



2026

İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ TEKLİFİ

Proje Adı: ZENITH/SKYRA Towers

Takım Üyeleri:

1. Emre KARACA (*Kaptan*)
2. Muhammet YAĞCIOĞLU
3. Yunus Emre ÇETİN
4. Zehra ÖZER
5. Ali ÖZUYSAL

Akademik Danışman: Prof. Dr. Gürsoy TURAN

İçindekiler

1	BİNA TANITIMI	1
2	MİMARİ TASARIM	2
3	YAPISAL SİSTEM TANIMI ve TASARIMI	3
4	ÇİZİMLER	5
5	SORULAR	6
5.1	Soru I	6
5.1.1	İkiz Kule ve Köprü Sistemi & Simetri ve Düzenlilik	6
5.1.2	Yeterli Yanal Rijitlik & Sürekli Yük Aktarımı ve Süneklik	6
5.1.3	Hafiflik ve Malzeme	6
5.2	Soru II	7
5.3	Soru III	8
5.4	Soru IV	9
5.4.1	Uygulama Zorluğu	9
5.4.2	Maliyet	9
5.4.3	Sektörel Sebepler	9
5.5	Soru V	10
5.5.1	EDYY'nin Yetersizliği	10
5.5.2	MBY'nin Tercih Gerekçesi	10
5.5.3	Doğrulama ve Ölçekli Model	10
5.6	Soru VI	11
5.7	Soru VII	12
5.8	Soru VIII	13

1 BİNA TANITIMI

Yüzyıllardır farklı medeniyetlere ev sahipliği yapmış, dünyanın sayılı metropollerinden biri olan İstanbul; Asya ve Avrupa arasında köprü görevi gören, tarihi dokusuyla Anadolu'nun kadim mirasını ve Avrupa'nın dinamik ruhunu birleştirerek uyumlu bir bütün oluşturan ülkemizin en önemli şehirlerinden biridir. Ayrıca, Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre ülkemizin hem ekonomik faaliyetleri hem de nüfusu açısından İstanbul gözle görülür bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, İstanbul'un Ümraniye ilçesinde bulunan İstanbul Finans Merkezi'nde planlanan GÜRSOY Towers projesi; İstanbul'un küresel finans merkezi olma yolunda bölgede artan nitelikli ofis ve ticari alan ihtiyacına yanıt verirken ziyaretçilerine/çalışanlarına sürdürülebilir ve erişilebilir bir yaşam alanı sunmayı amaçlamaktadır. Projenin başlıca misyonları; bölgenin tarihsel dokusunu modern yaklaşımlarla harmanlamak, çevreci ve teknoloji odaklı sürdürülebilir yaklaşımları verimlilik esaslı mimari ve mühendislik çözümleriyle birleştirmektir.

Kuleler; yapının ağırlığı, rijitliği, maliyeti, kira getirisi ve kullanım verimliliği gibi parametreler göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. İki simetrik 25 katlı kuleden oluşan projede, her bir kulede birbirinden bağımsız bir çekirdek bulunmaktadır. Kuleler, 6., 12., 18. ve 24./25. katlarda yer alan köprüler ile birbirine bağlanmış; böylece yatay yükler altında birlikte çalışmaları sağlanarak görelî kat ötelenmelerinin ve burulma etkilerinin azaltılması amaçlanmıştır.

Zemin kat, çalışanların ve ziyaretçilerin ihtiyaçlarına yönelik danışma, satış/sergi, konferans ve spor alanları gibi kamusal kullanımlara ayrılmıştır. Zemin katın devamında yer alan 1. ve 2. katlar, restoran ve mağazalara yönelik kiralanabilir alanlar olarak planlanmıştır. Orta katlarda, açık ofis düzeninde yüksek yoğunluklu kullanıma uygun çalışma alanları öngörülmektedir. Üst katlarda ise daha düşük yoğunluklu, tek kişilik veya üst düzey yöneticilere yönelik ofis düzeni planlanmıştır. Köprü katlarında, İstanbul manzarasına açılan lüks restoranlar ile sosyal ve dinlenme alanlarının oluşturulması hedeflenmiştir. Son olarak, B Kulesi'nde ikinci köprü seviyesinden itibaren rezidanslar ile 5 yıldızlı otel ve konaklama katları planlanmıştır. Bu sayede finans merkezi kullanıcıları için çalışma, yaşam ve konaklama bütünlüğünün sağlanması amaçlanmıştır.

2 MİMARİ TASARIM

Binanın mimari tasarımında dikkate alınan tasarım kriterlerinin çevresel ve ekonomik koşulları da kapsayacak şekilde ilgili görsellerle desteklenerek açıklandığı bölümdür (şekiller hariç maksimum 1 A4 sayfa).

3 YAPISAL SİSTEM TANIMI ve TASARIMI

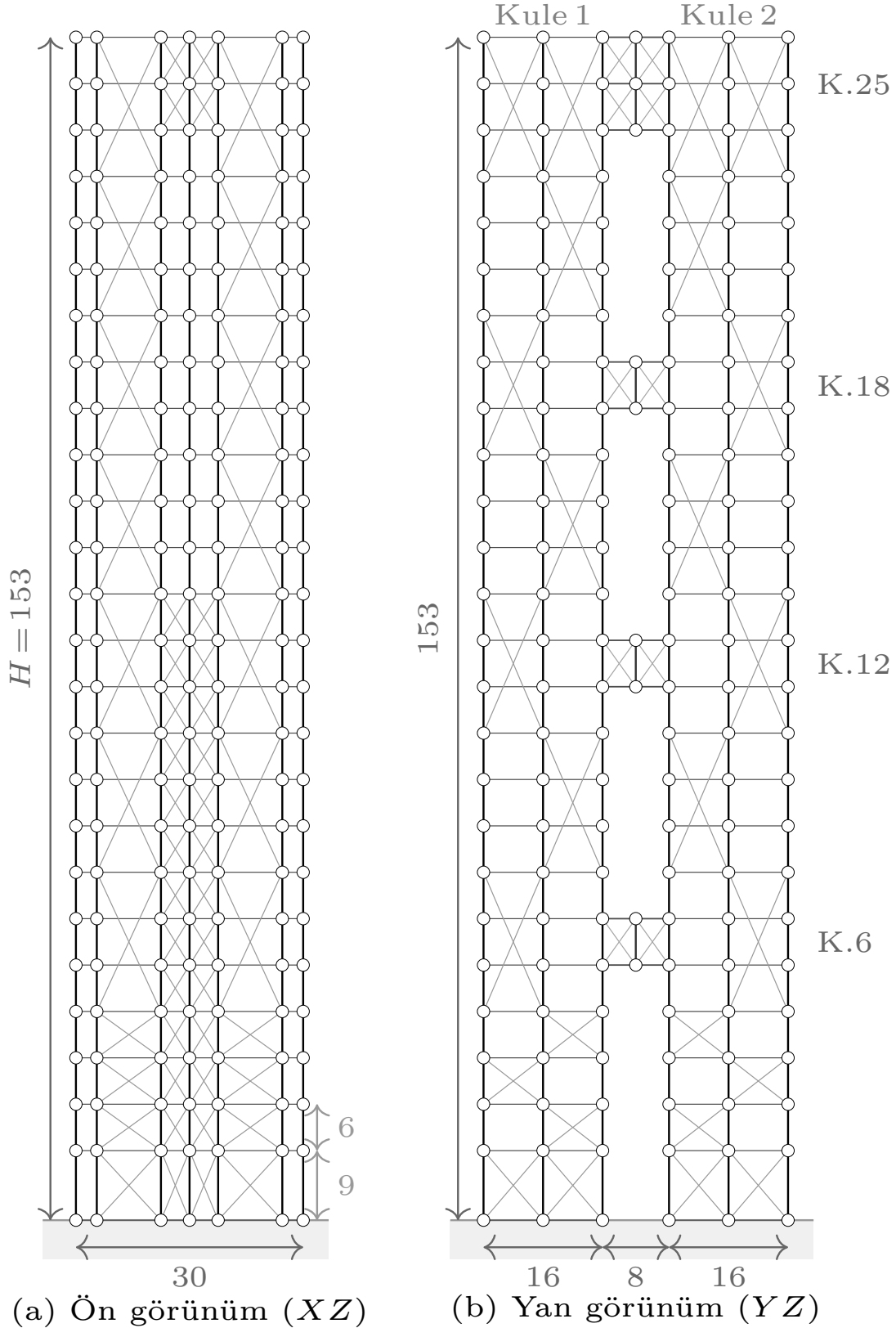
Saha koşulları ve deprem tehlikesi. Proje sahası, İstanbul Finans Merkezi (41.00° K, 29.11° D) mevkiinde olup Kuzey Anadolu Fayı'na yakın konumu itibarıyla birinci derece deprem kuşağında yer almaktadır. AFAD [3] DD-2 tehlike düzeyinde tasarım spektral ivmeleri $S_{DS} = 1.008$ g, $S_{D1} = 0.514$ g olarak belirlenmiştir [1]. Saha ZD zemin sınıfında olup kalın yumuşak zemin tabakası uzun periyotlu deprem dalgalarını kuvvetlendirerek üstyapıya aktarmaktadır; bu durum yapısal tasarımda hem yanal rijitliği hem de yeterli şekil değiştirme kapasitesini zorunlu kılmaktadır.

Taşıyıcı sistem tipi ve gerekçeleri. Salt moment çerçevesi sünek olmakla birlikte yanal ötelenmeyi yeterince sınırlayamamakta; münferiden çaprazlı sistem ise yüksek rijitlik sağlamakla beraber gevrek kırılmaya açık bulunmaktadır. Bu iki uç arasındaki dengeyi kurmak üzere *çerçeve-çapraz hibrit* sistem tercih edilmiştir [5]: çapraz elemanlar eksenel kuvvet mekanizmasıyla yatay yükleri doğrudan temele ileterek yanal ötelenmeyi kontrol altına almakta; moment çerçevesi ise düğüm noktalarının dönme kapasitesi sayesinde enerji yutma ve plastik yeniden dağılım imkânı sunmaktadır. İkiz kule konfigürasyonu benimsenerek yapı yüksekliğinin $\sim H/4$, $H/2$, $3H/4$ ve tepe kotlarına yerleştirilen dört köprü vasıtasıyla kuleler kuplalanmış; bu sayede global rijitlik artırılmış, diferansiyel ötelenme ve burulma talebi asgariye indirilmiştir [10, 15]. Köprüler aynı zamanda iki kulenin eş fazlı titreşimini sağlayarak antisimetrik modları bastırma işlevi de görmektedir.

İzlenen yaklaşımlar ve kabuller. Yapısal model OPENSEES® [4] ortamında oluşturulmuştur. Düğüm noktalarında kolon-kiriş birleşimi rijit, çapraz uçları ise mafsallı kabul edilmiş; böylece çaprazlar yalnızca eksenel kuvvet taşımakta, eğilme momenti çerçeve elemanlarına aktarılmaktadır. Güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesi gözetilerek plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması hedeflenmiş, kat mekanizması ihtimali bertaraf edilmiştir. Deprem analizinde Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) ile zaman tanım alanında hesap (ZTAH) uygulanmış; modal katkılar CQC kuralı ($\xi = 0.05$) ile birleştirilmiştir [1]. Her iki doğrultuda tam simetri tesis edilerek kütle-rijitlik eksantrisitesi sıfırlanmış; burulma düzensizliği kontrolü sağlanmıştır [2].

Sistem geometrisi ve çapraz yerleşim stratejisi. Model 40×40 cm tabla üzerinde iki simetrik kuleden oluşmaktadır (Şekil 1). Her kule 30×16 cm plan boyutunda, 7×3 düşey kolon ağı üzerine inşa edilmiş olup zemin kat yüksekliği $h_0 = 9$ cm, sonraki 24 kat $h = 6$ cm; toplam yükseklik $H = 153$ cm'dir. Kuleler arası açıklık 8 cm olup köprüler 6., 12., 18. ve 25. katlarda konumlandırılmıştır. X doğrultusunda köşe açıklıkları (2,7 cm) kısa tutularak çerçeve rijitliği takviye edilmiş; Y doğrultusunda simetrik iki açıklık (7,7 cm) ile rijitlik dağılımı dengelenmiştir.

Çapraz elemanlar, deprem kesme kuvvetinin en yoğun olduğu alt katlara konsantre edilmiştir (Şekil 1). XZ düzleminde iç açıklıklarda zemin-13. kat arasında X -çapraz çifti uygulanarak kesme kuvveti basınç ve çekme bileşenlerine ayrıştırılmış, tek yönlü burkulma riski azaltılmıştır. Dış açıklıklarda alt dört katta her katta tam çapraz, üst katlarda ise üçer katlık zikzak düzeninde çapraz yerleştirilmiştir; bu gradyan, üst katlardaki kesme kuvveti düşüşüne paralel olarak rijitlik dağılımını optimize etmektedir. YZ düzleminde damalı (staggered) çapraz konfigürasyonu uygulanmış; ardışık katlarda çaprazlar sağ ve sol açıklıklara dönüşümlü yerleştirilerek gerilme akışı düzgün biçimde yayılmış ve tek açıklıkta aşırı gerilme yığılması önlenmiştir. Son iki katta ise her iki düzlemde tam çapraz uygulanarak tepe katlarının lateral stabilitesi güvence altına alınmıştır.



Şekil 1: V10 yapısal sistem: (a) ön görünüm (XZ)—iç açıklıklarda X-çapraz (0–12. kat), dış açıklıklarda 3 katlık zikzak; (b) yan görünüm (YZ)—köprü bağlantıları ve 3 katlık zikzak çaprazlar. Siyah: kolon, koyu gri: kiriş/köprü, açık gri: çapraz. Beyaz daireler: düğüm noktaları. Ölçüler cm.

4 ÇİZİMLER

Binanın her bir farklı katına ait plan ve iki ana doğrultudaki kesit çizimleri verilecektir.

- Çizimler ayrıca "dwg" formatında ek olarak sunulacaktır.

5 SORULAR

5.1 Soru I

Soru: Yapı taşıyıcı sistemini belirlerken nelere dikkat ettiğinizi depreme dayanıklı bina tasarım ilkeleri çerçevesinde (taşıyıcı elemanların geometrisi ve yerleşimi, yeterli dayanım, rijitlik ve sünekliğin sağlanması gibi) açıklayınız.

Cevap: Taşıyıcı sistem seçiminde beş temel ilkeye dikkat edilmiştir: (1) simetri ve düzenlilik, (2) yeterli rijitlik, (3) sürekli yük aktarımı, (4) süneklik, (5) hafiflik. TBDY 2018 ve uluslararası tasarım esasları çerçevesinde bu ilkeler aşağıda açıklanmıştır [1, 5].

5.1.1 İkiz Kule ve Köprü Sistemi & Simetri ve Düzenlilik

Yüksek katlı yapı konfigürasyonu olarak iki ayrı kule ve bunları birbirine bağlayan köprü elemanlarından oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Her kule 26 kattan oluşmakta olup 7×3 kolon gridi üzerine inşa edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar, köprü bağlantılarının yapı yüksekliğinin $1/4$, $1/2$ ve $3/4$ seviyelerine yerleştirilmesinin sismik performansı optimize ettiğini göstermektedir [10]. Bu doğrultuda köprüler yaklaşık olarak 6., 12., 18. ve 25. katlara konumlandırılmıştır. Bu konfigürasyon, yatay yükler altında kulelerin birlikte çalışmasını sağlamakta ve tek bir yüksek kuleye kıyasla daha dengeli yük dağılımı sunmaktadır. Yapının planda ve düşeyde düzenli olması, burulma düzensizliğini önlemek açısından temel gerekliliktir. İkiz kule sistemi her iki ana ekseninde (X , Y) simetrik olarak tasarlanmış; kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki eksantrisite en aza indirilmiştir. A1a burulma düzensizliği katsayısı zemin katta $\eta_{bi} = 1.69$ olup 2,0'nin altındadır; üst katlarda $\eta_{bi} < 1.2$ değerleri elde edilmiştir [2].

5.1.2 Yeterli Yanal Rijitlik & Sürekli Yük Aktarımı ve Süneklik

Deprem yüklerinin güvenle temele aktarılması için yapının yatay kuvvetlere karşı yeterli rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Çerçeve-çapraz hibrit sistem tercih edilerek, moment taşıyan çerçevelerin sünekliği ile çapraz elemanların rijitliği bir arada kullanılmıştır. Çapraz elemanlar XZ ve YZ düzlemlerinde stratejik noktalara yerleştirilmiş; köprü bağlantısı ise iki kule arasında yük paylaşımını sağlayarak global sistem rijitliğini artırmıştır. Deprem yüklerinin kesintisiz olarak temele iletilmesi için düşey taşıyıcı elemanlar tüm katlarda aynı konumda devam etmektedir. Kolon-kiriş düğüm noktaları rijit bağlantılı, çapraz elemanlar mafsallı modellenmiştir. Güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım prensibi uygulanarak plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması hedeflenmiştir. CQC yöntemiyle hesaplanan göreceli kat ötelemesi $\delta/h = 0.00117 < 0.008$ 'dir [1].

5.1.3 Hafiflik ve Malzeme

Deprem kuvvetleri yapı kütlesi ile doğru orantılı olduğundan, taşıyıcı sistemin mümkün olduğunca hafif tutulması esastır. Balsa ahşap malzeme ($E = 3.5$ GPa) kullanılarak yapısal analizler OPENSEES® yazılımı ile gerçekleştirilmiş [4], ağırlık minimizasyonu ve rijitlik maksimizasyonu hedefleriyle iteratif optimizasyon yapılmıştır. [Github deposunda](#) tüm analiz ve optimizasyon kodları mevcuttur [11].

Sonuç olarak, sahaya özgü deprem tehlikesi parametreleri ($S_{DS} = 1.008$ g, $S_{D1} = 0.514$ g, zemin sınıfı ZD) dikkate alınarak [3], TBDY 2018 gerekliliklerini karşılayan simetrik, yeterli yanal rijitliğe ve sünekliğe sahip, hafif bir çerçeve-çapraz hibrit ikiz kule-köprü taşıyıcı sistemi tasarlanmıştır.

5.2 Soru II

Soru: Binanızın doğal titreşim periyodu ile deprem yer hareketi tepki spektrumu arasındaki ilişkiyi açıklayınız.

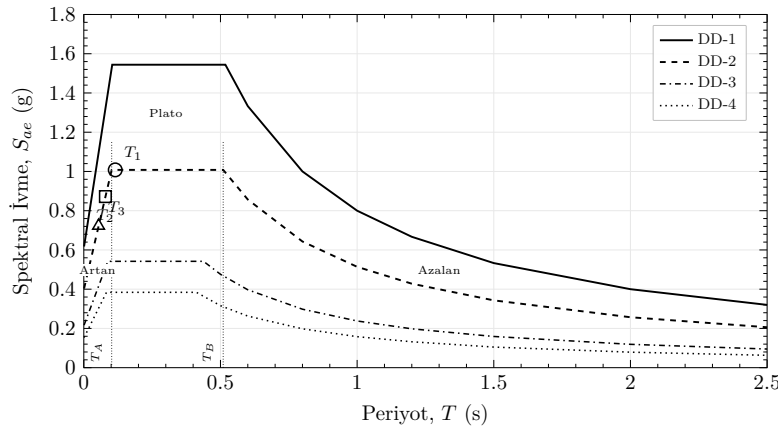
Cevap: Yapının ilk üç doğal titreşim periyodu ($T_1 = 0.115$ s, $T_2 = 0.079$ s, $T_3 = 0.054$ s) değerlendirildiğinde, T_1 TBDY 2018 DD-2 tasarım spektrumunun sabit ivme (plato) bölgesine ($T_A = 0.102$ s $< T_1 < T_B = 0.510$ s) düşmekte; T_2 ve T_3 ise artan bölgede ($T < T_A$) yer almaktadır. Birinci mod tam plato ivmesini ($S_{ae} = 1.008$ g) alırken, T_2 için $S_{ae} = 0.872$ g, T_3 için $S_{ae} = 0.723$ g elde edilmektedir. Periyotların ZD zemin hakim periyodundan ($T_g \approx 0.4-0.7$ s) belirgin şekilde kısa olması rezonans riskini ortadan kaldırmaktadır.

İstanbul Finans Merkezi (41.002136° , 29.106832°) için AFAD [3] DD-2 verileri: $S_S = 0.877$, $S_1 = 0.243$, zemin sınıfı ZD. Yerel zemin etki katsayıları $F_S = 1.149$, $F_1 = 2.114$ ile tasarım parametreleri:

$$S_{DS} = 0.877 \times 1.149 = 1.008 \text{ g}, \quad S_{D1} = 0.243 \times 2.114 = 0.514 \text{ g}. \quad (1)$$

Köşe periyotları $T_A = 0.2 \cdot S_{D1}/S_{DS} = 0.102$ s, $T_B = S_{D1}/S_{DS} = 0.510$ s olarak hesaplanmıştır [1].

OPENSEES® [4] ile 1108 düğüm, 2794 elemanlı V10 modeli `elasticBeamColumn` elemanları ve toplu kütle (*lumped mass*) formülasyonu ile oluşturulmuştur. Özdeğer problemi $\mathbf{K}\phi_n = \omega_n^2 \mathbf{M}\phi_n$ ARPACK kütüphanesi ile Lanczos iterasyonu (`-genBandArpack`) kullanılarak çözülmüş; ilk 12 mod için periyotlar $T_n = 2\pi/\omega_n$ ile elde edilmiştir. Modal periyotlar: $T_1 = 0.115$ s (Y sallanım, %72.3), $T_2 = 0.079$ s (X sallanım, %68.3), $T_3 = 0.054$ s (burulma). Birinci mod $T_A < T_1 < T_B$ aralığında plato bölgesinde olup $S_{ae} = S_{DS} = 1.008$ g almaktadır; T_2 ve T_3 artan bölgede olup $S_{ae}(T_2) = 0.872$ g, $S_{ae}(T_3) = 0.723$ g değerlerini almaktadır. Dördüncü mod ($T_4 = 0.039$ s) daha derin artan bölgede: $S_{ae}(T_4) = (0.4 + 0.6 \cdot 0.039/0.102) \cdot 1.008 = 0.635$ g. Modal katkılar CQC yöntemiyle birleştirilmiş olup korelasyon katsayısı $\rho_{ij} = 8\xi^2(1 + \beta_{ij})\beta_{ij}^{3/2}/[(1 - \beta_{ij}^2)^2 + 4\xi^2\beta_{ij}(1 + \beta_{ij})^2]$ ($\beta_{ij} = \omega_i/\omega_j$, $\xi = 0.05$) ile hesaplanmıştır. Elastik taban kesme kuvveti $V_t = 160$ N olup TBDY 2018 gerekliliklerini sağlamaktadır. Yapı periyodunun ZD zemin hakim periyodundan ($T_g \approx 0.4-0.7$ s) kısa olması rezonans riskini azaltmaktadır. Spektrum-periyot ilişkisi Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2: AFAD DD-1/2/3/4 yatay elastik tasarım spektrumları ve OPENSEES modal analiz sonuçları (İFM, ZD). Beyaz işaretçiler V10 modelinin ilk üç modunu göstermektedir ($T_1 = 0.115$ s plato, $T_2 = 0.079$ s artan, $T_3 = 0.054$ s artan).

5.3 Soru III

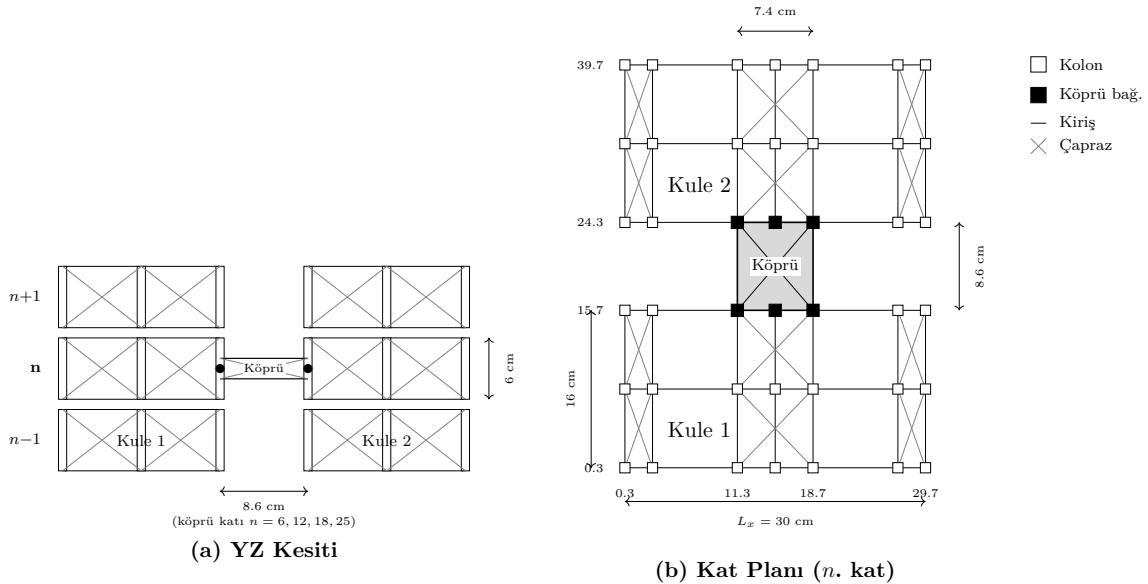
Soru: Yapıdaki düşey taşıyıcıların yerleşiminin belirlenmesinde dikkat edilen hususlar nelerdir?

Cevap: Düşey taşıyıcı yerleşiminde üç temel hedef gözetilmiştir: (i) düşey yüklerin (Z) sürekli ve kesintisiz temele aktarımı, (ii) yatay kuvvetlere (X , Y) karşı yeterli yanal rijitliğin temini, (iii) burulma düzensizliğinin kontrolü [1].

Kolon Grid Konfigürasyonu: Her kule için 7×3 ortogonal kolon gridi uygulanmıştır. X ekseninde değişken açıklık düzeni benimsenmiş olup köşe açıklıkları ($L = 2,7$ cm) kısa tutularak moment çerçevesi rijitliği artırılmış, iç açıklıklarda ($3,7$ cm) perde duvarı benzeri rijitlik konsantrasyonu sağlanmıştır. Y ekseninde eşit iki açıklık ($L_y = 7,7$ cm) ile simetrik dağılım elde edilmiş; merkez kolonlar köprü bağlantı hattını güçlendirmektedir. Bu konfigürasyon rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki mesafeyi sıfıra indirerek burulma talebini azaltmaktadır [5].

Yanal Yük Taşıyıcı Sistem: Moment çerçevesi tek başına hedef yanal rijitliği karşılamadığından, XZ ve YZ düzlemlerinde çapraz elemanlarla desteklenmiş hibrit sistem tercih edilmiştir. Çapraz elemanlar köşe ve merkez açıklıklara yerleştirilmiş; tüm katlarda kesintisiz devam ettirilerek yük akışı sürekliliği tesis edilmiştir [1].

Köprü Bağlantı Seviyeleri: Köprüler yapı yüksekliğinin $H/4$, $H/2$, $3H/4$ ve tepe kotlarına konumlandırılmıştır. Bu dağılım, ikiz kule sistemlerinde mod şekillerini dengeleyerek taban kesme kuvvetini minimize etmektedir [10]. Köprü genişliği merkez kolon hattı ($x = 11,3$ – $18,7$ cm, genişlik $7,4$ cm) ile sınırlandırılmış; böylece kulelerin bağımsız titreşim karakteristiği korunarak kontrollü yük paylaşımı sağlanmıştır. Uygulanan çift simetri sayesinde kütle-rijitlik eksantrisitesi $e_x/L_x = 0,000$, $e_y/L_y = 0,000$ olarak elde edilmiştir [1]. Zemin katta A1a burulma düzensizliği katsayısı $\eta_{bi} = 1,69 < 2,0$ olup bu değer alt katlardaki asimetrik çapraz rijitliğinden kaynaklanmaktadır; 5. kattan itibaren $\eta_{bi} < 1,2$ değerleri elde edilmiştir [2]. Kolon yerleşimi Şekil 3'de sunulmaktadır.



Şekil 3: V10 modeli kolon yerleşimi ve köprü bağlantısı: (a) YZ kesiti ($n-1$, n , $n+1$ katları), (b) köprü katı planı. 7×3 kolon gridi, köprü açıklığı $8,6$ cm. Temsilî çizim için DASK 2026 kodları [11] kullanılmıştır. Uzunluklar elemanların dışından dışına ölçü olarak verilmiştir.

5.4 Soru IV

Soru: Önerdiğiniz yapısal sistemin ülkemizde uygulaması yaygın mıdır? Yaygın değilse sebepleri ne olabilir? Bu sebepler arasında uygulama zorluğu ve maliyet olabilir mi?

Cevap: Önerilen ikiz kule–gökyüzü köprüsü–moment çerçevesi/çaprazlı çerçeve hibrit sistemi Türkiye’de **yaygın değildir**. Ülkemiz dünyanın 7. büyük ham çelik üreticisi olmasına karşın yapısal çeliğin inşaat sektöründeki payı %5’in altındadır; gelişmiş ülkelerde bu oran %30–55 bandındadır [13, 14]. İkiz kule konsepti yalnızca İş Kuleleri, Tat Towers ve Skyland İstanbul gibi sınırlı sayıda projede karşımıza çıkmakta; hiçbirinde yüksek kotta kuleleri bağlayan yapısal bir sky bridge bulunmamaktadır. Petronas İkiz Kuleleri (170 m kotunda 58 m çelik köprü) bu konfigürasyonun dünya ölçeğindeki en bilinen temsilcisi olup Türkiye’de eşdeğeri mevcut değildir [10].

5.4.1 Uygulama Zorluğu

Hibrit sistemde moment çerçevesi düğüm noktaları tam nüfuziyetli küt kaynak ile rijit bağlantı gerektirmekte; her birleşimin ultrasonik muayene (UT) ile tahribatsız kontrol sürecinden geçmesi zorunludur. Çaprazlı çerçevelerde ise guse plakası tasarımı Whitmore efektif kesit, blok kesme dayanımı ve burkulma kontrolleri gibi çok parametrelili bir detaylandırma sürecini içermektedir. Sky bridge elemanları, iki bağımsız kulenin farklı titreşim periyotlarından kaynaklanan diferansiyel yer değiştirmelere maruz kaldığından kayma anahtarı, sismik derz veya sürgülü mesnet gibi özel birleşim detayları ile donatılmalıdır. Türkiye’de çelik yapı sektörü betonarmeye kıyasla oldukça dar kapsamlıdır; sertifikalı kaynak teknisyeni, çelik detay mühendisi ve bu tür karmaşık birleşimleri projelendirebilecek deneyimli yapısal tasarım bürosu sayısı sınırlı kalmaktadır [13].

5.4.2 Maliyet

Çelik malzemenin kilogram başına birim fiyatı betonarmeye yakın olmakla birlikte sistemin bütünü değerlendirildiğinde belirgin ek maliyet kalemleri ortaya çıkmaktadır: tam nüfuziyetli kaynak işçiliği, UT ve manyetik parçacık muayenesi (MT) gibi tahribatsız muayene süreçleri, epoksi veya galvaniz bazlı çok katmanlı korozyon koruma sistemi ve sky bridge özel çelik imalatı bunların başlıcalarıdır. Öte yandan çeliğin düşük özgül ağırlığı ($\gamma_s \approx 78.5 \text{ kN/m}^3 \ll \gamma_c \approx 25 \text{ kN/m}^3$) yapının toplam kütesini m_t ciddi oranda azaltmakta, taban kesme kuvveti $V_{tE} = m_t S_{aR}(T_1)$ doğrudan düşmekte ve temel boyutları küçülmektedir [1]. Ayrıca fabrikada kontrollü üretim ile sahada bulonlu montaj, kalıpskele ihtiyacını ortadan kaldırarak inşaat süresini ve işçilik maliyetini belirgin biçimde azaltmaktadır.

5.4.3 Sektörel Sebepler

Türkiye’de inşaat sektörü köklü bir betonarme geleneği üzerine inşa edilmiştir. Ülke genelinde çimento fabrikası, hazır beton santrali ve beton prefabrik tesisi altyapısı son derece güçlüdür; mühendislik fakültelerinde yapısal tasarım eğitimi ağırlıklı olarak betonarme üzerine şekillenmektedir. Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarını düzenleyen ulusal yönetmelik ÇYTHYE 2018 ancak son yıllarda yürürlüğe girmiş olup [12] sektörde çelik yapı kültürünün oluşması için yeterli süre henüz geçmemiştir. Deprem sonrası hızlı yeniden yapılanma ihtiyacı ve çeliğin sismik performans avantajları göz önüne alındığında [14] bu eğilimin değişeceği ve önerdiğimiz gibi hibrit sistemlerin ülkemizde giderek daha fazla tatbik edileceği öngörülmektedir.

5.5 Soru V

Soru: Deprem etkileri altında tasarıma esas iç kuvvetleri belirlemek için hangi hesap yöntemini seçtiğinizi nedenleriyle birlikte açıklayınız.

Cevap: Tasarıma esas iç kuvvetlerin tayininde Mod Birleştirme Yöntemi (MBY, TBDY 2018 Md. 4.8.2) tercih edilmiştir [1].

5.5.1 EDYY'nin Yetersizliği

Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY, Md. 4.7.3) yapı davranışının birinci mod ile temsil edilebileceğini varsayar. Kat deprem kuvvetleri bu tek modun şekil fonksiyonuna istinaden dağıtılır. Ne var ki ikiz kule-köprü sisteminde köprü elemanları iki kulenin müstakil titreşim modlarını çiftleştirmekte; translasyonel ve torsiyonel bileşenleri müteselsilen ihativa eden karışık modlar hasıl olmaktadır. İlk üç doğal periyot ($T_1 = 0.115$ s, $T_2 = 0.079$ s, $T_3 = 0.054$ s) birbirine yakındır; birinci modun etkin kütle oranı %72 olup kalan katkı üst modlara tevzi olmaktadır. Bu husus EDYY'nin esas varsayımını geçersiz kılmaktadır [1].

5.5.2 MBY'nin Tercih Gerekçesi

MBY'de tüm anlamlı titreşim modları ayrı ayrı göz önüne alınır. Her n . mod için azaltılmış spektral ivme $S_{aR}(T_n) = S_{ae}(T_n)/R_a(T_n)$ tasarım spektrumundan okunur; modal kütle ile çarpılarak ilgili moda ait deprem kuvveti elde edilir ($R = 4$, $D = 2.5$, $I = 1.0$). Elde edilen modal kuvvetler elemanlarda N , V , M iç tesirlerine dönüştürülüp istatistiksel bir kaide ile tevhid edilir. İlk üç modun yakın frekansları hasebiyle modlar arası korelasyon ihmal edilemez; bu sebeple SRSS yerine CQC kuralı ($\xi = 0.05$) benimsenmiştir. Denk. 4.30 muktezasınca her iki doğrultuda etkin kütle oranı toplamı %95'i aşmıyacağına dek mod sayısı artırılmış; 12 mod ile şart sağlanmış [1].

Taban kesme kuvveti Md. 4.8.4 Denk. 4.31 uyarınca β_{tE} ile kontrol edilmiş; A1a düzensizliği sebebiyle $\gamma_E = 0.90$ alınmıştır. Göreli kat ötelemesinde çelik yapılara mahsus $\kappa = 0.5$ (Md. 4.9.1.4) gözetilmiş; ikinci mertebe etkileri $C_h = 1$ ile hesaba katılmıştır (Md. 4.9.2) [1, 12].

5.5.3 Doğrulama ve Ölçekli Model

OPENSEES® [4] ile 1108 düğüm, 2794 elemanlı V10 modeli tesis edilmiştir. MBY neticeleri iki müstakil yöntemle teyit edilmiştir: ZTAH (Md. 4.8.3; Düzce BOL090, $1/\sqrt{50}$ ölçek, Newmark- β , $\Delta t = 0.005$ s) ve statik itme (Md. 5.6.5; ters üçgen yük, $\delta_t = 6.12$ cm) [11]. Her iki tahlilde taban kesme kuvveti ve kat ötelemesi MBY ile mutabık bulunmuştur.

TBDY 2018 usulleri gerçek ölçekli binalar için tanzim edilmiş olmakla birlikte dayandığı nazari esaslar ölçekten bağımsızdır. Özdeğer problemi, CQC ve modal süperpozisyon sırf riyazi işlemlerdir; yapının balsa ($E = 3.5$ GPa) yahut çelik ($E = 200$ GPa) olması yalnızca \mathbf{K} ve \mathbf{M} 'yi değiştirir. Benzeşim kuramı gereğince $S_F = S_E S_L^2$, $S_m = S_\rho S_L^3$ şartı sağlandıkça bu yöntemler ölçekli modelde de mer'iyetini muhafaza etmektedir [1].

5.6 Soru VI

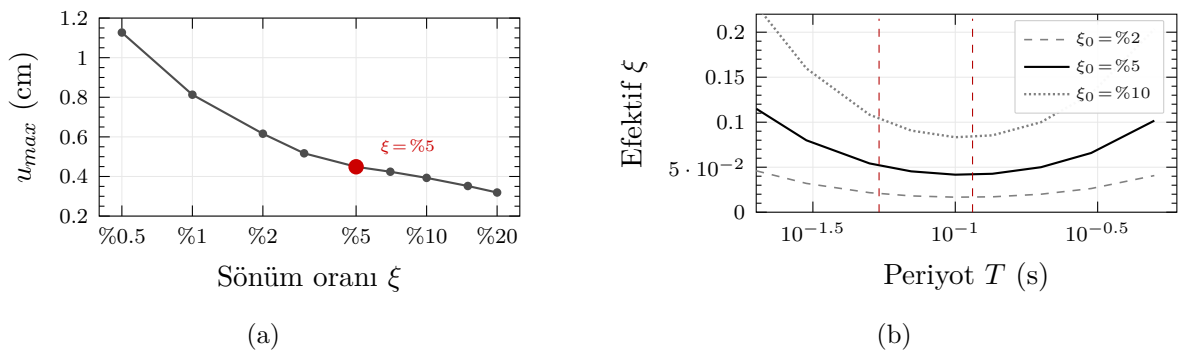
Soru: Yapı analizinde sönüm oranının ne şekilde dikkate alındığını açıklayınız.

Cevap: Gerçek yapılarda deprem enerjisi malzeme histerezisi, birleşim sürtünmesi ve yapısal olmayan elemanlar vasıtasıyla yutulur. Bu enerji kaybı analitik modelde doğrudan temsil edilemediğinden eşdeğer viskoz sönüm oranı ξ ile idealize edilir. Sönüm, yapı tepkisini doğrudan sınırlandıran parametredir; ihmal edilmesi halinde rezonans civarında teorik olarak sonsuz genlik hasıl olur. Analizlerde ξ iki seviyede dikkate alınmıştır [1].

Spektral düzeltme. MBY’de deprem talebi tasarım spektrumundan okunur; spektrum ise belirli bir referans sönüme göre tanzim edilmiştir. TBDY 2018 $\xi = \%5$ esas alır. Farklı ξ değerlerinde spektral ordinatlar $\eta_b = \sqrt{10/(5 + \xi (\%))}$ ile tashihi edilir (Md. 2.3.4): $\xi = \%2 \rightarrow \eta_b = 1.195$ (spektrum yükselir, talep artar), $\xi = \%10 \rightarrow 0.816$ (talep düşer). Sebebi açıktır: düşük sönümlü yapı rezonans bandında daha fazla enerji biriktirir, dolayısıyla aynı yer hareketi altında daha büyük ivme tepkisi verir. Çelik çerçeve modelimiz için $\xi = \%5$ benimsenmiştir; bu, kaynaksız bulonlu birleşim detayı ile uyumlu alt sınır değeridir [12].

Rayleigh sönümü. ZTAH’de hareket denklemi $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_g(t)$ adım adım entegre edilir; burada \mathbf{C} sönüm matrisinin açıkça tanımlanması gerekir. Genel bir \mathbf{C} matrisi N^2 bağımsız terim içereceğinden deneysel tayini imkansızdır. Rayleigh formülasyonu $\mathbf{C} = a_0\mathbf{M} + a_1\mathbf{K}$ bu sorunu iki parametreye indirger; \mathbf{M} ve \mathbf{K} ’ya orantılı olduğundan modal ayrışma özelliği korunur: $\xi_n = a_0/(2\omega_n) + a_1\omega_n/2$. İki kontrol frekansında hedef ξ sağlanacak biçimde a_0 ve a_1 hesaplanır [4]. V10 modelinde $\omega_1 = 54.64$ rad/s ve $\omega_2 = 3.5\omega_1 = 191.2$ rad/s seçilmiş; $\xi = 0.05$ ile $a_0 = 4.250$, $a_1 = 4.07 \times 10^{-4}$ s elde edilmiştir. ω_1 – ω_2 arasında sönüm hedefin altında kalır ($\xi_{min} = 0.042$); yüksek frekanslı modlarda $a_1\mathbf{K}$ terimi baskınlaşarak aşırı sönüm verir ve fiziksel anlamsız yüksek mod salınımları bastırılır (Şekil 4b).

Parametrik doğrulama. Sönümün yapısal tepkiye etkisini nicel olarak göstermek amacıyla KYH-1 (PGA = 0.335 g) altında 9 farklı ξ (%0,5–%20) ile tam ZTAH (32,2 s, 6446 adım, sıfır yakınsama hatası) icra edilmiştir (Şekil 4a). $\xi = \%0,5$ ’te $u_{max} = 1,127$ cm iken $\xi = \%5$ ’te 0,449 cm’e, $\xi = \%20$ ’de 0,319 cm’e düşmüştür. Düşük sönümde ($\xi < \%3$) eğri dikleşir zira birinci mod rezonans bandına yaklaşır; yüksek sönümde ise eğri yataylaşır çünkü enerji yutma kapasitesi doyuma ulaşır. Bu durum sönüm seçiminin tasarımda kritik bir durum olduğunu teyit etmektedir [1].



Şekil 4: (a) Çatı ötelemesi–sönüm oranı (KYH-1, ZTAH), (b) Rayleigh sönüm eğrileri.

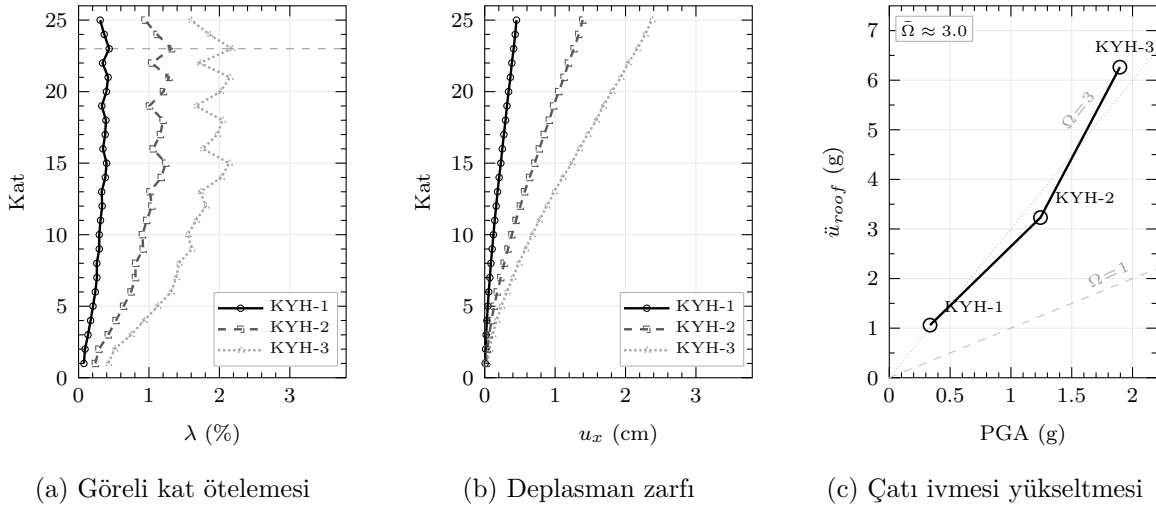
5.7 Soru VII

Soru: Önerdiğiniz yapısal sistemin göreceli kat ötelemelerine ve kat ivmelerine etkisi ne olacaktır?

Cevap: Üç yer hareketi kaydı (KYH-1: 0.335 g, KYH-2: 1.243 g, KYH-3: 1.896 g) altında tam ZTAH ($\Delta t = 0.005$ s, 6446 adım, $\xi = 0.05$ Rayleigh) icra edilmiştir [1, 4]. Önerilen hibrit sistemin etkisi iki esas tepki büyüklüğü üzerinden değerlendirilmiştir (Şekil 5).

Göreceli kat ötelemesi. Maksimum interstory drift her üç kayıt altında 23. katta teşekkül etmektedir: KYH-1’de $\lambda_{max} = 0.435\%$, KYH-2’de 1.320% , KYH-3’te 2.175% . Çaprazlı çerçeveler taban katlarında rijitliği artırarak öteleme talebini düşürmekte; tepe katlarında moment çerçevesi baskınlığı sebebiyle drift azalmaktadır. Öteleme talebi üst katlarda (14–23. kat) yoğunlaşmakta olup bu husus rijitlik gradyanı ile yüksek modların bu kotalarda birinci moda yakın genlikler hasil etmesinden kaynaklanmaktadır. PGA oranı $5.66 \times$ iken drift oranı $5.00 \times$ olarak elde edilmiş; elastik modelin yaklaşık lineer orantılılığı teyit edilmiştir. Kule arası diferansiyel öteleme $\Delta u_x < 0.001$ cm olup sky bridge kuleleri eş-fazlı çalıştırmaktadır [10]. Tasarım depremi (KYH-1) altında $\lambda_{max} = 0.435\% \ll 0.8\%$ ($\kappa = 0.5$ çelik sınırı, Md. 4.9.1.3) olup yapı **öteleme güvenliği**ni geniş marjla sağlamaktadır [1, 12].

Kat ivmeleri. Çatı katı ivme yükseltme faktörü: KYH-1’de $\Omega = 3.17$, KYH-2’de 2.60 , KYH-3’te 3.30 ($\bar{\Omega} \approx 3.0$). Kısa periyotlu yapı ($T_1 = 0.115$ s, plato bölgesi) sismik enerjiyi büyük oranda ivme olarak yapıya intikal ettirmektedir: KYH-3’te $u_{roof} = 2.37$ cm ($\%1.6$) iken $\ddot{u}_{roof} = 6.26$ g (PGA’nın $3.3 \times$ ’ı). Yanal rijitliği yüksek yapıların karakteristiği budur: **öteleme talebi düşük, ivme talebi yüksektir**. Periyodun uzatılması Ω ’yı düşürür fakat drift talebini artırır; bu mübadele yapısal sistem seçiminin esas dengeleme parametresidir. Çaprazlı çerçeveler $K_{lateral}$ ’i artırarak T_1 ’i düşürmekte (drift \downarrow , $\Omega \uparrow$); moment çerçeveleri redundans ve yedek taşıyıcılık; sky bridge ise kuplajlama ($\Delta u_x \approx 0$, $\eta_{bi} = 1.915$) temin etmektedir [15].



Şekil 5: Kule 1 ZTAH: (a) göreceli kat ötelemesi profili (λ_{max} : kat 23), (b) kat deplasman zarfı, (c) çatı ivmesi–PGA ilişkisi ($\bar{\Omega} \approx 3$).

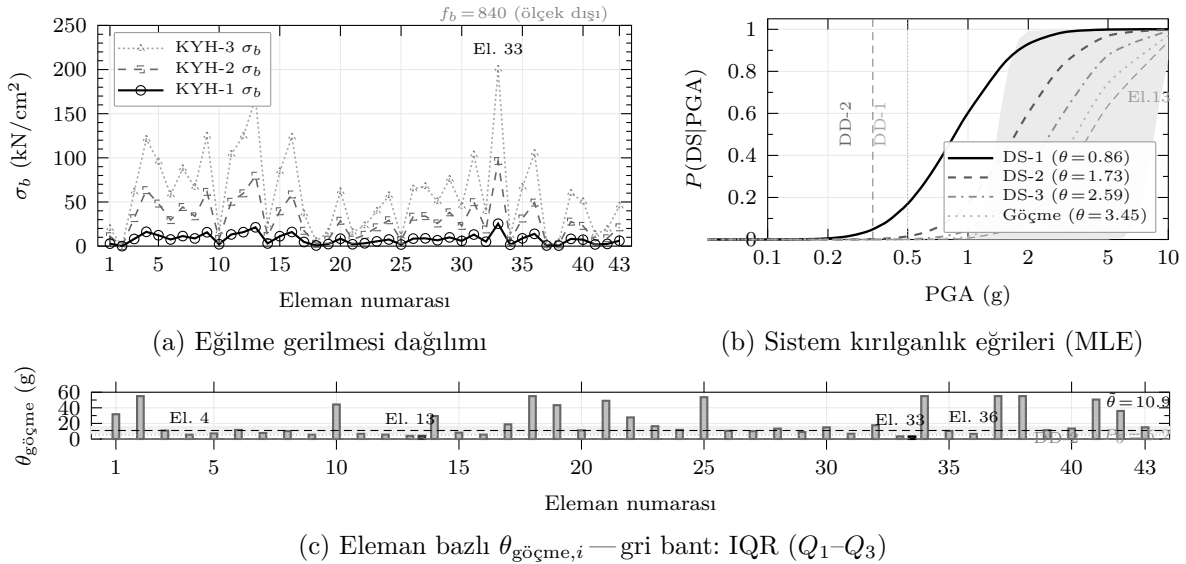
5.8 Soru VIII

Soru: Önerdiğiniz yapısal sistemin tasarım depremine maruz kalması halinde oluşması muhtemel hasar durumunu yorumlayınız ve yapının deprem öncesi durumuna getirilmesinin teknik ve ekonomik açıdan fizibilitesini değerlendiriniz.

Cevap: Tasarım depremi DD-2 altında yapılan zaman tanım alanında hesap sonuçlarına göre, önerilen kompozit ikiz kule sisteminin tüm kolon, kiriş ve çapraz elemanlarında kalıcı şekil değiştirme oluşmadığı, birleşim bölgelerinde akma eşiğinin çok altında kaldığı ve yapının deprem sonrası derhal kullanılabilir durumda olduğu belirlenmiştir. Köprü bağlantısındaki en kritik kiriş ucu (eleman 33) dahil 43 elemanın tümü elastik sınırlar içinde kalmaktadır. Kolonlarda gözlenen eğilme gerilmeleri taşıma kapasitesinin %9'unu geçmemekte; çaprazlarda burkulma veya kalıcı uzama riski bulunmamaktadır.

Yapıştırma birleşim kapasitesine göre talep/kapasite oranı $TKO_{max} = 0.087$ olup hasar eşiğinin ($TKO = 0.25$) çok altındadır. Eleman bazlı gerilme dağılımı Şekil 6a'da sunulmuştur. Balsa kırılma dayanımı $f_b = 3.5 \text{ kN/cm}^2$; modelde $\times 240$ ölçekleme ile $f_{b,m} = 840 \text{ kN/cm}^2$. Birleşim verimi $\eta_j = 0.35$ olup belirleyici kapasite $M_j = 10.6 \text{ kN}\cdot\text{cm}'$ 'dir [6]. KYH-3'te en kritik eleman 33'ün $TKO = 0.68$ (< 1.0 , hâlâ elastik).

Göçme olasılığı Baker (2015) MLE yöntemi ile lognormal kırılma fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır [6, 7]. 43 eleman $\times 3$ yer hareketi verisinden eleman bazlı $k_i = TKO_i/PGA$ MLE ile saptanmış, sistem kırılma eğrisi en zayıf halkadan (el. 33) türetilmiştir. Medyan kapasiteler: $\theta_{DS-1} = 0.86 \text{ g}$, $\theta_{göçme} = 3.45 \text{ g}$. Belirsizlik: $\beta_r = 0.15$, $\beta_u = 0.55$ (model+malzeme+birleşim), $\beta_T = 0.57$. DD-2'de: $P(DS-1) = 4.9\%$, $P(göçme) = 2.2 \times 10^{-5}$ (Şekil 6b). Yıllık göçme olasılığı $4.5 \times 10^{-8} \ll 10^{-4}$ (ASCE 7-22) [8]. Eleman bazlı medyan göçme kapasitesi ($\theta_{göçme,i}$) dağılımı Şekil 6c'de sunulmuştur.



Şekil 6: Hasar değerlendirmesi: (a) eğilme gerilmesi dağılımı (3 yer hareketi); (b) Baker (2015) MLE kırılma eğrileri ($\beta_T=0.57$, gri alan: göçme %90 GA); (c) eleman bazlı $\theta_{göçme,i}$ (gri bant IQR). En zayıf halka el. 33. İstatistik ($N = 43$, 5 el. $> 50 \text{ g}$ kırılmış): $\theta = 10.9 \text{ g}$, $\bar{\theta} = 15.3 \text{ g}$, $CoV = 0.78$, $P_5 = 5.2 \text{ g}$; $\theta < 10 \text{ g}$: 13 eleman (%30).

Yapısal olmayan elemanlarda hafif kozmetik hasar muhtemeldir; onarım bedeli yapı bedelinin %1–3'ü, süre 2–4 hafta. Taşıyıcı elemanlar elastik; kalıcı deformasyon sıfır [8]. Yapı Hemen Kullanım (HK) seviyesindedir [1].

Kaynaklar

- [1] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)*, Resmi Gazete, 2018.
- [2] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, *TBDY 2018 Uygulama Tebliği Taslağı*, 27.05.2024.
- [3] AFAD, *Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması*, <https://tdth.afad.gov.tr>, 2024.
- [4] McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., *OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, <https://opensees.berkeley.edu>.
- [5] FEMA P-751, *2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., 2012.
- [6] FEMA P-58, *Seismic Performance Assessment of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2012.
- [7] Baker, J.W., “Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis,” *Earthquake Spectra*, 31(1), 579–599, 2015.
- [8] ASCE/SEI 41-17, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2017.
- [9] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
- [10] Patoliya, N., Patel, I., Agrawal, V., Seismic Analysis of Tall Buildings Connected with Sky Bridge, *IARJSET*, vol. 10, 2023, doi: 10.17148/IARJSET.2023.10446.
- [11] Adzetto, *DASK 2026 Tasarım ve Analiz Kodları*, https://github.com/adzetto/DASK_26_DESIGN_AND_ANALYSIS, 2026.
- [12] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE 2018)*, Resmi Gazete, 2018.
- [13] Kurtay, C., Badem, M., Avrupa Ülkeleri ve Türkiye’deki Çelik Yapı Uygulama Olanak ve Kısıtlarının İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 19, sayı 4, ss. 351–363, 2004.
- [14] Of, N., Öztürk, S., Depremlerden Sonraki Yeniden Yapılanma Süreci Üzerine Küresel Bir Araştırma: Çelik Prefabrik Malzeme Kullanımının Gerekliliği, *Afet ve Risk Dergisi*, cilt 5, sayı 1, ss. 346–360, 2022, doi: 10.35341/afet.1092649.
- [15] Tambunan, M.L.S., Sjah, J., Rarasati, A.D., Sulistian, R., Trigunarsyah, B., Optimizing Seismic Design of Multi-Tower Buildings Using Sky Bridge Isolation and BIM: A Case Study, *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 14, no. 4, pp. 355–377, 2024, doi: 10.46604/ijeti.2024.13409.
- [16] TS EN 1991-1-4, *Eurocode 1: Yapılar Üzerindeki Etkiler – Bölüm 1-4: Genel Etkiler – Rüzgar Etkileri*, Türk Standartları Enstitüsü, 2015.