yer değiştirmeler elde edilmiştir.

Diğer yapısal analiz yöntemlerin de olduğu gibi çalışmada kullanılan statik itme analizinin de birtakım kısıtlamaları bulunmaktadır. Öncelikle, analizde yapıya uygulanan yatay yüklerin dağılımı sabit kabul edilmekte ve bu durum, özellikle mod şekli değişkenlik gösteren sistemler için gerçekçi sonuçlar vermeyebilir. Ayrıca, statik itme analizinde çoğunlukla tek mod etkisi göz önünde bulundurulduğundan, çok modlu davranışın baskın olduğu sistemlerde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenlerle, statik itme analizi özellikle karmaşık geometrilere, düzensizliklere veya kuvvetli ikinci mertebe etkilerine sahip betonarme yapılar için dikkatle değerlendirilmelidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Tüm yazarlar eşit oranda katkıda bulunmuşlardır.

Kaynaklar

- [1] R. Borchardt, G. Glassmoyer, M. Andrews, and E. Cranswick, "Effect of Site Conditions on Ground Motion and Damage," *Earthquake Spectra*, vol.5, no.1_suppl, pp.23-42, 1989.
- [2] S. L. Kramer and C. H. Wang, "Empirical model for estimation of the residual strength of liquefied soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.141, no.9, pp.04015038, 2015.
- [3] M. D. Trifunac, "How to model amplification of strong earthquake motions by local soil and geologic site conditions," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol.19, no.6, pp.833-846, 1990.
- [4] B. Siyahi, K. Ö. Çetin, and H. T. Bilge, "Geoteknik deprem mühendisliği açısından zemin-temel-yapı etkileşimine kritik bakış," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, no.484, pp.41-50, 2013.
- [5] İ. B. Karaşin and E. Işık, "Farklı yapı davranış katsayıları için zemin koşullarının yapı performansına etkisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol.8, no.4, pp.661-673, 2017.
- [6] R. İyisan and M. E. Haşal, "Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi," *İTÜDERGİSİ/d*, vol.10, no.4, pp.47-56, 2012.
- [7] E. Yalçinkaya, "Bytnet (Bursa-Yalova-Türkiye ivme ölçer ağı) istasyonlarında yerel zemin etkilerinin incelenmesi," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol.7, no.2, pp.75-85, 2005.
- [8] F. Ü. Peker and E. Işık, "TBDY-2018'deki yerel zemin koşullarının çelik yapı deprem davranışına etkisi üzerine bir çalışma," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.10, no.3, pp.1125-1139, 2021.
- [9] F. Avcil, E. Işık, and A. Büyüksaraç, "The effect of local soil conditions on structure target displacements in different seismic zones," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.12, no.4, pp.1000-1011, 2022.
- [10] A. Dorum, Ö. Özkan, and M. Erdal, "Farklı deprem bölgeleri ve farklı zemin sınıflarının kaba yapı maliyetine etkisi," *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, vol.5, no.1, pp.1-9, 2006.
- [11] K. Galal and M. Naimi, "Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near-fault earthquakes," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol.17, no.3, pp.541-562, 2008.
- [12] R. Tabatabaiefar, B. Fatahi, and B. Samali, "Seismic behavior of building frames considering dynamic soil-structure interaction," *International Journal of Geomechanics*, vol.13, no.4, pp.409-420, 2013.
- [13] B. Yön, M. E. Öncü, and Y. Calayır, "Effects of seismic zones and local soil conditions on response of RC buildings," *Građevinar*, vol.67, no.6, pp.585-596, 2015.

- [14] B. Yön and Y. Calayır, "The soil effect on the seismic behaviour of reinforced concrete buildings," *Earthquakes and Structures*, vol.8, no. 1, pp.133–152, 2015.
- [15] S. T. Karapetrou, S. D. Fotopoulou, and K. D. Pitilakis, "Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil–structure interaction effects," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.73, pp.42–57, 2015.
- [16] B. Yeşil and A. Ateş, "Düzce ilindeki farklı zemin sınıfları dikkate alınarak zemin sınıfının yapı hasarı ve deprem performansına etkisi," *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, vol.7, no.3, pp.48–56, 2018.
- [17] E. Özşahin and İ. Eroğlu, "Erzincan kentinde yerel zemin özelliklerinin deprem duyarlılığına etkisi," *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, vol.5, no.1, pp.41–57, 2019.
- [18] M. H. Akyıldız, A. E. Ulu, and K. Adar, "TBDY-2018'deki yerel zemin koşullarının deprem kesit tesirlerine etkisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol.12, no.4, pp.679–687, 2021.
- [19] Z. Aykaç, M. Akın, and A. F. Çabalar, " $V_s(30)$ tabanlı yerel zemin koşulları ve deprem hasar ilişkisi: Van-Abdurrahmangazi örneği," *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, vol.45, no.2, pp.181–198, 2021.
- [20] D. Pitilakis and C. Petridis, "Fragility curves for existing reinforced concrete buildings, including soil–structure interaction and site amplification effects," *Engineering Structures*, vol.269, p.114733, 2022.
- [21] M. Özgür and K.B. Bozdoğan, "Betonarme binalarda zemin-yapı etkileşiminin sismik tasarım parametrelerine etkileri," *El-Cezeri*, vol.9, no.2, pp.507–521, 2022.
- [22] M. V. Requena-Garcia-Cruz, R. Bento, P. Durand-Neyra, and A. Morales-Esteban, "Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon," *Structures*, vol.38, pp.599–617, 2022.
- [23] A. Fiamingo, M. Bosco, and M. R. Massimino, "The role of soil in structure response of a building damaged by the 26 December 2018 earthquake in Italy," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol.15, no.4, pp.937–953, 2023.
- [24] İ. Eroğlu and C. İpek, "Deprem Yükleri Altında Yapı ve Zemin Etkileşimi," *International Journal of New Horizons in the Sciences*, pp.18–27, 2023.
- [25] A. Büyüksaraç, B. Ateş, Ö. Bektaş, E. Pamuk, and E. Işık, "Bedrock investigation based on shear wave velocity (V_s) on the sites of high-rise buildings," *OTO-2024*, 2025.
- [26] A.B. Ekmen, and Y. Avcı, "Development of novel artificial intelligence functions based on 3D finite element method using February 6 Kahramanmaraş Seismic Records for earthquake effects prediction in various soils," *Engineering Geology*, vol.336, pp.107570, 2024.
- [27] E. Işık, F. Avcil, A. Büyüksaraç, E. Arkan, and E. Harirchian, "Impact of local soil conditions on the seismic performance of reinforced concrete structures: in the context of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes," *Applied Sciences*, vol.15, no.5, pp.2389, 2025.
- [28] H. M. Algin, A. B. Ekmen, and E. Kaya, "3D seismic response assessment of barrette piled high-rise building with comprehensive subsurface modelling," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 163, pp.107488, 2022.
- [29] M.D. Trifunac, "Site conditions and earthquake ground motion—A review," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.90, pp.88–100, 2016.
- [30] Y. Avcı and A. B. Ekmen, "Artificial intelligence assisted optimization of rammed aggregate pier supported raft foundation systems based on parametric three-dimensional finite element analysis," *Structures*, vol. 56, pp.105031, 2023.
- [31] K.Ö. Cetin, S. Altun, A. Askan, M. Akgün, A. Sezer, C. Kincal, C., ... and Karaali, E. (2022). The site effects in Izmir Bay of October 30 2020, M7. 0 Samos earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.152, pp.107051, 2022.
- [32] E. Bol, A. Özocak, S. Sert, K.Ö. Çetin, E. Arslan, K. Kocaman, and B.U. Ayhan, "Evaluation of soil liquefaction in the city of Hatay triggered after the February 6, 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence," *Engineering Geology*, vol.339, pp.107648, 2024.
- [33] O. Sivrikaya, E. Türker, E. Cüre, E.E. Atmaca, Z. Angin, H.B. Başağa, and A.C. Altunışık, "Impact of soil conditions and seismic codes on collapsed structures during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes: An in-depth study of 400 reinforced concrete buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.190, pp.109119, 2025.
- [34] M. Senkaya, E.F. Erkan, A. Silahtar, and H. Karaaslan, "Implementation of clustering algorithms for damage prediction through seismic local-site parameters: 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol.22, no.13, pp.6545–6566, 2024.
- [35] B. Đ. Bulajić, G. Pavić, and M. Hadzima-Nyarko, "PGA vertical estimates for deep soils and deep geological sediments—A case study of Osijek (Croatia)," *Computers & Geosciences*, vol.158, pp.104985, 2022.
- [36] S. Lozančić, B. Đ. Bulajić, G. Pavić, I. Bulajić, and M. Hadzima-Nyarko, "Spectral characteristics of strong ground motion time series for low to medium seismicity regions with deep soil atop deep geological sediments," *Engineering Proceedings*, vol.68, no.1, pp.32, 2024.
- [37] Ö.F. Nemutlu, and B. Balun, "Evaluation of November 23, 2022, Duzce earthquake data with ground motion prediction equations," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.12, no.4, pp.1248–1260, 2023.
- [38] Ö. Yıldız, and C. Kına, "Geotechnical and structural investigations in Malatya province after Kahramanmaraş Earthquake on February 6, 2023," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 686–703, 2023.
- [39] M. Çavuşlu, "Assessing seismic crack performance of Diyarbakır Çüngüş Masonry stone bridge

- considering 2023 Kahramanmaraş, Hatay, Malatya, Gaziantep earthquakes," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.12, no.2, pp.544-556, 2023.
- [40] O. Akyürek, "Analysis of different cross-frame placements to enhance torsional irregular buildings against structural failure under earthquake bidirectional loadings: A case study," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.10, no.2, pp.480-491, 2021.
- [41] K. Beyen, and M. Erdik, "Two-dimensional nonlinear site response analysis of Adapazarı plain and predictions inferred from aftershocks of the Kocaeli earthquake of 17 August 1999," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.24, no.3, pp.261-279, 2004.
- [42] M. Batı, and K. Beyen, "8 katlı yapının dinamik yükler altında titreşim kontrolü," *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol.3, no.1, pp.65-76, 2020.
- [43] G. Eren, and K. Beyen, "Zemin davranışı ve mesnet koşullarının tarihi yapıların dinamik davranışına etkisi," *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, vol.6, pp.244-252, 2018.
- [44] T. Ucar, O. Merter, and M. Duzgun, "A study on determination of target displacement of RC frames using PSV spectrum and energy-balance concept," *Structural Engineering and Mechanics*, vol.41, no.6, pp.759-773, 2012.
- [45] B. Monavari, A. Massumi, and A. Kazem, "Estimation of displacement demand in RC Frames and comparing with target displacement provided by FEMA-356," in *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012.
- [46] M. N. Fardis and T. B. Panagiotakos, "Displacement-based design of RC buildings: Proposed approach and application," in *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Routledge, pp.195-206, 2019.
- [47] E. Işık et al., "A comparative study of the effects of earthquakes in different countries on target displacement in mid-rise regular RC structures," *Applied Sciences*, vol.12, no.23, pp.12495, 2022.
- [48] E. Işık et al., "Comparison of seismic and structural parameters of settlements in the East Anatolian Fault Zone in light of the 6 February Kahramanmaraş Earthquakes," *Infrastructures*, vol.9, no.12, pp.219, 2024.
- [49] F. Akar et al., "Geotechnical and structural damages caused by the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Gölbaşı (Adıyaman)," *Applied Sciences*, vol.14, no.5, pp.2165, 2024.
- [50] O. İnce, "Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023," *Engineering Failure Analysis*, vol.156, pp.107799, 2024.
- [51] E. Işık et al., "Field reconnaissance and earthquake vulnerability of the RC buildings in Adıyaman during 2023 Türkiye earthquakes," *Applied Sciences*, vol.14, no.7, pp. 2860, 2024.
- [52] S. Avgın, M. M. Köse, and A. Özbek, "Damage assessment of structural and geotechnical damages in Kahramanmaraş during the February 6, 2023 earthquakes," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol.57, pp.101811, 2024.
- [53] M. Öztürk, M. H. Arslan, and H. H. Korkmaz, "Effect on RC buildings of 6 February 2023 Turkey earthquake doublets and new doctrines for seismic design," *Engineering Failure Analysis*, vol.153, pp.107521, 2023.
- [54] B. Binici et al., "Performance of RC buildings after Kahramanmaraş earthquakes: lessons toward performance-based design," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol.22, no. 4, pp. 883-894, 2023.
- [55] J. Yuzbasi, "Post-earthquake damage assessment: field observations and recent developments with recommendations from the Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye on February 6th, 2023 (Pazarcık M7.8 and Elbistan M7.6)," *Journal of Earthquake Engineering*, pp.1-26, 2024.
- [56] E. Işık et al., "Seismic performance and failure mechanisms of reinforced concrete structures subject to the earthquakes in Türkiye," *Sustainability*, vol.16, no.15, pp.6473, 2024.
- [57] M. Tan, Ö. Avşar, F. Yıldızhan, and N. Atmaca, "Effect of infill walls on the seismic performance of a severely damaged substandard RC building during the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake sequence," *Engineering Failure Analysis*, pp.109117, 2024.
- [58] C. Öser et al., "Geotechnical aspects and site investigations on Kahramanmaraş earthquakes, February 06, 2023," *Natural Hazards*, pp.1-32, 2024.
- [59] B. Yön et al., "Evaluation of the seismic response of reinforced concrete buildings in the light of lessons learned from the February 6, 2023, Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequences," *Natural Hazards*, pp.1-37, 2024.
- [60] H. Ulutaş, "Investigation of the causes of soft-storey and weak-storey formations in low-and mid-rise rc buildings in Türkiye," *Buildings*, vol.14, no.5, pp.1308, 2024.
- [61] I. B. Karasin, "Comparative analysis of the 2023 Pazarcık and Elbistan Earthquakes in Diyarbakır," *Buildings*, vol.13, no.10, p.2474, 2023.
- [62] E. Işık et al., "Study on effectiveness of regional risk prioritisation in reinforced concrete structures after earthquakes," *Applied Sciences*, vol.14, no.16, pp.6992, 2024.
- [63] M. H. Arslan et al., "Code-based damage assessment of existing precast industrial buildings following the February 6th, 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Pazarcık Mw 7.7 and Elbistan Mw 7.6)," *Journal of Building Engineering*, vol.86, p.108811, 2024.
- [64] Seismostruct, "Seismic Analysis Software for Structures," [Online]. Available: <https://www.seismosoft.com>.

- [65] Eurocode 3, "Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings," *European Standard EN 1993-1-1*, 2005.
- [66] S. Antoniou, R. Pinho . "Seismostruct – Seismic Analysis program by Seismosoft. Technical manual and user manual", 2003.
- [67] N. Ademovic, M. Hrasnica, D.V. Oliveira. "Pushover analysis and failure pattern of a typical masonry residential building in Bosnia and Herzegovina, " *Engineering Structures*, vol.50, pp.13- 29, 2013.
- [68] J.M. Estêvão, C.S. Oliveira, "A new analysis method for structural failure evaluation," *Engineering Failure Analysis*, vol.56, pp.573-584, 2015.
- [69] A.K. Chopra, R.K. Goel. "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol.31, no.3, pp.561-582, 2002.
- [70] H. Krawinkler, G.D.P.K. Seneviratna, "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation," *Engineering Structures*, vol.20, no.4-6, pp.452-464, 1998.
- [71] E. Işık et al., "Time-dependent model for earthquake occurrence and effects of design spectra on structural performance: a case study from the North Anatolian Fault Zone, Turkey," *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol.30, no.2, pp.215–234, 2021.
- [72] E. Işık and E. Harirchian, "A comparative probabilistic seismic hazard analysis for Eastern Turkey (Bitlis) based on updated hazard map and its effect on regular RC structures," *Buildings*, vol.12, no.10, pp. 1573, 2022.
- [73] A. Antoniou and R. Pinho, "Displacement-based seismic design of structures," *Journal of Earthquake Engineering*, vol.7, no.S1, pp.1–25, 2003.
- [74] P. Pinto and E. Franchin, "Performance-based seismic design: Concepts and implementation," in *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Routledge, pp.259–280, 2011.