Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

# MEVCUT YÜKSEK YAPI İÇİN 3-D YAPI–ZEMİN ETKİLEŞİMİ İLE PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİ

# PERFORMANCE ASSESSMENT OF AN EXISTING HIGH-RISE STRUCTURE CONSİDERİNG 3D SOIL–STRUCTURE INTERACTION

**Abdullah FİLİZ[1], Bahri ÖZDEMİR[2]**

## ÖZET

Özbekistan'da yakın zamanda yürürlüğe giren ShNK 2.01.06-25 "Sismik Bölgelerde Yüksek Katlı Binaların Tasarımı" yönetmeliği kapsamında, proje sahibinin talebi üzerine, Taşkent'te 2020 yılında inşa edilmiş mevcut 33 katlı (164 m) yüksek binanın temel-zemin sistemi geoteknik açıdan yeniden değerlendirilmiştir. Yapısal sistem, üstyapının global rijitliğini, yük dağılımını ve dinamik özelliklerini tanımlamak amacıyla önce LIRA-SAPR kullanılarak modellenmiştir. Model daha sonra, yapı–zemin etkileşimini içeren gelişmiş üç boyutlu sayısal analizin gerçekleştirilebilmesi için PLAXIS 3D ortamına aktarılmıştır. Kazıklı temel sistemi ve çevreleyen zemin tabakaları; oturma davranışını, yük aktarım mekanizmalarını, rijitlik etkileşimini ve tasarım düzeyindeki yer hareketleri altındaki sismik tepkiyi değerlendirmek üzere modellenmiştir. Sonuçlar, yapı–zemin etkileşiminin temel performansı ve deformasyon davranışı üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Üç boyutlu YZE analizi, geleneksel ankastre mesnet kabullerine kıyasla daha gerçekçi oturma tahminleri ve yük yeniden dağılım örüntüleri sağlamıştır. Yeniden değerlendirme, mevcut temel sisteminin yeterliliğini teyit ederken, Taşkent'e özgü yumuşak zemin depozitleri üzerine oturan yüksek katlı yapıların sismik performansının değerlendirilmesinde YZE etkilerinin önemini vurgulamaktadır.
***Anahtar Kelimeler:*** *Yapı–zemin etkileşimi, Sismik performans, Kazıklı temel, Üç boyutlu sayısal analiz, Sismik tasarım, PLAXIS 3D.*

## ABSTRACT

Recent enactment of the regulation ShNK 2.01.06-25 "Design of High-Rise Buildings in Seismic Regions" in Uzbekistan and at the request of the project owner, the geotechnical performance of the foundation system of an existing 33-story (164 m) high-rise building constructed in Tashkent in 2020 was re-evaluated to verify its compliance with updated seismic requirements. The structural system was first modeled using LIRA-SAPR to define the global stiffness, load distribution, and dynamic characteristics of the superstructure. The model was then transferred into the PLAXIS 3D environment to perform advanced three-dimensional numerical analyses incorporating soil–structure interaction (SSI). The piled foundation system and surrounding soil stratigraphy were modeled to evaluate settlement behavior, load transfer mechanisms, stiffness interaction, and seismic response under design-level ground motions.The results demonstrate that soil–structure interaction plays a critical role in foundation performance and deformation behavior. The 3D SSI analysis provided more realistic settlement predictions and load redistribution patterns compared to conventional fixed-base assumptions. While confirming the adequacy of the existing foundation system, the re-evaluation highlights the importance of SSI effects when assessing the seismic performance of high-rise structures resting on soft soil deposits typical of Tashkent.

**Keywords:** Soil–structure interaction, Seismic performance, Piled foundation, Three-dimensional numerical analysis, Seismic design, PLAXIS 3D.

[1] İnşaat Y. Mühendisi, Kıdemli Geoteknik Mühendisi, UzGASHKLITI–Mühendislik Araştırma Enstitüsü, Taşkent, Özbekistan, abdullahfiliz46@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] İnşaat Y. Mühendisi,, Ufuk Mühendislik & Müşavirlik, bahrio@gmail.com

# 1. GİRİŞ

Sismik etkinliğin yüksek olduğu bölgelerde yüksek katlı yapı sayısının artması, yapı–zemin etkileşiminin (YZE) temel performansı üzerindeki etkisinin daha ayrıntılı incelenmesini gerektirmektedir. Özbekistan, Orta Asya'nın en aktif sismik kuşaklarından birinde yer almakta ve KMK (2019)'a göre sismik şiddet MSK-64 ölçeğinde IX (9) değerine ulaşmaktadır. Yüksek tehlike bölgesinde bulunan Taşkent'te temel sistemlerinin statik ve sismik yükler altında birlikte değerlendirilmesi, her yüksek katlı proje için belirleyici bir aşamadır.

Son yıllarda özellikle ShNK (2025) ve ShNK (2024) olmak üzere ulusal yönetmeliklerde yapılan güncellemeler, performansa dayalı sismik tasarım koşullarını ve YZE etkilerinin dikkate alınmasını zorunlu kılmıştır. Özbekistan'ın 9 dereceli bölgesindeki yüksek katlı yapılara ilişkin önceki çalışmalar ağırlıklı olarak üstyapıyla, yani betonarme çerçeve–çekirdek tüp kulelerde sistem seçimi ve enerji sönümleme çözümleriyle Yan vd. (2024) ve Hua vd. (2023) ilgilenmiş; özellikle önceki hükümlere göre tamamlanmış yapılarda temelin geoteknik davranışı arka planda kalmıştır.Uygulamada temeller çoğu zaman ankastre mesnet olarak idealleştirilmekte ya da basit elastik yaylarla temsil edilmektedir. Bu kabuller, hem oturmaları hem de sismik uyarım altında kazıklara aktarılan iç kuvvetleri olduğundan küçük vermektedir. Rijitliğin gerilme düzeyine belirgin biçimde bağlı olduğu ve kısmi doygunluğun dinamik davranışı değiştirdiği Taşkent havzası lös çökellerinde bu sapma daha da büyümektedir.

Bu çalışmada geoteknik model için PLAXIS 3D, üstyapı için LIRA-SAPR kullanılmış ve aynı proje için tasarım aşamasında izlenen iki aşamalı yaklaşım UzGASHKLITI (2026) esas alınmıştır.

# 2. PROJE TANIMI

Çalışmaya konu olan yapı, Taşkent'in merkezî kentsel bölgesinde yer alan mevcut bir yüksek katlı ticari binadır. Yüksek sismik tehlike bölgesinde inşa edilmiş çağdaş bir betonarme kule olan yapı, daha önce sistem seçimi ve enerji sönümlemesi açısından yapısal tasarım çalışmalarına da konu olmuştur.



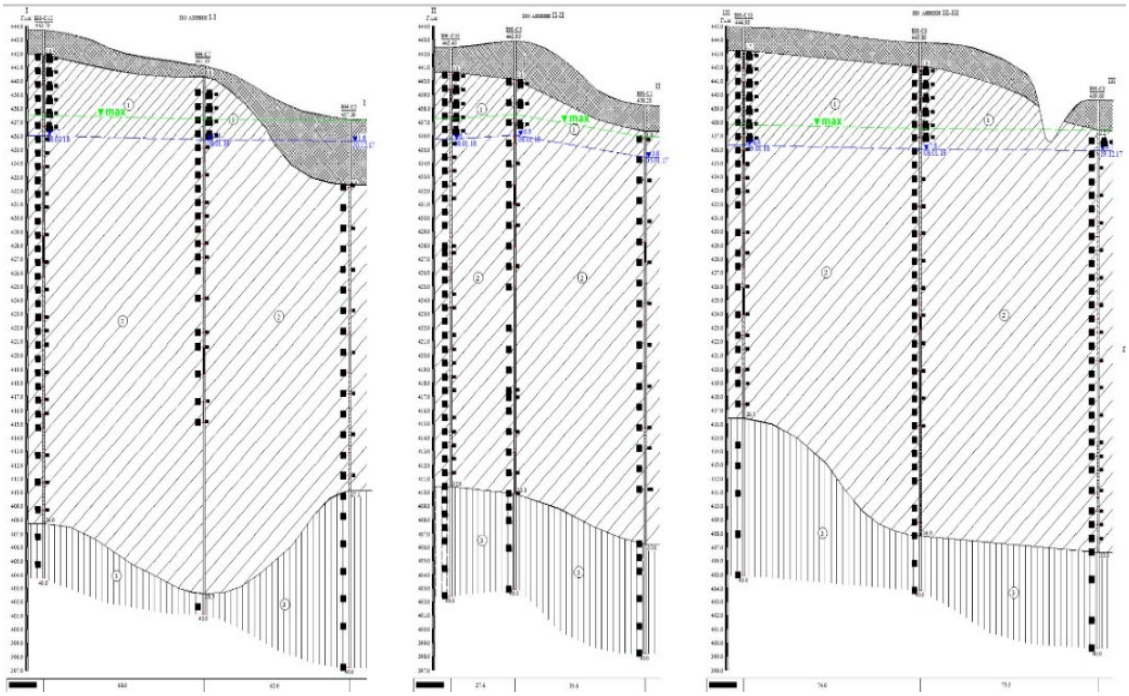
Şekil 1. Çalışmaya konu yüksek katlı yapının mimari görselleri (solda) ve gerçekleşen görünümü (sağda).

Yapı, 33 normal kat ve iki bodrum kattan oluşmakta olup, bina yüksekliği 147 m (yapı yüksekliği: 164 m), plan boyutları ise yaklaşık olarak 42 × 42 m'dir. Betonarme yapısal sistem, alt katlarda çelik profillerle güçlendirilmiş yerinde dökme betonarme çerçeve–çekirdek tüp sistemi olarak tasarlanmıştır. Temel sistemi olarak ise Ø100 cm çapında ve L = 48 m boyundaki fore kazıklarla desteklenen kazıklı radye temel düşünülmüştür.

İşlevi nedeniyle yapı, ulusal yönetmeliklerin en yüksek önem sınıfında yer almakta ve statik ile sismik kombinasyonlar altında sıkı performans koşullarına tabi tutulmaktadır. Özgün tasarım, inşaat sırasında geçerli olan geoteknik ve sismik verilere dayanmaktadir (2018 arazi araştırması; KMK (2019), KMK (1997). Yönetmeliklerin sonradan revize edilmesi, özellikle ShNK (2025) ve ShNK (2024)'ün yürürlüğe girmesi ve YZE tabanlı performans doğrulamasının öne çıkması, bu yeniden değerlendirmenin UzGASHKLITI tarafından yapılmasını gerekli kılmıştır (UzGASHKLITI, 2026).

## 3. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR

Yeniden değerlendirme, 2018 yılında yapılan tasarım aşaması arazi araştırması ile UzGASHKLITI tarafından 2026 yılında yürütülen ilave ve kontrol amaçlı zemin etüdünün birlikte yorumlanmasıyla oluşturulan idealleştirilmiş bir geoteknik modele dayanmaktadır. İdealleştirilmiş profil ve birimlerin mühendislik özellikleri Şekil 2'de özetlenmiştir. Yaklaşık 1,9 m kalınlığındaki düzensiz antropojenik dolgunun altında stratigrafi üç ana birimden oluşmaktadır: ıslandığında göçme potansiyeli taşıyan lös kökenli siltli kil (IGE-1), kazık çevre sürtünmesinin büyük bölümünün geliştiği daha sıkı ve kısmen doygun lös kökenli siltli kil (IGE-2) ve 33,6 m'den itibaren karşılaşılan, uç direnci tabakası işlevi gören sıkı taşlı lös (IGE-3). 2026 ilave ve kontrol zemin etüdü, stratigrafinin ve indeks özelliklerinin 2018 verileriyle uyumlu kaldığını doğrulamıştır. Serbest yeraltı su seviyesi 14,8 m derinlikte ölçülmüş, ancak Taşkent havzasında gözlenen ±2,0 m'lik mevsimsel dalgalanma nedeniyle tasarımda 12,8 m'lik su seviyesi esas alınmıştır.



Şekil 2. Kazıklı radye temel sisteminin altındaki mühendislik–jeolojik profil ve stratigrafi.

### 3.1. Zemin Profili ve Tasarım Parametreleri

Üç boyutlu analizler sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Taşkent lös zeminlerinin doğrusal olmayan, gerilmeye bağlı rijitlik ve plastik deformasyon davranışını temsil etmek amacıyla Pekleşen Zemin (Hardening Soil, HS) bünye modeli kullanılmıştır. Parametreler, 2018 ve 2026 geoteknik verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle belirlenmiş ve ShNK (2024) verilen rijitlik bağıntılarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Stratigrafi, Tablo 1'de özetlenen dört mühendislik–jeolojik elemana (IGE) indirgenmiştir. Tabaka sınırları, 2018 ve 2026 araştırmalarının birlikte yorumunu yansıtmaktadır.

Tablo 1. İdealleştirilmiş zemin profili (2018 + 2026 araştırmaları)

| Birim | Derinlik (m) | Kalınlık (m) | Açıklama |
|---|---|---|---|
| Dolgu | 0,0 – 1,9 | ≈ 1,9 | Moloz içeren heterojen antropojenik siltli kil dolgusu. |
| IGE-1 | 1,9 – 12,0 | ≈ 10,1 | Düşük plastisiteli, lös kökenli siltli kil; katı–çok katı kıvamda, ıslandığında göçme potansiyeline sahip ve yeraltı su seviyesinin üzerinde. |
| IGE-2 | 12,0 – 33,6 | ≈ 21,6 | Düşük plastisiteli, daha sıkı lös kökenli siltli kil; kısmen doygun–doygun |
| IGE-3 | 33,6 – 80,0 | > 46,0 | Sıkı taşlı lös (yarı kaya) |

HS modeli PLAXIS 3D'de uygulanmıştır. Mohr–Coulomb modelinden farklı olarak HS formülasyonu, birincil sıkışma ve kayma altındaki plastik şekil değiştirmelerin yanı sıra, yüklü bir radye altındaki küçük şekil değiştirme rijitliğinin doğru tahmini için gereken yük boşaltma–yeniden yükleme davranışını da hesaba katmaktadır. Her birim için benimsenen rijitlik ve dayanım parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Pekleşen Zemin (HS) modeli parametreleri (PLAXIS 3D)

| Parametre | Sembol | Birim | IGE-1 | IGE-2 | IGE-3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Malzeme tipi | – | - | HS | HS | HS |
| Drenaj tipi | - | - | | Drenajlı | |
| Birim hacim ağırlığı (doygun olmayan) | $\gamma_{un}$ | kN/m³ | 17,60 | 19,80 | 20,00 |
| Birim hacim ağırlığı (doygun) | $\gamma_{sat}$ | kN/m³ | 19,91 | 21,23 | 21,00 |
| Boşluk oranı | e | - | 0,817 | 0,709 | 0,500 |
| Sekant rijitlik | $E_{50}$ | kPa | 11.660 | 19.750 | 80.640 |
| Ödometre rijitliği | $E_{oed}$ | kPa | 11.660 | 19.750 | 80.640 |
| Boşaltma yeniden yükleme rijitliği | $E_{ur}$ | kPa | 34.970 | 59.250 | 241.920 |
| Gerilme düzeyi üssü | m | - | 0,5 | 0,5 | 1,0 |
| Efektif kohezyon | c′ | kN/m² | 9,5 | 18,6 | 31 |
| İçsel sürtünme açısı | Ø′ | ° | 26,0 | 26,0 | 27,53 |
| Dilatasyon açısı | ψ | ° | 0 | 0 | 0 |
| Poisson oranı | $\nu_{ur}$ | - | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Referans gerilme | $p_{ref}$ | kN/m² | 100 | 100 | 100 |

Rijitlik parametreleri, ShNK (2024) hükümleri doğrultusunda yorumlanan presiyometre ve plaka yükleme deneylerinden türetilmiştir. IGE-1 için 11,66 MPa sekant modülü, IGE-2 için ise deney sonuçlarıyla uyumlu ortalama 19,75 MPa değeri esas alınmıştır. Yarı kaya niteliğindeki IGE-3 tabakasına ait parametreler ($E_0$ = 80,64 MPa, c′ = 31 kPa ve Ø′ = 27,53°) Hoek–Brown ölçütü kullanılarak belirlenmiştir.

### 3.2. Depremsellik ve Yerel Zemin Sınıfı

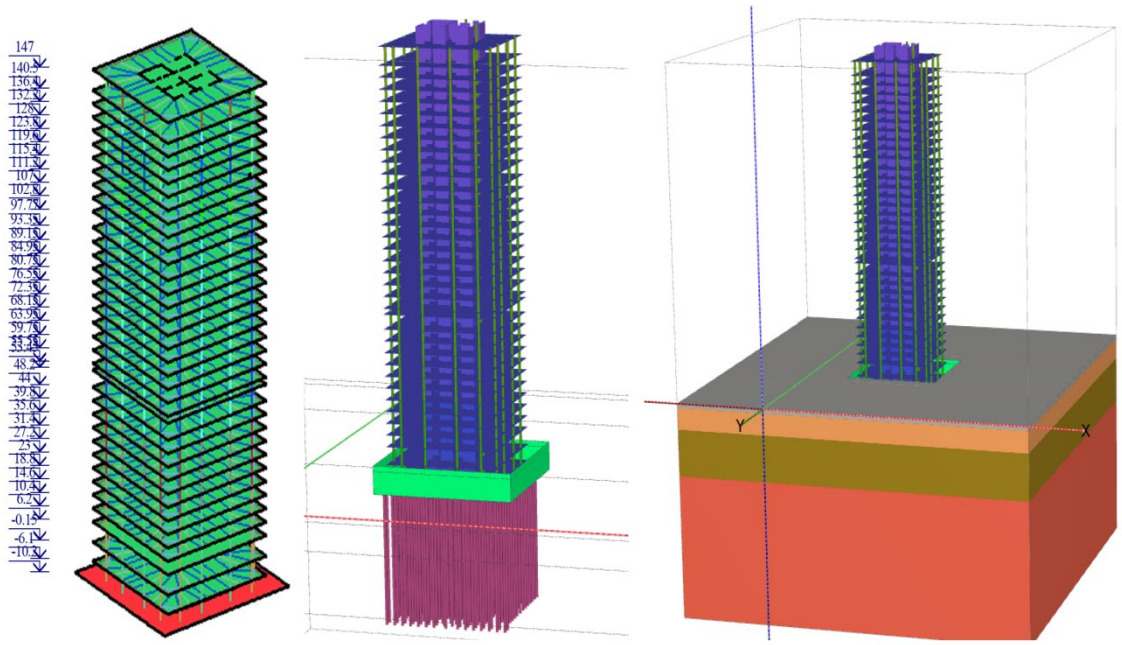
Güncellenen Taşkent sismik mikrobölgeleme haritası (2024) ve KMK (2019)'a göre saha, MSK-64 ölçeğinde IX (9) şiddet derecesindedir ve tasarım en büyük yer ivmesi (PGA) 0,34g'dir. Profilin dinamik özellikleri çok kanallı yüzey dalgası analiziyle (MASW) belirlenmiş, ortalama kayma dalgası hızı Vs30 = 408 m/s bulunmuştur.

Bu değere göre saha, ShNK (2025) uyarınca SC sınıfında yer almaktadır ($360 \leq Vs \leq 760$ m/s). Söz konusu sınıf; ASCE 7-16 (2016)'daki C sınıfı, Eurocode 8'deki B tipi ve TBDY 2018'deki ZC sınıfı ile örtüşmektedir.

## 4. SAYISAL MODELLEME YÖNTEMİ

### 4.1. Bütünleşik LIRA-SAPR – PLAXIS 3D Yaklaşımı

Çalışmada iki aşamalı bir yaklaşım izlenmiştir. Birinci aşamada üstyapı, global rijitlik matrisini, taban tepkilerini ve ilk üç doğal periyodu elde etmek üzere LIRA-SAPR'da modellenmiştir. İkinci aşamada bu tepkiler, düğüm ve yayılı yükler olarak PLAXIS 3D'ye aktarılmış ve kazık–radye–zemin sisteminin üç boyutlu YZE analizi yapılmıştır. (Şekil 3).




Şekil 3. Bütünleşik hesap modelleri: LIRA-SAPR (yapısal) ve PLAXIS 3D (geoteknik).

### 4.2. PLAXIS 3D Modelinin Kurulumu

Üç boyutlu modelde kazık grubunun tamamı (fore kazık, Ø100 cm, L = 48 m) ve radye temel sınır şartları etkilerini en aza indirmek amacıyla yanal yönde bina plan genişliğinin yaklaşık beş katına kadar uzatılan zemin hacmi içinde yer almaktadır (Bentley Systems, 2023). Zemin tabakaları HS modeliyle tanımlanmıştır (Tablo 2). Kazıklar, ShNK (2025)'e göre analitik olarak hesaplanan nihai kapasiteye göre kalibre edilmiş arayüz azaltma katsayılarıyla gömülü kiriş (embedded beam) elemanları olarak temsil edilmiştir. Radye ise uygulanan döşemenin elastik eğilme rijitliği kullanılarak plak elemanlarla modellenmiştir.

### 4.3. Sismik Yükleme

Sismik talep, pseudo-statik yaklaşımla tanımlanmıştır ve temele yalnızca pseudo-statik sismik etki uygulanmıştır. Sahaya özgü 10 s süreli ivme kaydı, ShNK (2025) ile uyumlu biçimde 0,34g'lik en büyük ivmeye ölçeklenmiş olup dinamik zaman tanım alanı analizi bu makalenin kapsamı dışındadır.

### 4.4. Analiz Senaryoları

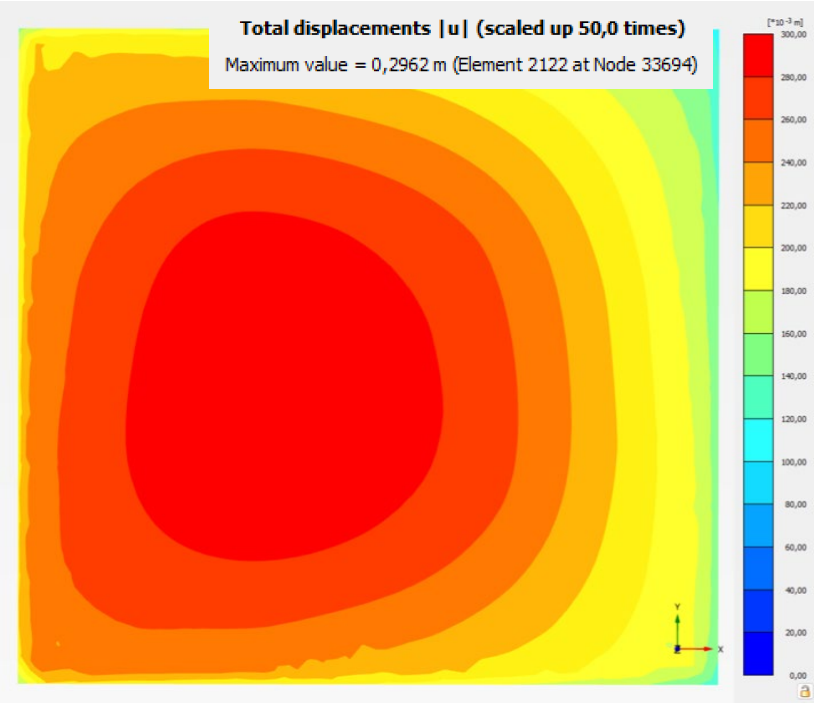
- S1: Statik – doğal zemin (kazıksız)
- S2: Sismik – doğal zemin (kazıksız)
- S3: Statik – kazıklı radye (Ø100 cm, L = 48 m)
- S4: Sismik – kazıklı radye (Ø100 cm, L = 48 m)

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

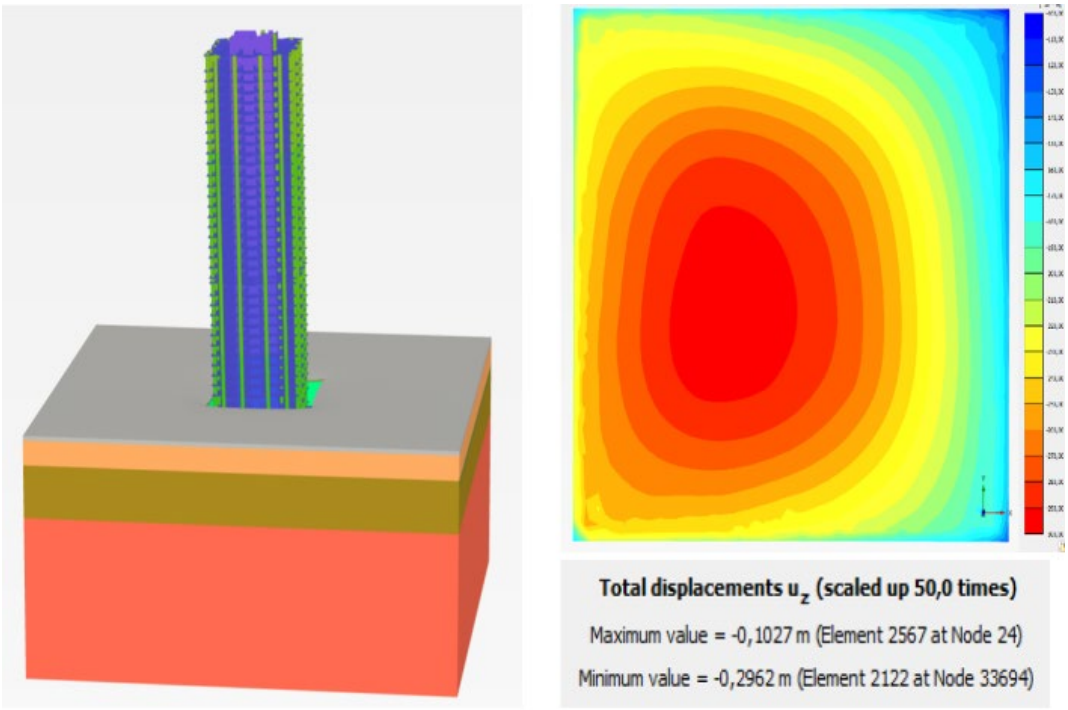
### 5.1. Kazıksız Durumda Oturmalar (S1, S2)

Yalnızca radye temelli çözümün yetersizliğini sayısal olarak göstermek ve kazıklı radyeye geçişi gerekçelendirmek amacıyla önce iyileştirilmemiş zeminde statik şartlar için oturma analizleri yapılmıştır. Yüksek katlı betonarme çerçeve yapılarda izin verilen toplam oturma, KMK (1998), ShNK (2024'de 10 cm ile sınırlandırılmıştır.

Statik yükleme altında (S1) hesaplanan oturmalar en az 10,27 cm, en çok 29,62 cm olup izin verilen değerin yaklaşık üç katıdır; düşey yer değiştirme konturları Şekil 4'te verilmiştir. Oturma çanağı, perdelerden aktarılan yüksek düşey yükü yansıtacak biçimde merkezî çekirdek tüpün altında yoğunlaşmaktadır (Şekil 4). Buna göre iyileştirilmemiş doğal zemin, yapının talebini yönetmelik sınırları içinde karşılayamamaktadır.



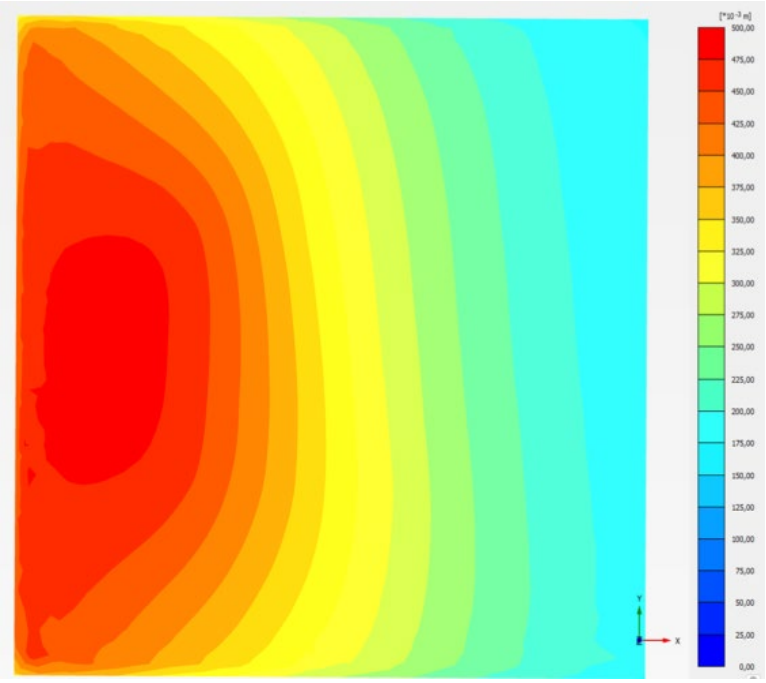

Şekil 4. S1 senaryosu: İyileştirilmemiş doğal zeminde statik yükleme altında toplam düşey yer değiştirme (uz) (maks. 29,62 cm).



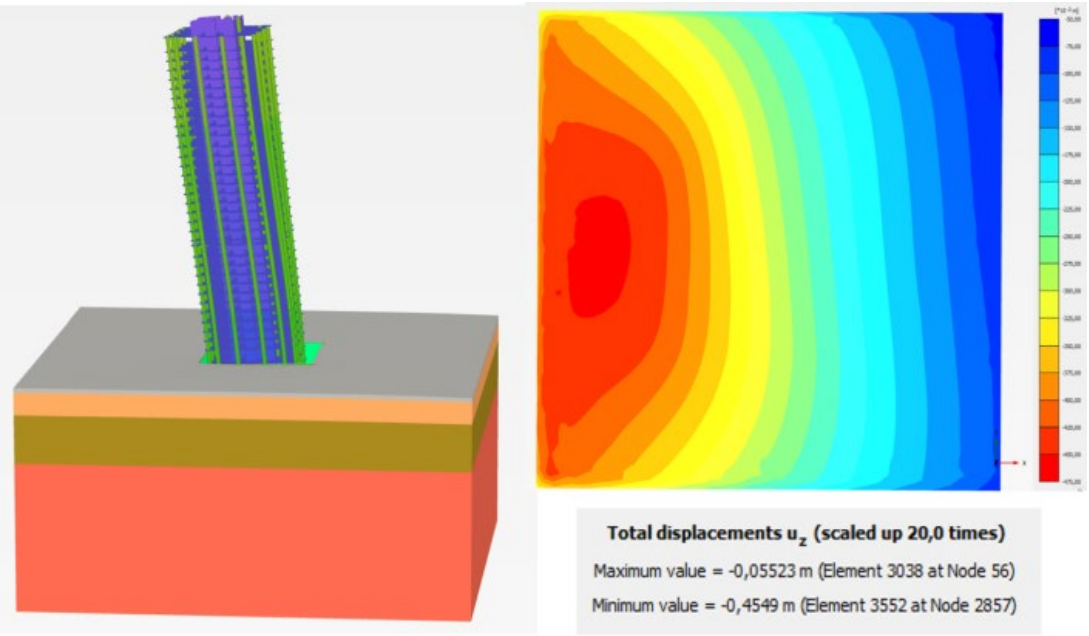

Şekil 5. S1 senaryosu: Kazıksız temelde oturma konturu planı ve üç boyutlu görselleştirme (merkezî bölge: 29,62 cm; çevre: 10,27 cm).

Sismik yükleme altında (S2) davranış belirgin biçimde kötüleşmekte, en büyük oturma 45,49 cm'ye çıkmaktadır (Şekil 5). S2,maks / S1,maks ≈ 1,54 oranı, lös çökellerin MSK-64 IX şiddetindeki uyarım altında önemli ölçüde ek sıkışmaya ve hacimsel şekil değiştirmeye uğradığını göstermektedir.

Sismik etkiye bağlı düşey deformasyon dağılımı ve eğiklik Şekil 6'da verilmiştir. S1 ve S2 senaryolarının ikisi de 10 cm sınırını aştığından, izleyen alt bölümde incelenen derin temel çözümü zorunlu hâle gelmektedir.



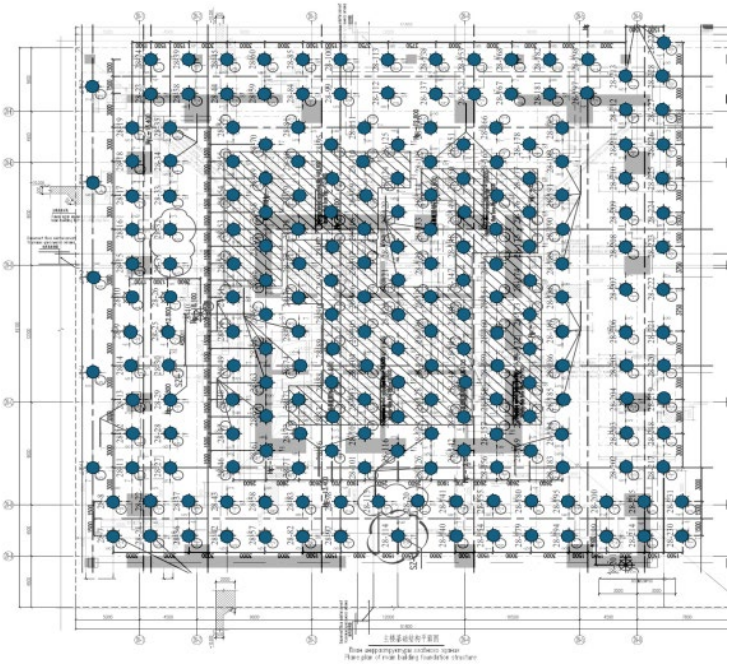
Şekil 6. S2 senaryosu: İyileştirilmemiş zeminde sismik yükleme altında düşey yer değiştirme konturları.




Şekil 7. S2 senaryosu: Kazıksız sistemde sismik oturma planı ve üç boyutlu görselleştirme Plaxis 3D (maks. 45,49 cm).

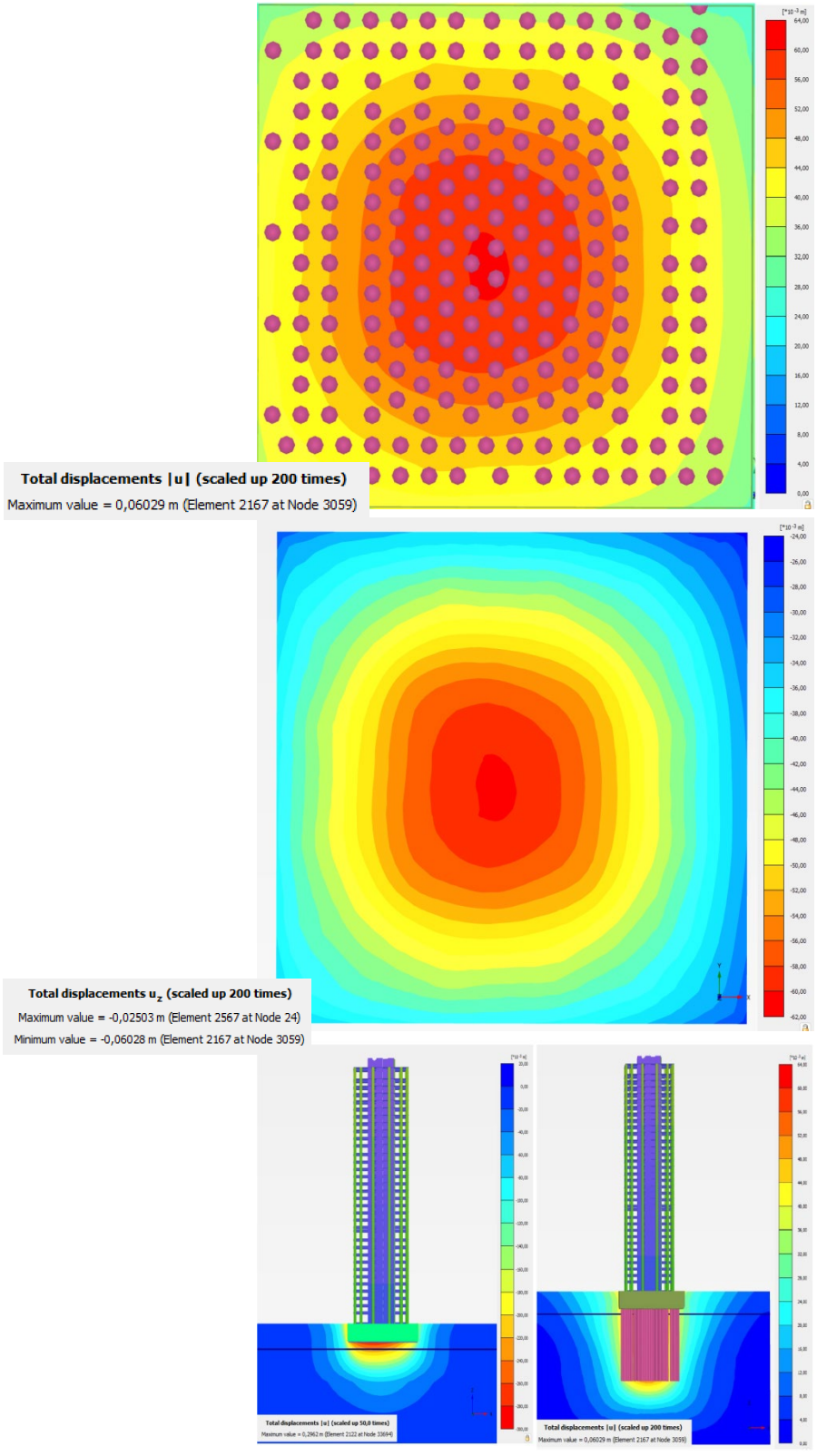
## 5.2. Kazıklı Radye Temelde Oturmalar (S3, S4)

İnşa edilen temelde Ø100 cm fore kazıklar (L = 48 m) IGE-1 ve IGE-2 birimlerini geçerek sıkı IGE-3 tabakasına gömülmektedir (Şekil 8). Bu düzen, oturmaları hem statik hem de sismik yükleme altında yönetmelik sınırlarının içine çekmektedir.



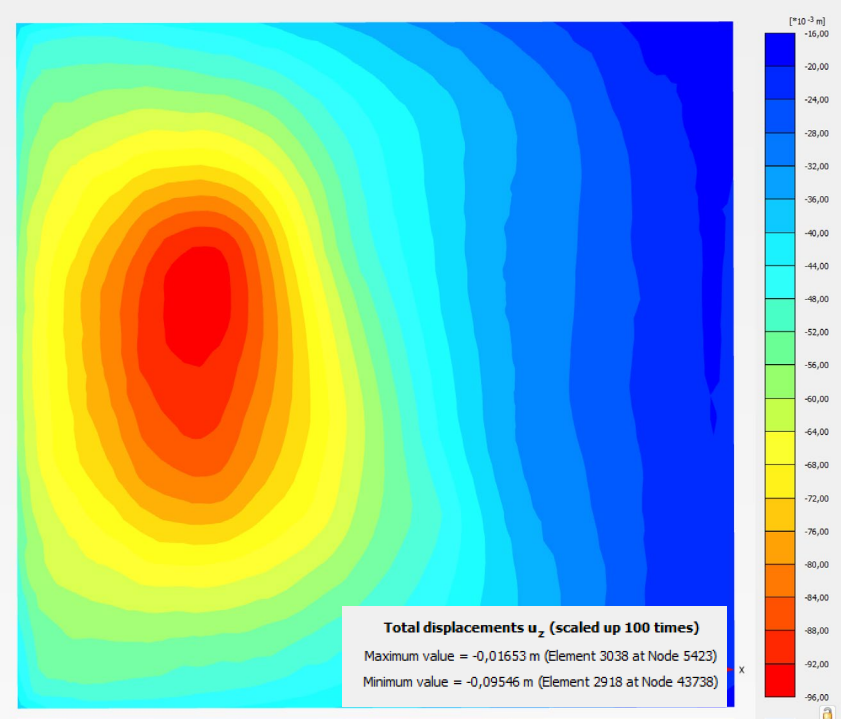
Şekil 8. Uygulanan Ø100 cm fore kazıkların (L = 48 m) nihai yerleşimi.

Statik yüklemede (S3) en büyük oturma 6,03 cm, çevredeki en küçük değer ise 2,50 cm'dir (Şekil 9); her ikisi de 10 cm sınırının belirgin biçimde altındadır. Göreli farklı oturma $\Delta S/L$ = 1/709 olup ShNK (2024)'ün 1/500 ölçütünü sağlamaktadır.




Şekil 9. S3 senaryosu: Statik yükleme altında kazıklı radyede oturma konturu. Maks. 60,28 mm (6,03 cm), min. 25,03 mm (2,50 cm); ΔS/L = 1/709 < 1/500.

Sismik yüklemede (S4) en büyük oturma 9,55 cm'ye çıkmakta, en küçük değer 1,65 cm'ye inmektedir (Şekil 10). 40 m'lik temel boyunca oluşan 7,90 cm'lik farklı oturma ΔS/L ≈ 1/507 vermekte ve 1/500 sınırının altında kalmaktadır. Kazıklı radye, tam sismik kombinasyon altında da yönetmelik koşullarını sağlamaktadır.




Şekil 10. S4 senaryosu: Uygulanan kazıklı radye temelde sismik oturma (maks. 9,55 cm; ΔS/L = 1/507).

Tablo 3. PLAXIS 3D oturma sonuçlarının özeti

| Senaryo | Temel | $S_{max}$ (cm) | ΔS/L | Uygun mu? |
|---|---|---|---|---|
| S1 – Statik | Kazıksız | 29,62 | – | ✗ Hayır |
| S2 – Sismik | Kazıksız | 45,49 | – | ✗ Hayır |
| S3 – Statik | Kazıklı radye | 6,03 | 1/709 | ✓ Evet |
| S4 – Sismik | Kazıklı radye | 9,55 | ≈1/507 | ✓ Evet |

## 5.3. Kazık Taşıma Kapasitesi

Uygulanan tasarımda tekil kazık için izin verilen yük 6.900 kN'dur (Ø100 cm, L = 48 m). ShNK (2025)'in güvenilirlik katsayıları (çevre sürtünmesinde 1,5, uçta 2,0) uygulandığında tekil kazığın tasarım direnci 12.489 kN olmaktadır. Bu kapasite, IGE-1, IGE-2 ve IGE-3'ün üst kesimi boyunca gelişen çevre sürtünmesi ile IGE-3'teki uç direncinden oluşmaktadır (Tablo 4).

Tablo 4. Kazık taşıma kapasitesi (Ø100 cm, L = 48 m; ShNK 2.01.06-25)

| Bileşen | Değer (kN) |
|---|---|
| Çevre sürtünmesi – IGE-1 (10,2–12,0 m) | 271 |
| Çevre sürtünmesi – IGE-2 (12,0–33,6 m) | 5.953 |
| Çevre sürtünmesi – IGE-3 (33,6–58,2 m) | 11.682 |
| Toplam çevre sürtünmesi $Q_{ks}$ | 17.906 |
| Kazık uç direnci $Q_{ku}$ (IGE-3) | 1.102 |
| Kazık ağırlığı $W_p$ | 546 |
| Toplam nihai kapasite $Q_{kt}$ | 18.462 |
| Tasarım kapasitesi (γ katsayıları sonrası) $Q_{tv}$ | 12.489 |
| Kazık yükleme deneyi sonrası izin verilen taşıma kapasitesi $P_{tv}$ | 6.900 |

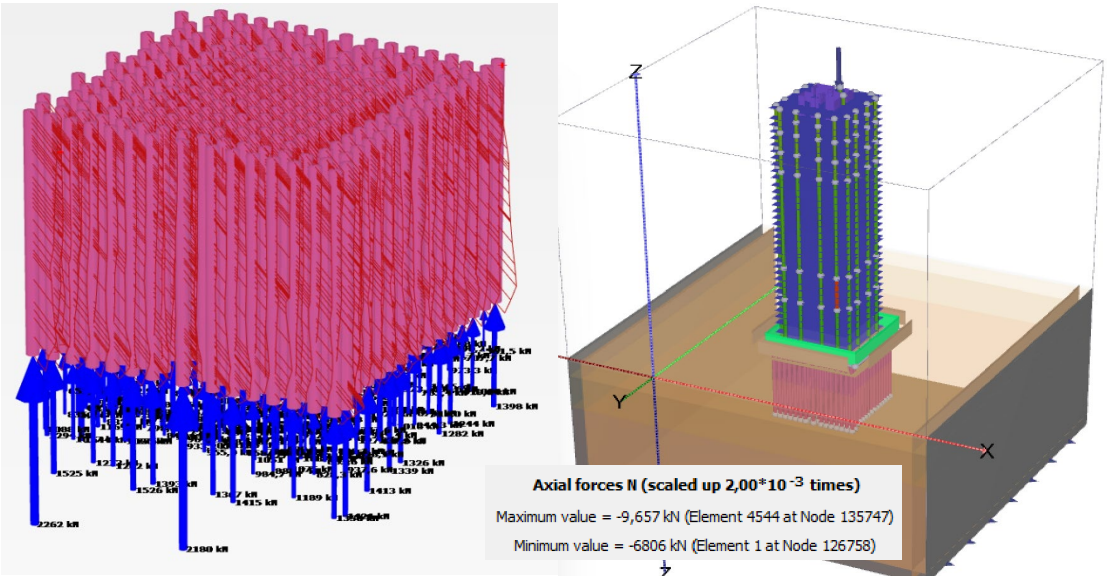
## 5.4. Statik Yükleme Altında Kazık Düşey Yer Değiştirmeleri

S3 senaryosunda kazık başı düşey yer değiştirmeleri (Uz), merkezdeki kazıklarda 6,05 cm, köşelerde ise 2,23 cm olarak hesaplanmıştır. Deformasyon profili, en yüksek değerlerin

yoğun yüklü çekirdek tüp bölgesinin altında toplandığı çanak biçimli bir oturma davranışına işaret etmektedir. Elde değerler, ShNK (2024) tarafından öngörülen 10 cm sınırının belirgin şekilde altındadır.

### 5.5. Kazık Eksenel Kuvvet Dağılımı

S3 senaryosunda kazık grubundaki en büyük basınç kuvveti 6.806 kN'dur (Şekil 11); bu değer, kazık yükleme deneyinden belirlenen izin verilen 6.900 kN'un altında kalmaktadır. Yatay rijitlik dışmerkezliğinden doğan devrilme momenti nedeniyle en yüksek eksenel yükleri köşe kazıklar taşımakta, ancak dağılım düşey yükleme altında tasarım zarfının içinde kalmaktadır.




Şekil 11. *Kazıklardaki eksenel kuvvetler (N) – statik yükleme (S3). Maks. basınç: 6.806 kN < Ptv = 6.900 kN*

## 6. SONUÇLAR

Mevcut zemin koşullarında yalnızca radye temel, oturma ölçütünü hem statik (29,62 cm) hem de sismik (45,49 cm) yükleme altında sağlayamamaktadır. Hesaplanan oturmalar, 10 cm'lik sınır değeri ShNK (2024) ve KMK (1998) uyarınca yaklaşık 3,0 ila 4,5 kat aşmaktadır. Bu nedenle söz konusu yapıda derin temel sistemi teknik bir zorunluluktur.

Uygulanan kazıklı radye sistemi (D = 100 cm, L = 48 m) toplam oturmayı statik yüklemede 6,03 cm, sismik yüklemede 9,55 cm ile sınırlandırmıştır. Göreli farklı oturmalar statik yüklemede 1/709, sismik yüklemede 1/507 olup ShNK (2024) sınır değeri olan 1/500'ün altında kalmaktadır. Statik yüklemede kazık başına düşen en büyük eksenel kuvvet (6.806 kN), kazık yükleme deneyinden belirlenen izin verilen 6.900 kN değerinin altında kalmakta ve düşey yük davranışının yeterli olduğunu göstermektedir.

Üç boyutlu YZE analizi, ankastre mesnet kabulünün aksine üstyapı ile zeminin ortak davranışını yansıtmakta; yük aktarım mekanizmasını ve temel elemanlarındaki rijitlik değişimlerini doğrudan ortaya koymaktadır. Yazarların kurumu tarafından bu makalenin kapsamı dışında, Özbekistan genelinde yükseklikleri 100 ile 364 m arasında değişen (27–79 kat) on'dan fazla projede benzer bütünleşik analizler yürütülmüş ve sonuçlar birbiriyle

tutarlı bulunmuştur. Bu deneyim, burada sunulan yaklaşımın farklı zemin ve yapı koşulları için de uygulanabilir olduğuna işaret etmektedir.

9 dereceli sismik bölgelerdeki yüksek katlı yapılarda ve derin temellerde, özellikle Taşkent'tekine benzer lös kökenli zayıf zeminlerde, YZE analizi isteğe bağlı bir kontrol değil, tasarımın bir gereği olarak ele alınmalıdır. Bu çalışmanın bulguları ve yukarıda belirtilen uygulama deneyimi ışığında, ShNK (2025) kapsamında (a) 20 kat ve üzeri (yükseklik ≥ 70 m) yapılarda, (b) kazıklı radye temellerde, (c) zayıf ve heterojen zeminlerde ve (d) yoğun kentsel sahalarda bütünleşik yapısal–geoteknik modelleme (örn. LIRA-SAPR–PLAXIS bağlaşımı) önerilmektedir. Temel ve zemin iyileştirme yönteminin (fore kazık, CFA kazık, derin zemin karıştırma vb.) seçimi de yalnızca taşıma kapasitesi kurallarına değil, bu tür hesapların sonuçlarına dayandırılmalıdır.

Bu değerlendirme, temel düzeyindeki talep ve pseudo-statik sismik yükleme ile sınırlıdır. Sahaya özgü ivme kaydıyla yapılan dinamik zaman tanım alanı analizi tamamlanmış olup sonuçları ayrı bir makalede yayımlanacaktır. Çalışmanın ayrıca spektrumla uyumlu bir kayıt setine, üstyapının doğrusal olmayan zaman tanım alanı analiz ve tasarımına genişletilmesi planlanmaktadır.

## TEŞEKKÜR

*Yazarlar; kurumsal desteği ve laboratuvar akreditasyonları (ISO 9001:2015, Sert. QMS-0066/E; ISO/IEC 17025:2019, Sert. O'ZAK.SL.0268 ve O'ZAK.SL.0431) için OzGASHKLITI'ye (İnşaat, Jeoenformasyon ve Kentsel Kadastro Mühendislik Araştırmaları Özbek Devlet Tasarım ve Bilimsel Araştırma Enstitüsüne katkıları için teşekkür eder.*

## KAYNAKLAR

ASCE 7-16 (2016). Binalar ve Diğer Yapılar İçin Asgari Tasarım Yükleri. ASCE, Reston, VA.

Bentley Systems (2023). PLAXIS 3D Referans Kılavuzu. Bentley Systems, CONNECT Edition.

EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı – Bölüm 1: Genel Kurallar, Deprem Etkileri ve Binalar İçin Kurallar. CEN, Brüksel.

Hua B., An D., Yan F. (2023). A seismic and energy dissipation design study on a super high-rise building in seismic zone of 9-level intensity. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 43(1), 149–158.

KMK 2.01.03-19 (2019). Deprem Bölgelerinde İnşaat. Devlet İnşaat Komitesi, Taşkent.

KMK 2.02.01-98 (1998). Bina ve Yapıların Temelleri. Özbekistan Cumhuriyeti.

ShNK 2.01.06-25 (2025). Deprem Bölgelerinde Yüksek Katlı Yapıların Tasarımı. Özbekistan Cumhuriyeti.

ShNK 2.02.01-24 (2024). Bina ve Yapıların Temelleri. Özbekistan Cumhuriyeti.

TBDY 2018 (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. AFAD, Ankara.

UzGASHKLITI (2026). Temel Değerlendirmesine İlişkin Geoteknik Rapor, Rapor No. GTS-GEO-2026/5, Şubat 2026. Taşkent.

Yan F., Hua B., An D. (2024). Structural design and optimization of a super high-rise building in 9-degree seismic fortification area in Uzbekistan. Building Structure, 54(13), 51–56.