Yapı–Kazık–Zemin Etkileşimi: Genel Bir Giriş

Derin Temellerin Geoteknik Tasarımı ve Sismik Etkileşim Analizleri

Dr. İnş. Müh. Ozan BİLAL
Geoproje Mühendislik ve Danışmanlık

İnşaat Mühendisleri Odası — Meslekiçi Eğitim Programı

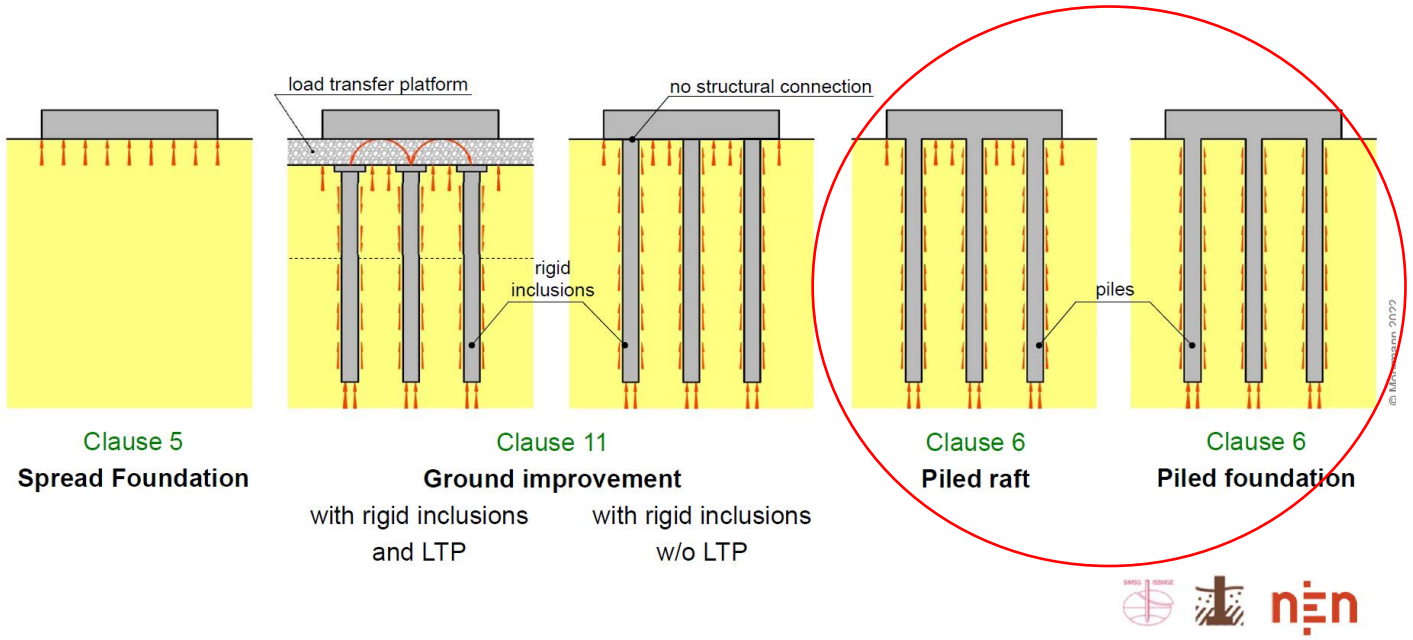
Sunum İçeriği

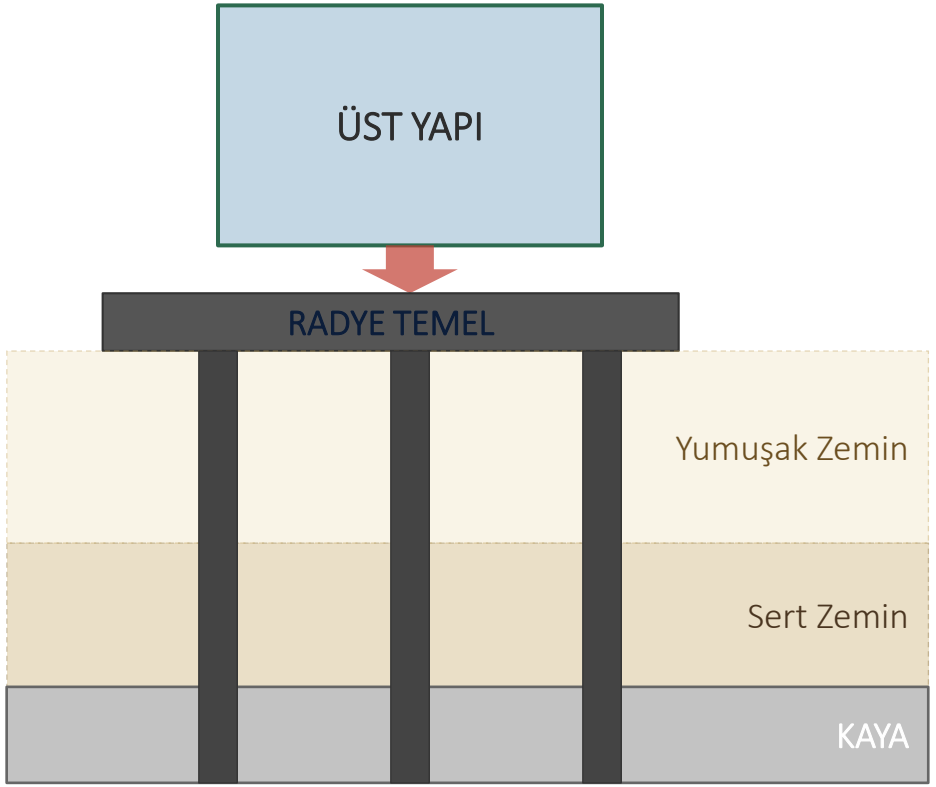
- Neden Derin Temeller? — Tanım ve Gereklilik
- Derin Temel Tipleri — Sınıflandırma
- Deprem Hasar Örnekleri — Kobe, Niigata, Tohoku
- Yönetmelik Çerçevesi — TBDY 2018 vs EN 1997-3
- Derin Temel Tasarım Akış Şeması
- Zemin Davranışı ve Deprem Etkisi
- Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi (SSI)
- Eylemsizlik ve Kinematik Etkileşim
- Kazık-Zemin Etkileşim Modelleri (Temsil(p-y, t-z, Q-z), Sürekli Ortam)
- Çözüm Yöntemleri — Altsistem vs Direkt
- TBDY 2018 — Yöntem I-II-III
- Sonuç ve Öneriler

Neden Derin Temeller?

Tanım ve İşlev
- Üstyapı yüklerini zeminin derin tabakalarına ileten elemanlar
- Yüksek katlı yapılar, köprüler, makine temelleri
- Güvenli oturma limitleri sağlar

Kullanım Gereklilikleri
- Yetersiz yüzey taşıma gücü
- Yüksek sıkışabilirlik gösteren üst tabakalar
- Sıvılaşma riskinin azaltılması





Moormann, C., & Burlon, S. (2024). Eurocode 7-second generation-piled foundations. In Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society (pp. 1840-1845). CRC Press.

Derin Temel Tipleri

(a) Kayaya Soket/Oturan Kazıklar
Yükleri sert kaya tabakasına ileten uç direnci baskın kazıklar

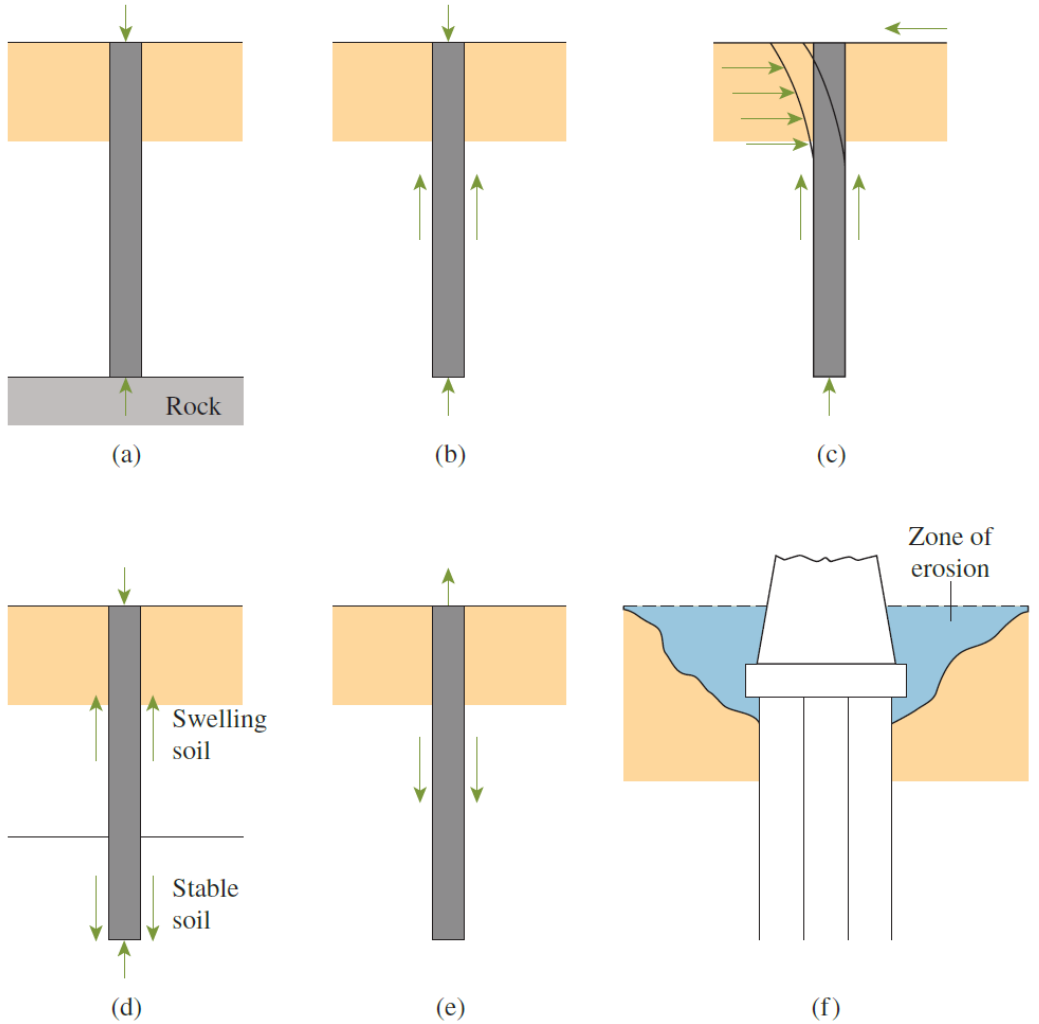
(d) Şişen/Göçen Zemin
Hacim değişimine maruz zeminlerde stabilite sağlayan kazıklar

(b) Yüzen (Sürtünme) Kazıklar
Çevre sürtünmesi ile yük taşıyan, kaya seviyesine ulaşmayan kazıklar

(e) Çekme Kazıkları
Kaldırma kuvvetlerine karşı ankraj görevi gören kazıklar

(c) Yanal Yüklü Kazıklar
Rüzgar, deprem ve toprak basıncına karşı direnç sağlayan kazıklar

(f) Erozyon Bölgesi
Aşınma riski olan alanlarda yeterli gömme derinliği sağlayan kazıklar



Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). Principles of foundation engineering. Cengage learning.

Yetersiz Kazık Tasarımı — Deprem Hasar Örnekleri

1964 Niigata depreminde 2 m'lik zemin yer değiştirmesinin bir kazıkta oluşturduğu hasar.

1995 Kobe depreminde bir kazığın, zeminin yer değiştirmesi neticesinde kesilmesi.

Kobe depremi, 1995

Zeminde 1 metreden fazla hareket eden bir vinç rayını destekleyen hasarsız kazık.

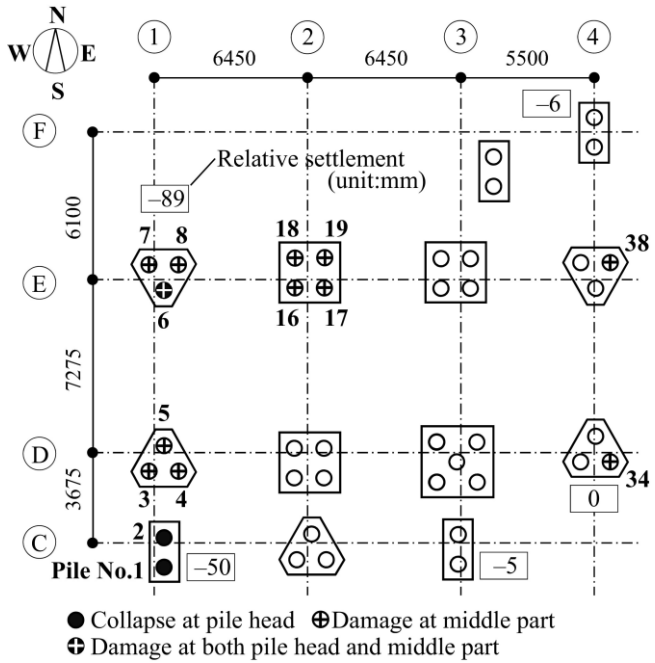
Hasarsız kazıklı köprü ile kazık olmayan köprü yaklaşım dolgusu; **Nihon-kai-chubu depremi, 1983.**

Kazık-zemin etkileşimi ve SSI ihmal edildiğinde, yapısal güvenlik ciddi risk altına girer.

Finn, W. D. L., & Fujita, N. (2002). Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12), 731-742.

Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi (YKZE)

Tohoku earthquake, 2011



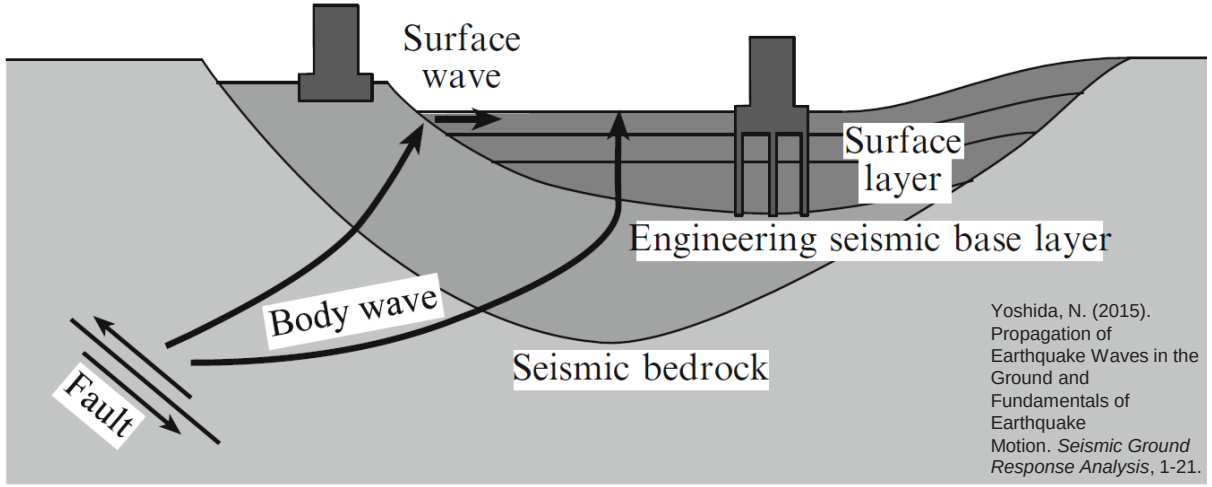
Kaneko, O., Kawamata, S., Nakai, S., Sekiguchi, T., & Mukai, T. (2018). Analytical study of the main causes of damage to pile foundations during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Japan Architectural Review, 1(2), 235-244.

Adım Adım Tasarım Akış Şeması

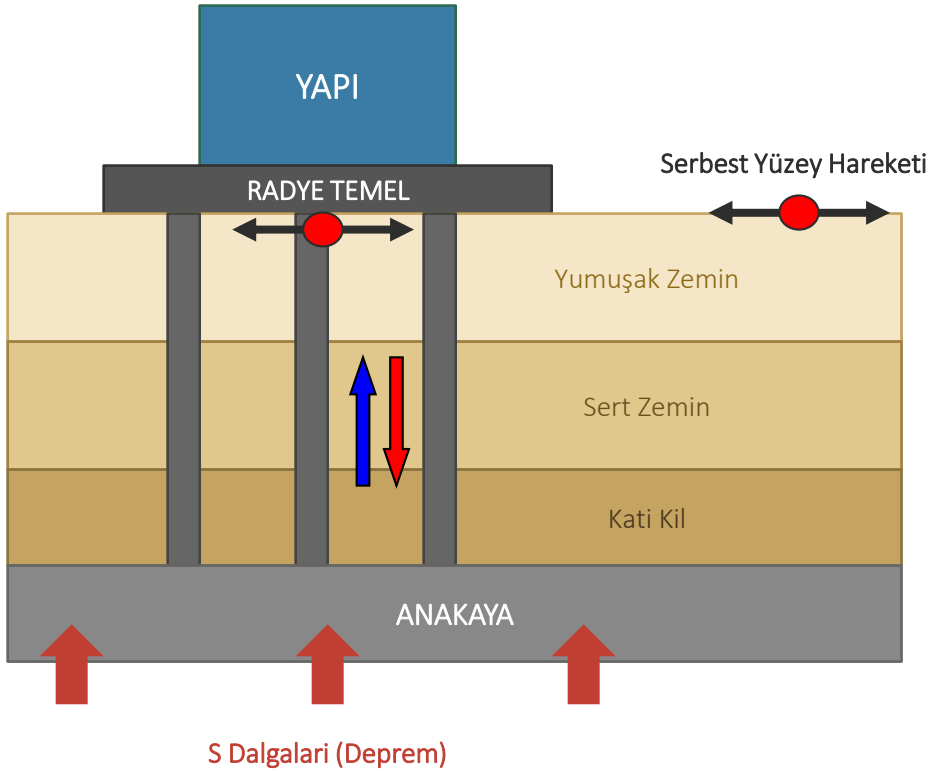
Yönetmelik Çerçevesi: TBDY 2018 vs EN 1997-3:2025

Kriter	TBDY 2018	EN 1997-3:2025
Kapsam	Yerinde dökme ve çakma kazıklar	Tüm kazık tipleri, kazıklı radyeler
Taşıma Gücü	Statik yükleme, zemin özellikleri, dinamik deneyler	Zemin Modeli + Model Kazık Yöntemi + Kazık Yükleme
Dayanım Katsayıları	γR tablosu (Tablo 16.4)	γRc, γRb, γRs + Model faktörü γRd
Sınır Durumlar	ULS odaklı, SLS genel	ULS + SLS detaylı, downdrag dahil
Deneyler	DTS 1,1a,2,2a: min 2 adet statik	Statik, dinamik, hızlı yük deneyleri

Zemin Davranışı ve Deprem Etkileri



Yoshida, N. (2015). Propagation of Earthquake Waves in the Ground and Fundamentals of Earthquake Motion. *Seismic Ground Response Analysis*, 1-21.

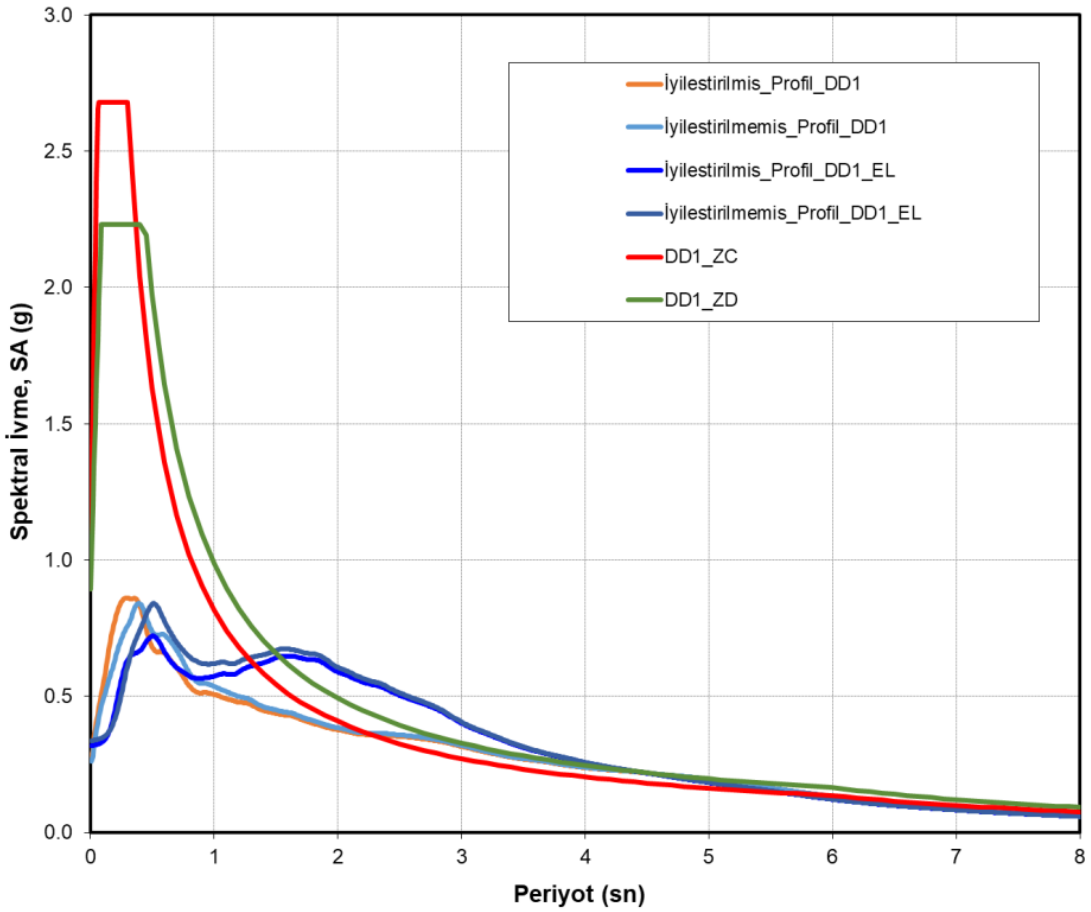


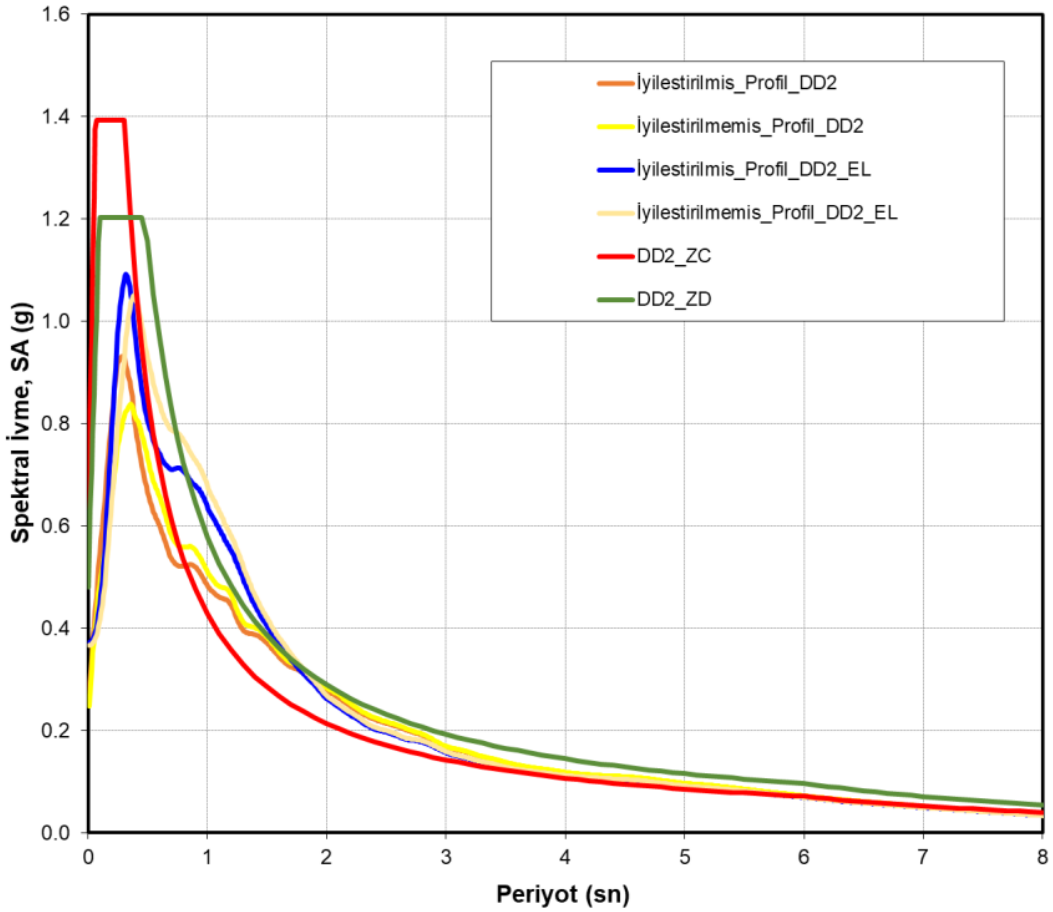
Sismik Dalga Yayılımı
- S ve P dalgalarının düşey yayılımı
- Anakaya → yatay zemin tabakalarından geçiş
- Tabaka sınırlarından kırılıp yansıma

Zemin Büyütmesi/Küçültmesi (De/Amplifikasyon)
- Yumuşak zeminlerde belirli periyotlarda artış
- $G_o = \rho \cdot V_s^2$ (başlangıç kayma modülü)

1-D Saha Tepki Analizi
- SHAKE / DEEPSOIL yazılımları
- G/Gmax azalım ve sönüm eğrileri

Zemin Davranışı ve Deprem Etkileri





Zemin Davranışı ve Deprem Etkileri

DD-1	F_S	F_1	S_S	S_1	S_{DS}	S_{D1}
ZC (TDTH)	1.200	1.430	2.232	0.570	2.678	0.815
ZD (TDTH)	1.000	1.730	2.232	0.570	2.232	0.986
Durum 1	0.377	0.940	2.232	0.570	0.842	0.536
Durum 2	0.385	0.889	2.232	0.570	0.860	0.507
Durum 3	0.377	1.086	2.232	0.570	0.841	0.619
Durum 4	0.323	1.006	2.232	0.570	0.722	0.573

DD-2	F_S	F_1	S_S	S_1	S_{DS}	S_{D1}
ZC (TDTH)	1.200	1.500	1.161	0.285	1.393	0.285
ZD (TDTH)	1.036	2.030	1.161	0.285	1.203	0.579
Durum 1	0.722	1.807	1.161	0.285	0.838	0.515
Durum 2	0.802	1.708	1.161	0.285	0.931	0.487
Durum 3	0.904	2.425	1.161	0.285	1.050	0.691
Durum 4	0.940	2.258	1.161	0.285	1.091	0.644

	F_S	F_1	S_S	S_1	S_{DS}	S_{D1}
DD-1	1.200	1.730	2.232	0.570	2.678	0.986
DD-2	1.200	2.425	1.161	0.285	1.393	0.691

Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi (SSI) Nedir?

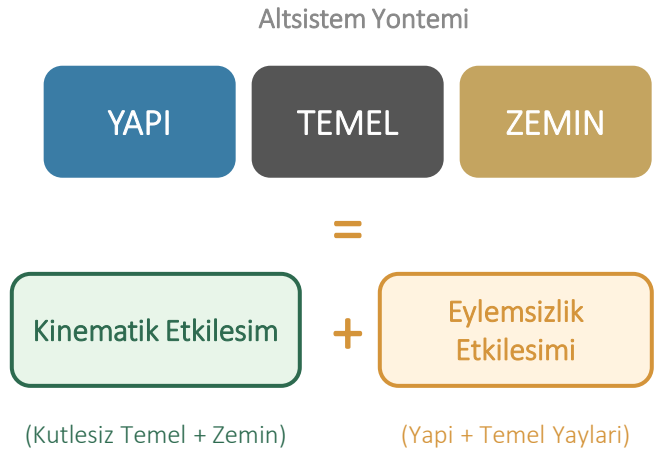
Yapının dinamik yükler altındaki davranışının, temellendiği zeminin dinamik davranışıyla birlikte değerlendirilmesidir.

Yapı Mühendisliği + Geoteknik Deprem Müh. + Deprem Müh. ortak alanı

SSI Etkisinin Önemi Kriteri (NIST GCR 12-917-21):

$h' / (Vs \cdot T) > 0.1 \rightarrow$ SSI etkileri önemli

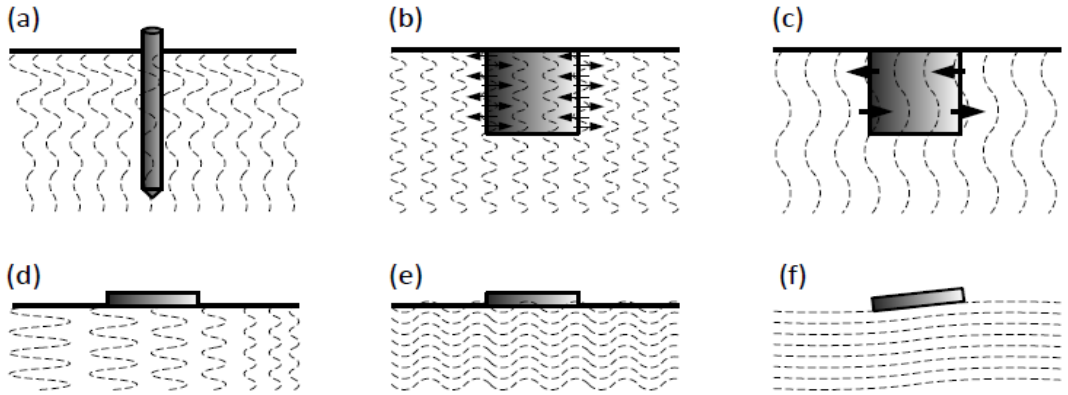
h' : Efektif yapı yüksekliği ($\approx 2/3$ Hn)
Vs : Ortalama efektif kayma dalgası hızı
T : Sabit-taban temel periyodu



Kinematik Etkileşim

Taban Plağı Ortalaması

- Dalga uyumsuzluğundan kaynaklanan azalımlar
- Farklı zamanlarda temele ulaşan sismik dalgalar
- Kısa periyodlarda daha belirgin etki
- Geniş temel oturumlu rijit yapılar için önemli

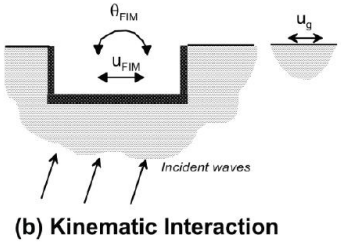


Analitik Yaklaşımlar

- Nikolaou vd. (2001) — Rijitlik kontrastı
- Mylonakis (2001) — Tabaka arayüzü momentleri
- Di Laora (2009) — Doygun zemin etkileri

Gömme Derinliği Etkisi

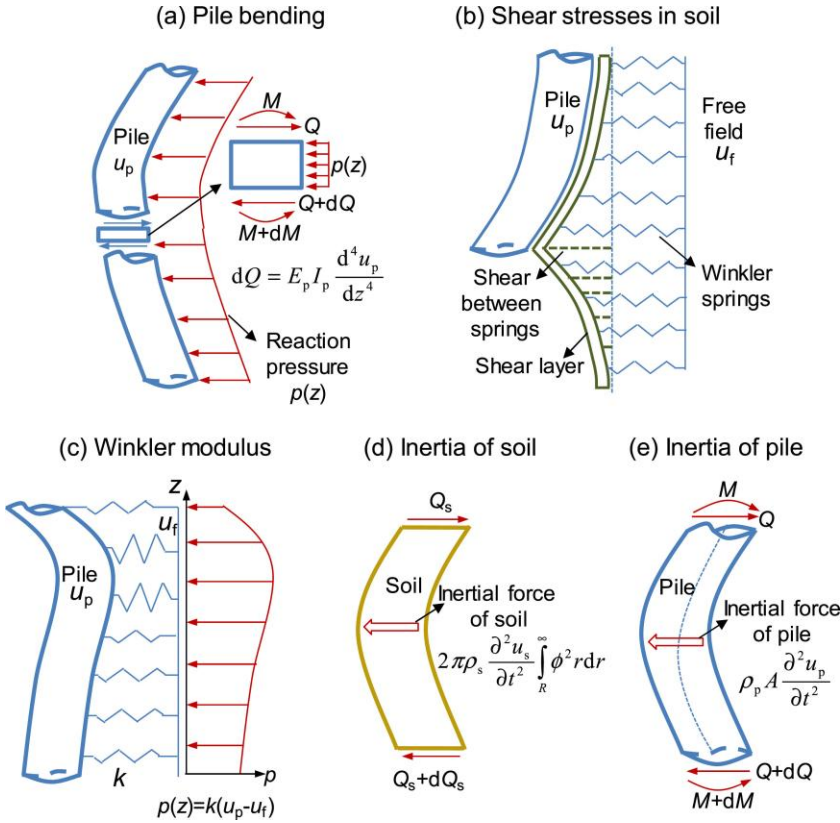
- Gömme derinliği arttıkça spektral ordinatlarda azalma
- Sadece zeminlere uygulanır (A/B kayada değil)
- Serbest-saha hareketindeki derinlik azalımı



5 Fiziksel Mekanizma

- Zemin tabakası kontrastı
- Sınır koşulları etkisi
- Kazık grubu etkileşimi
- Radye-zemin temas etkisi
- Derin temel gömme etkisi

(Zhang vd. 2018)



Eylemsizlik Etkileşimi

Temel girdi hareketinin etkisiyle; yapı, temel ve zemin arasındaki dinamik etkileşim — 3 bileşen:

1

Periyod Uzatma

Temelin esnekliğinden kaynaklı bina periyodundaki artış. Deplasman tepkisini artırır, ivme tepkisini azaltabilir veya artırabilir.

2

Yayılım Sönümü

Temel ile serbest-saha hareketlerinin birbirine göreli hareketinden kaynaklanan dalga enerjisinin sönümlenmesi (Radiation Damping).

3

Zemin Sönümü

Çevrimsel yük altında parçacık sürtünmesinden kaynaklanan histeretik sönüm. Deformasyon arttıkça sönüm oranı da artar.

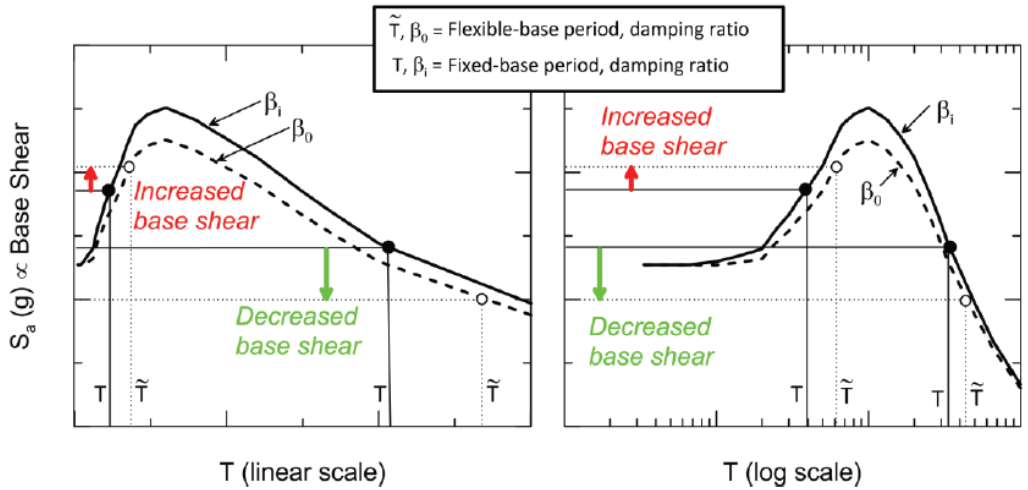
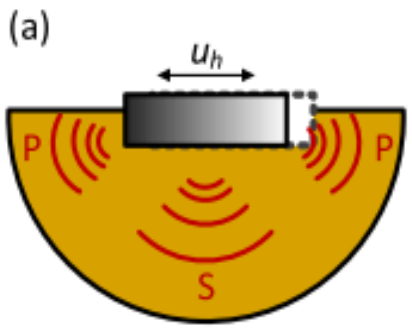
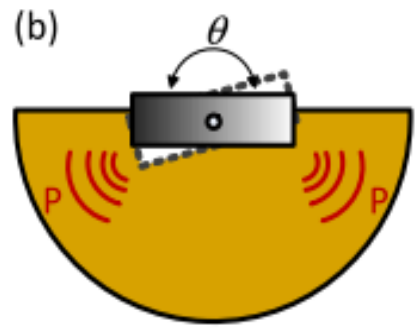
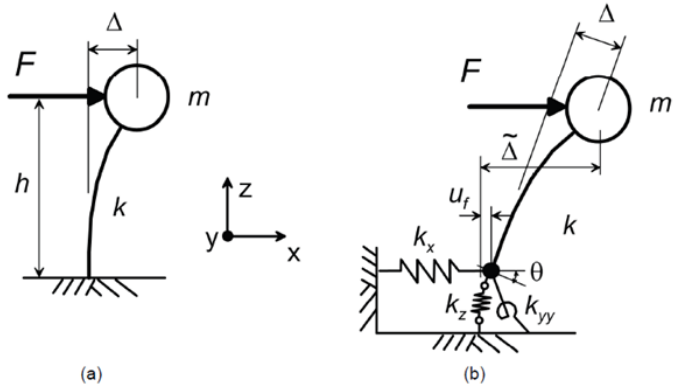


Figure 2-3 Illustration of inertial SSI effects on spectral acceleration (base shear) associated with period lengthening and change in damping.





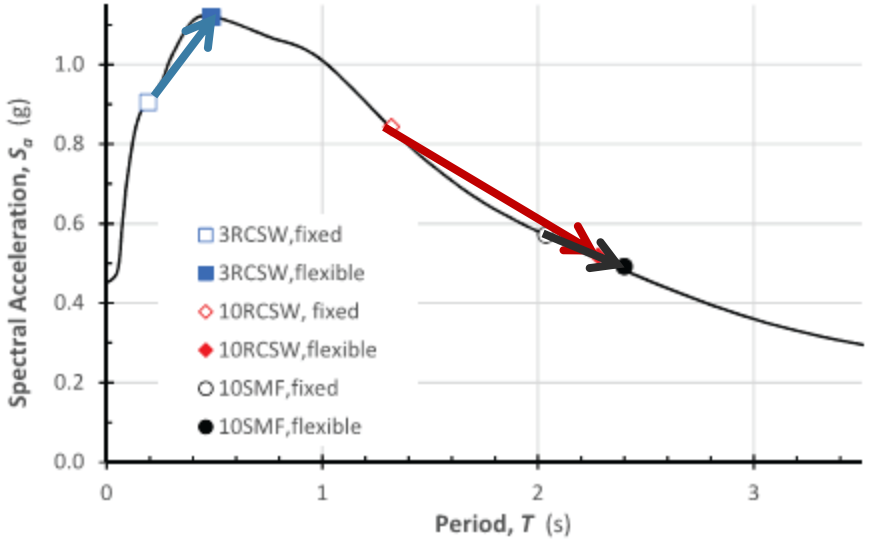
Eylemsizlik Etkileşimi

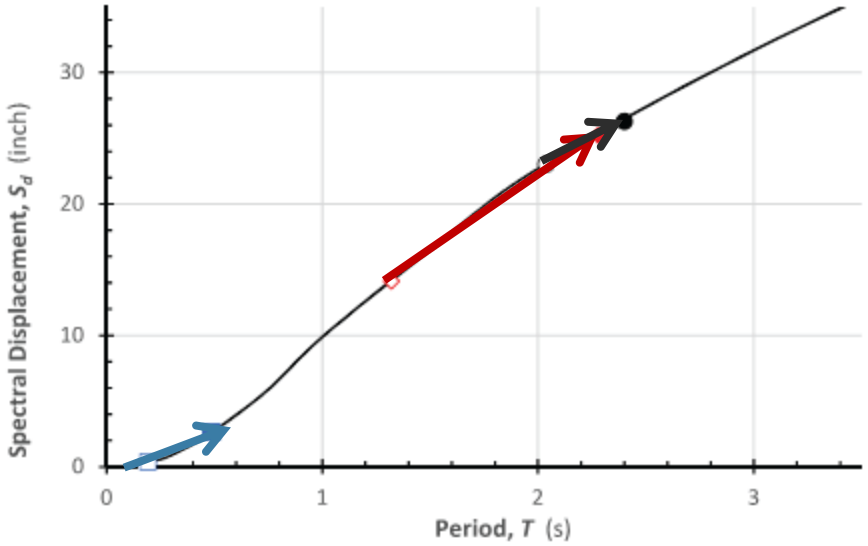


Schematic illustration of deflections caused by force applied to: (a) fixed-base structure; and (b) structure with vertical, horizontal, and rotational flexibility at its base.

Table 7-1 Fundamental Mode Dynamic Properties for Example Buildings

Example Building	Fixed-base Condition		Flexible-base Condition	
	Period, T (s)	Fundamental Mode Mass Participation	Period, $\tilde{T}$ (s)	Fundamental Mode Mass Participation
3-story reinforced concrete shear wall	0.193	76.5%	0.492	91.%
10-story reinforced concrete shear wall	1.32	65.0%	2.28	76.0%
10-story steel special moment frame	2.04	80.3%	2.40	82.1%





Kazık-Zemin Etkileşim Modelleri

Kazık-zemin etkileşimi doğrusal olmayan yay modelleriyle tanımlanır (FLAC3D, Plaxis, Midas GTS NX, SAP2000, OpenSees vb.)

p-y Yayları

Yanal Yük Etkileşimi

$$p = f(y)$$

Kazık eksenine dik yöndeki zemin tepkisi. Matlock (1970) yumuşak kil, Reese vd. (1975) katı kil, Reese vd. (1974) kum için geliştirilmiştir.

t-z Yayları

Çevre Sürtünmesi

$$t = f(z)$$

Kazık çevresi boyunca zemin sürtünmesi direnci. API RP 2A-WSD (2010) vb. bağıntıları kullanılır. Düşey yük aktarımının temel bileşeni.

Q-z Yayları

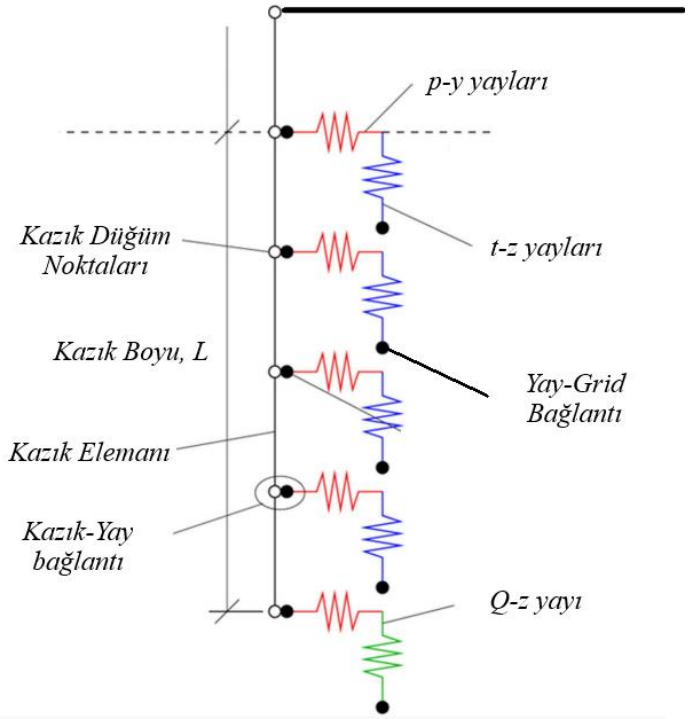
Uç Direnci

$$Q = f(z)$$

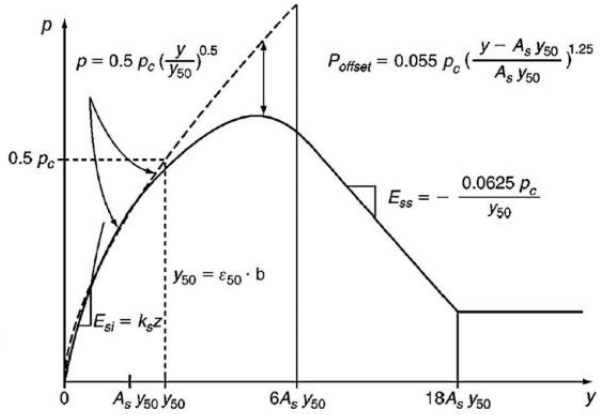
Kazık ucundaki yük-deplasman ilişkisi. API RP 2A-WSD (2010). Kazık ucunun oturmasına bağlı direnç davranışını tanımlar.

Arayüz Parametreleri: Rijitlik (Kt, Kn) • Kohezyon (c) • İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) • Çevre Uzunluğu (p)

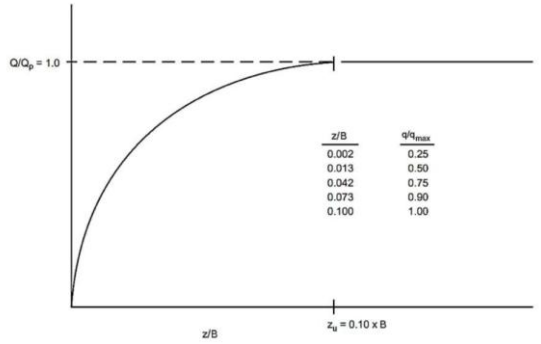
Kazık-Zemin Etkileşim Modeli (Yay)



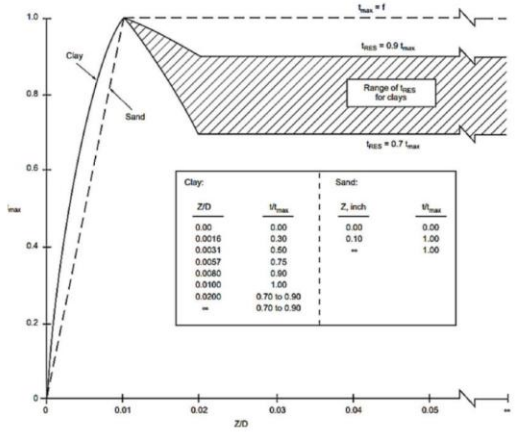
p-y, t-z ve Q-Z Yayları (OpenSees, 2012)



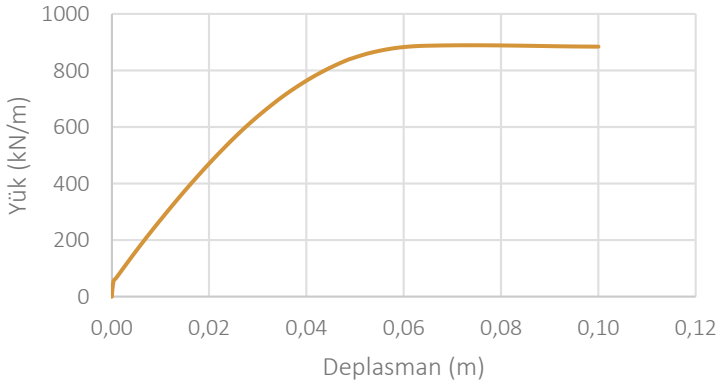
Su Seviyesi Altındaki Katı Kil İçin p-y eğrisi, Reese ve Diğerleri(1975)



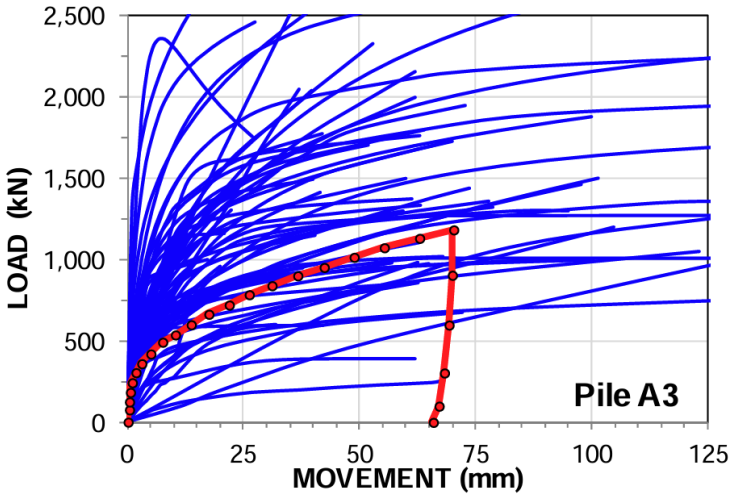
Q-Z Eğrisi (API RP 2A-WSD 2010)

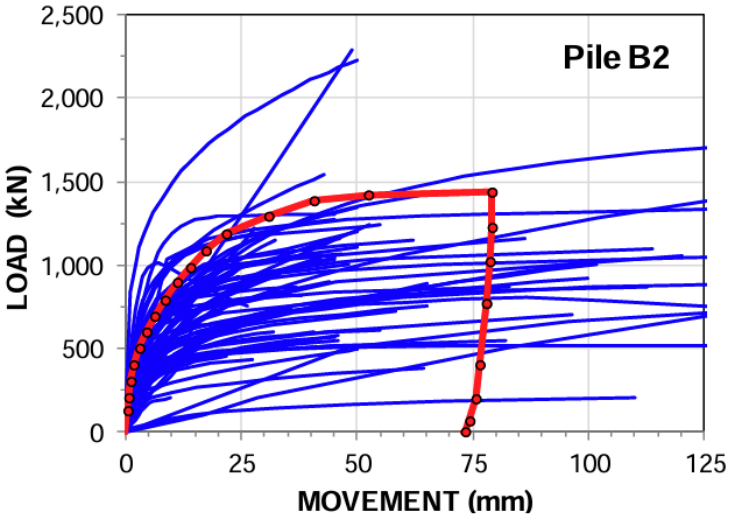


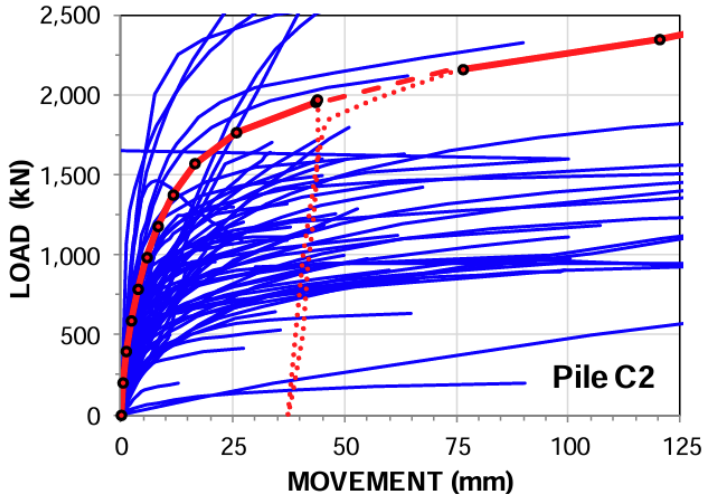
t-z Eğrisi (API RP 2A-WSD 2010)

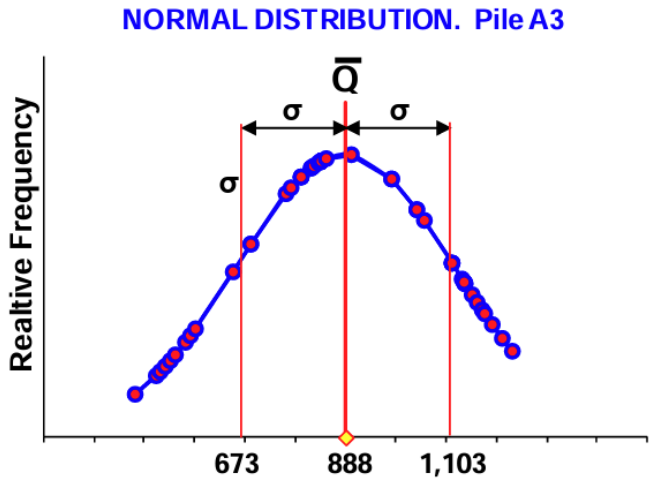


Temel etrafında kullanılan *p-y* yayları

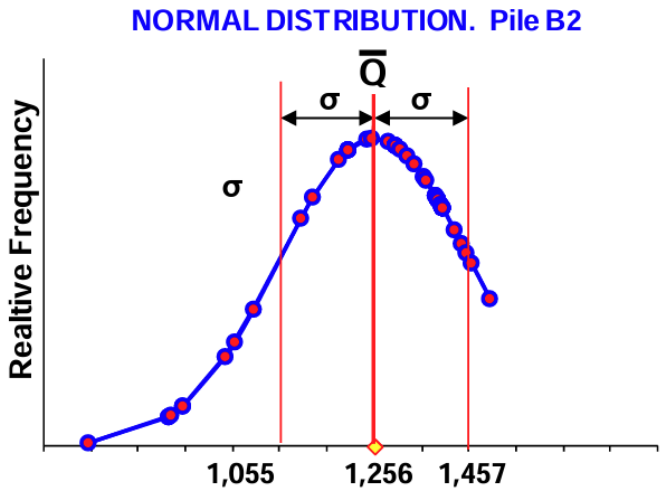




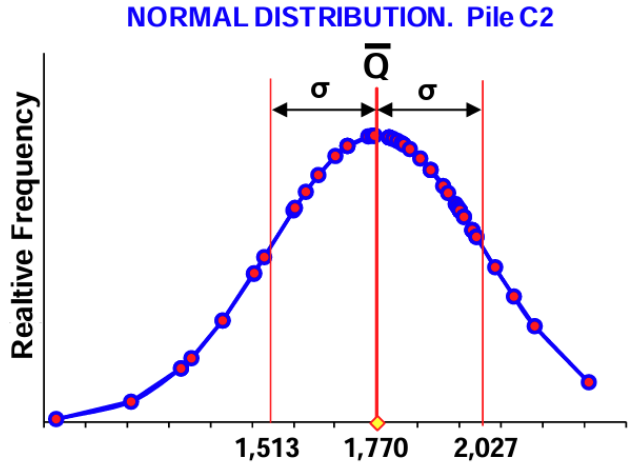




Bored 620mm



CFA
450mm



Pile C2. Normal distribution of capacities assessed from the actual test by 94 participants.

FDP 450mm

Kazık Taşıma Kapasitesi?

379. Fellenius, B.H., 2017. Report on the B.E.S.T. prediction survey of the 3rd CBFP event. Proceedings of the 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, April 27-29, Vol. 3, pp. 7-

Kazık Taşıma Kapasitesi?

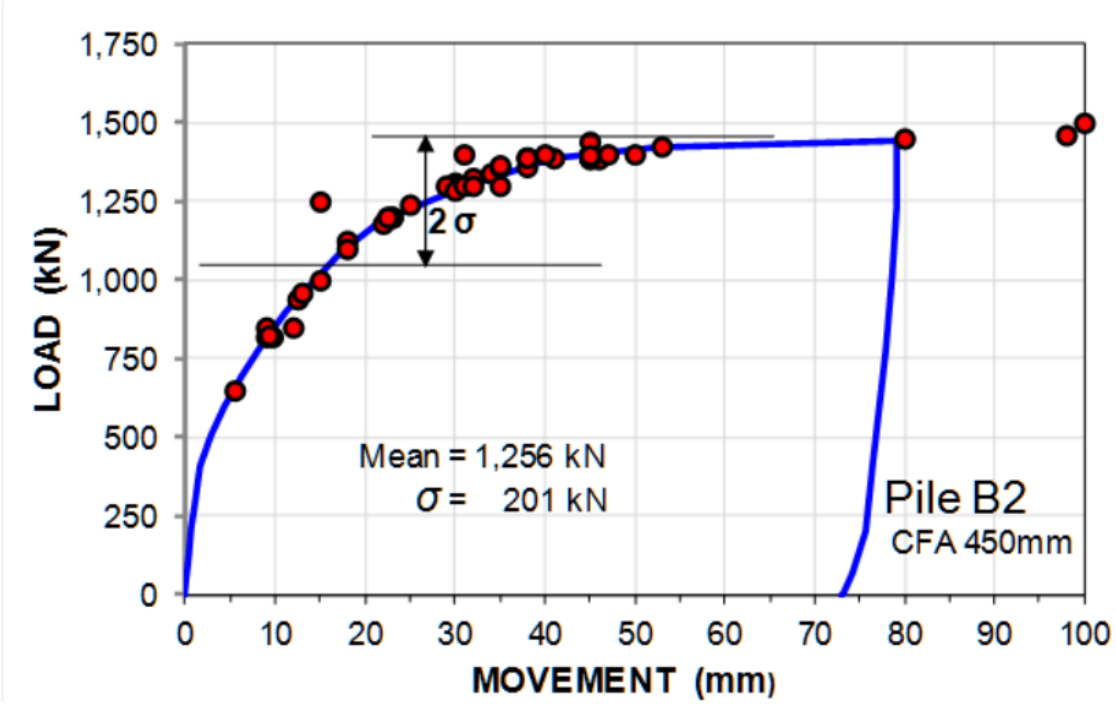


Fig. 8.8 54 capacities determined from an actual pile-head load-movement curve as assessed by 94 participants (Fellenius 2017).

379. Fellenius, B.H., 2017. Report on the B.E.S.T. prediction survey of the 3rd CBFP event. Proceedings of the 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, April 27-29, Vol. 3, pp. 7-25.

Çözüm Yöntemleri: Altsistem vs Direkt

Altsistem Yöntemi

(Pratik Yaklaşım)

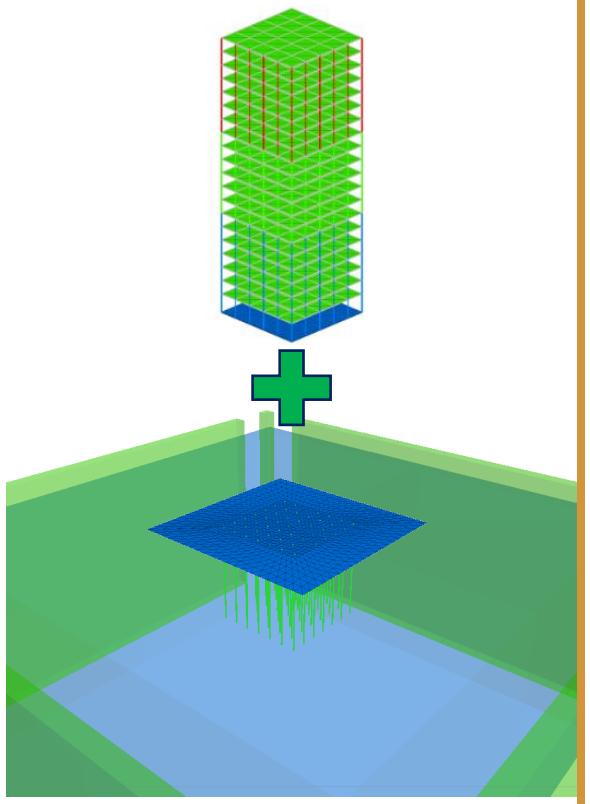
- Kinematik + Eylemsizlik ayrı çözülür
- TBDY 2018: Yöntem I, II, III
- Daha az kaynak tüketir

Kinematik Etkileşim Aşamaları:

- Temel planı ve zemin modeli
- Kazık geometrisi ve arayüz param.
- Çift yönlü NL deprem analizi
- Temel girdi hareketi (FIM) elde etme
- Temel yaylarının hesaplanması

Eylemsizlik Etkileşim Aşamaları:

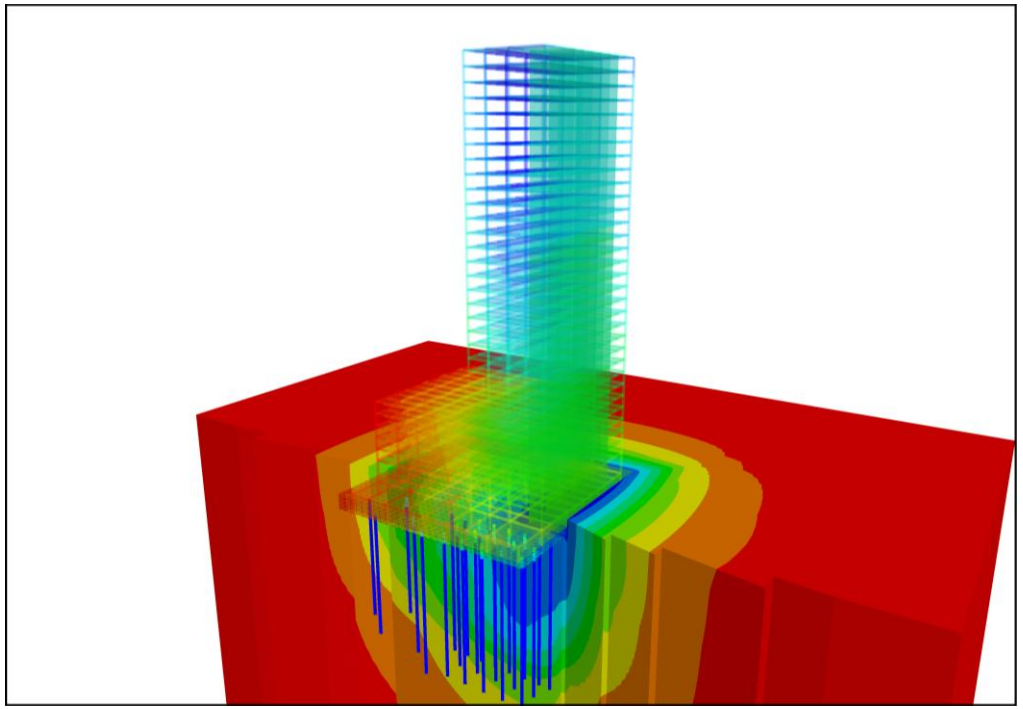
- Eşdeğer dinamik rijitlik matrisi
- Birim kuvvet uygulaması
- Esneklik → Rijitlik matrisi dönüşümü
- Üstyapıda yay rijitliği olarak kullanım
- Kinematik + Eylemsizlik = Tasarım



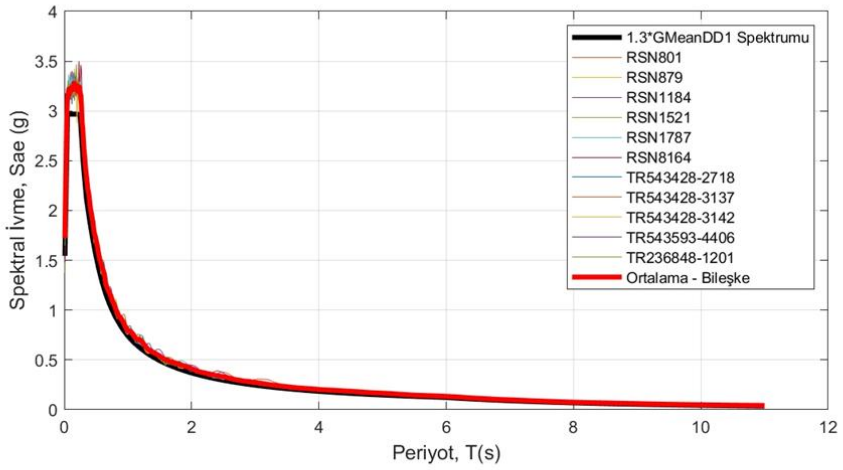
Direkt Yöntem

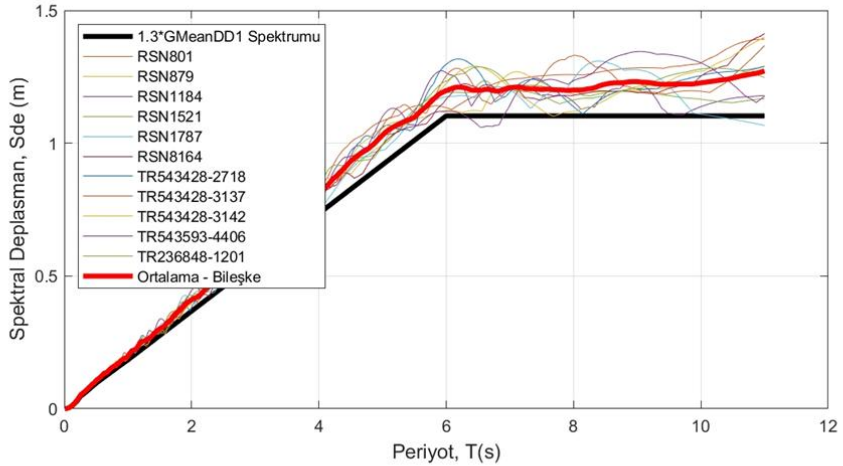
(Kapsamlı Yaklaşım)

- Yapı+Kazık+Zemin birlikte modellenir
- FLAC3D, Plaxis, Midas GTS NX
- En gerçekçi sonuçlar
- Modelleme/Kaynak problemleri (Tanıtlama, Plastik Mafsal vb.)



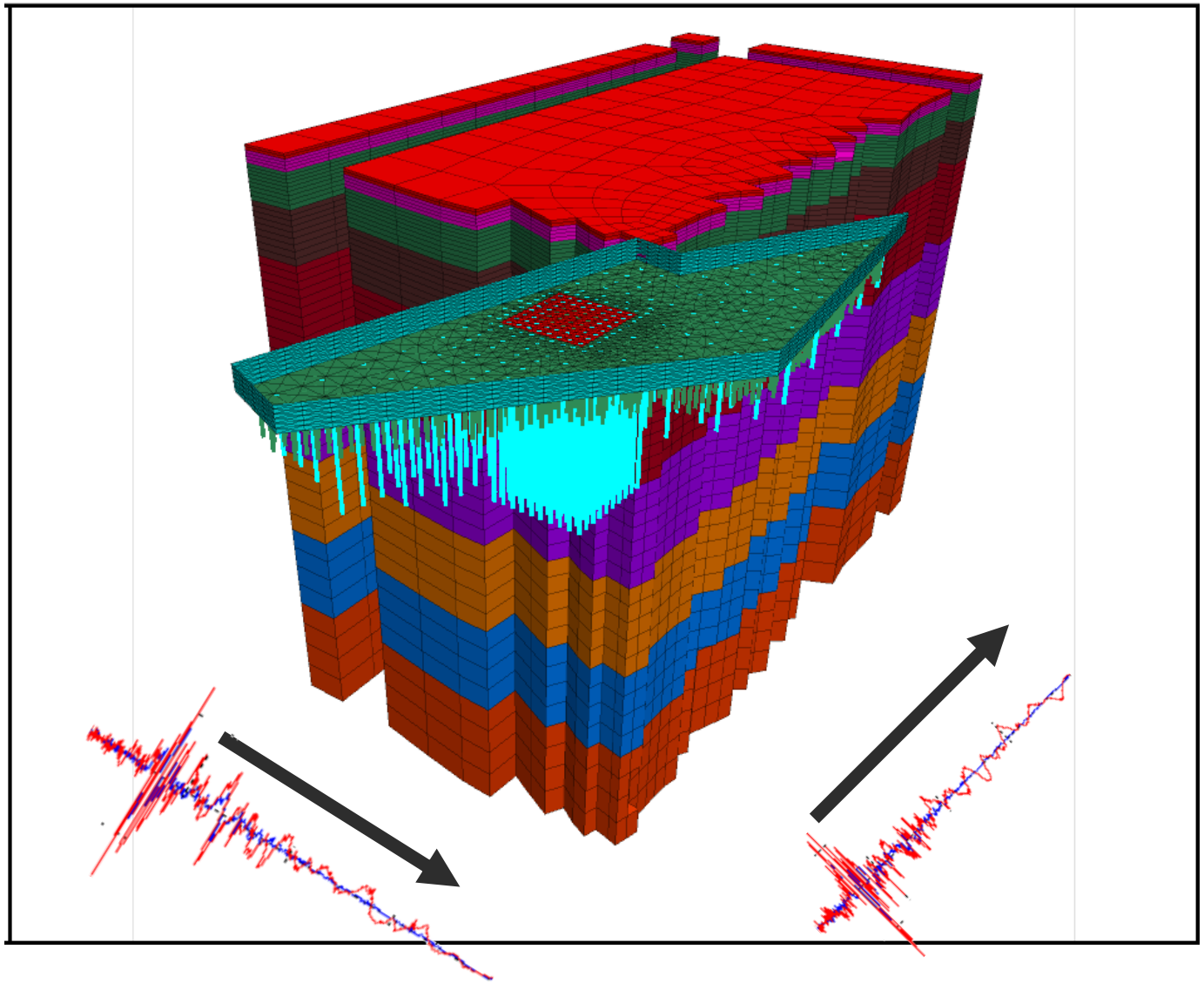
Kaya Seviyesi Girdi Yer Hareketi



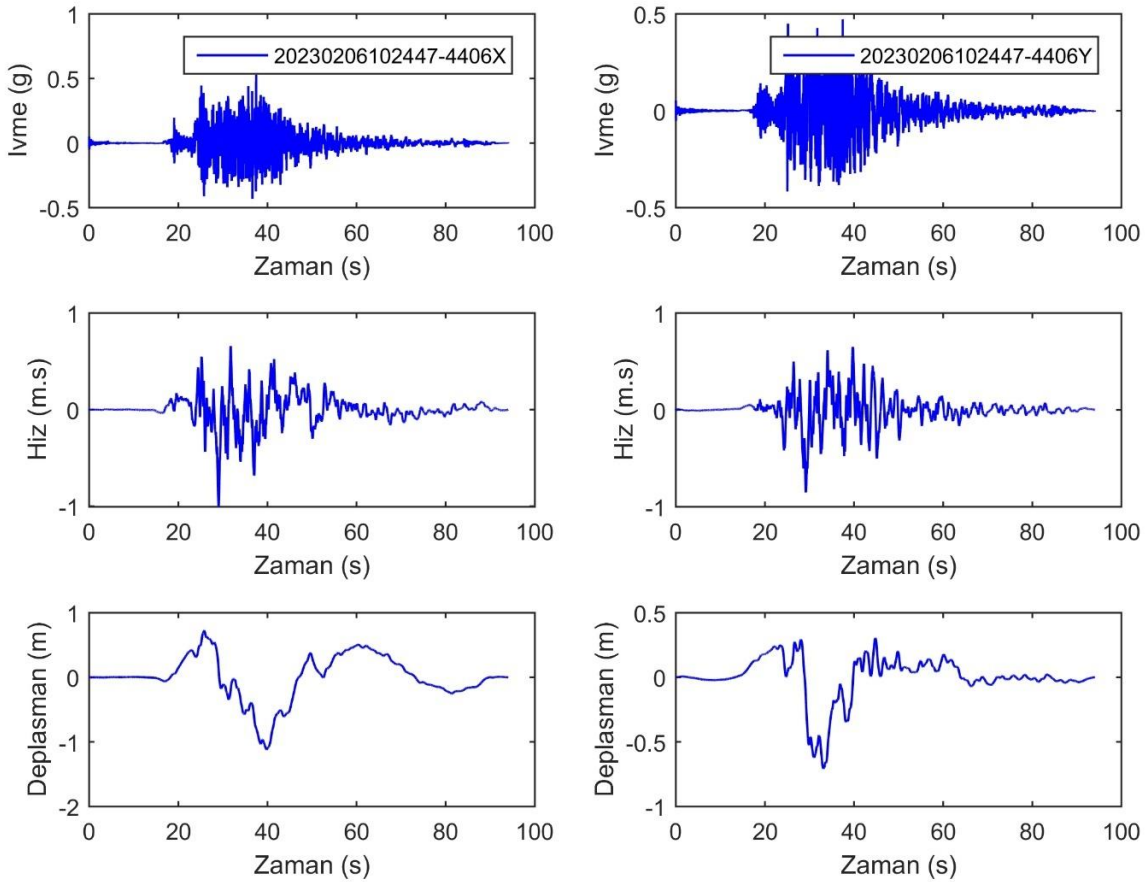


Dönüş Periyodu 2475 yıl (%2 @ 50 yıl/DD1)

Çift yönlü (Bi-directional) deprem verilerinin Kaya seviyesinden sisteme eş-zamanlı etkitilmesi

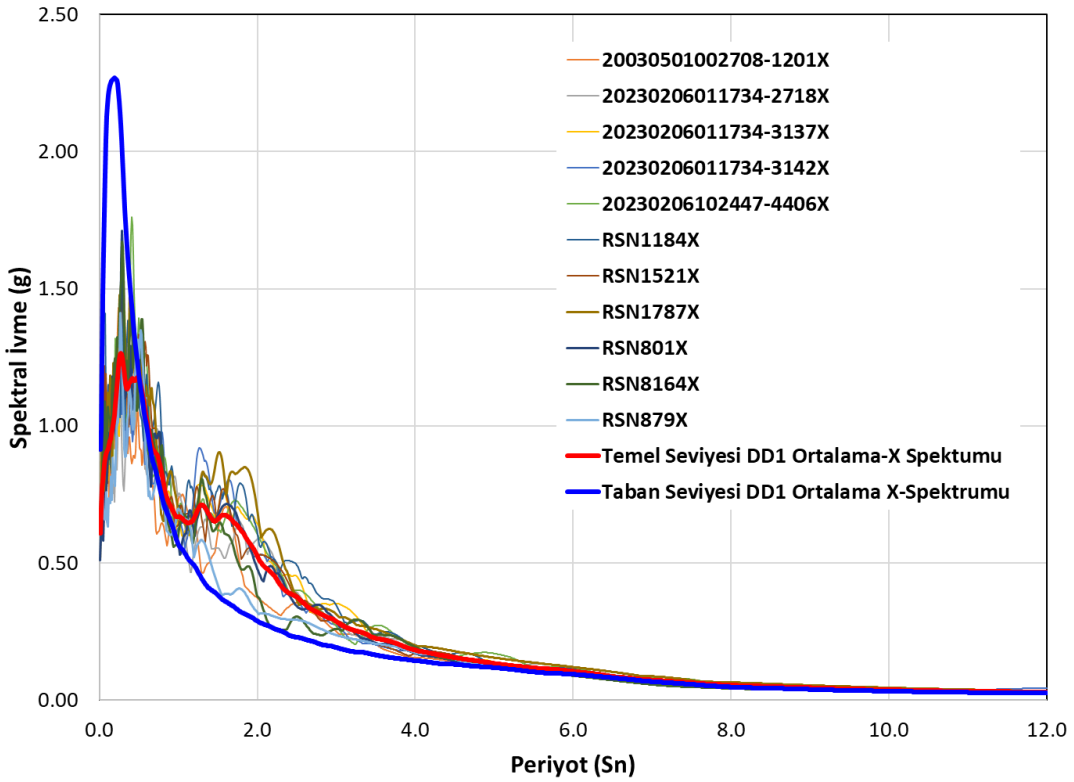


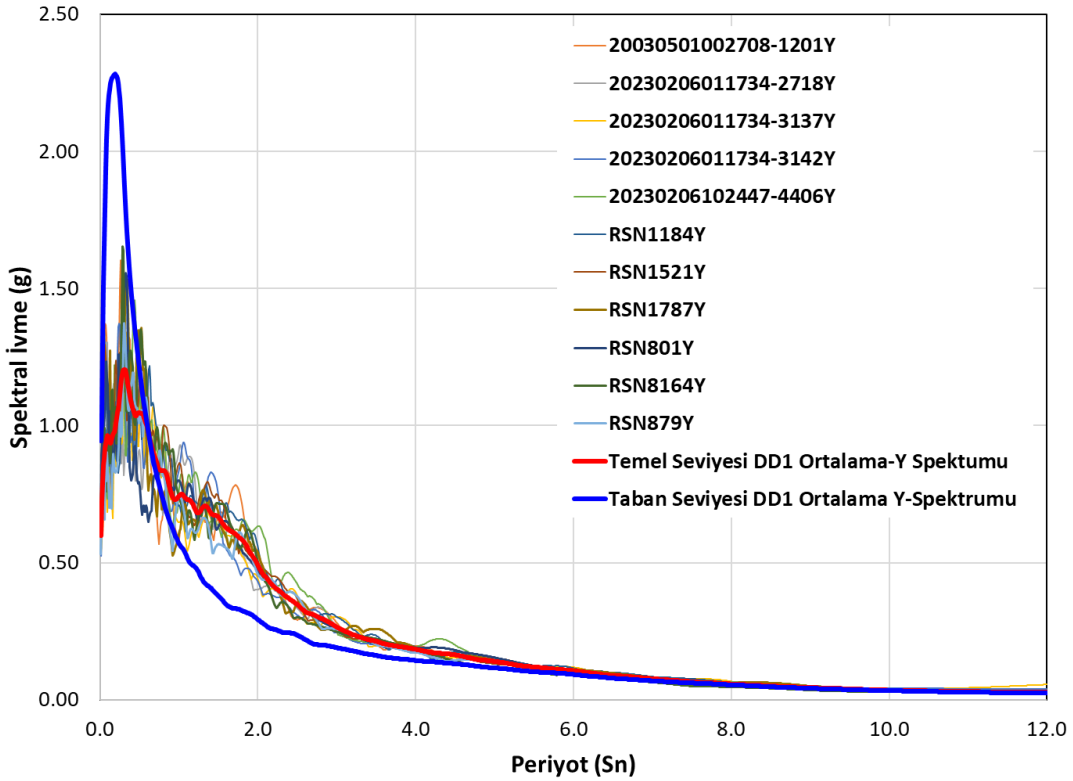
Temel Seviyesindeki İvme-Zaman Grafikleri



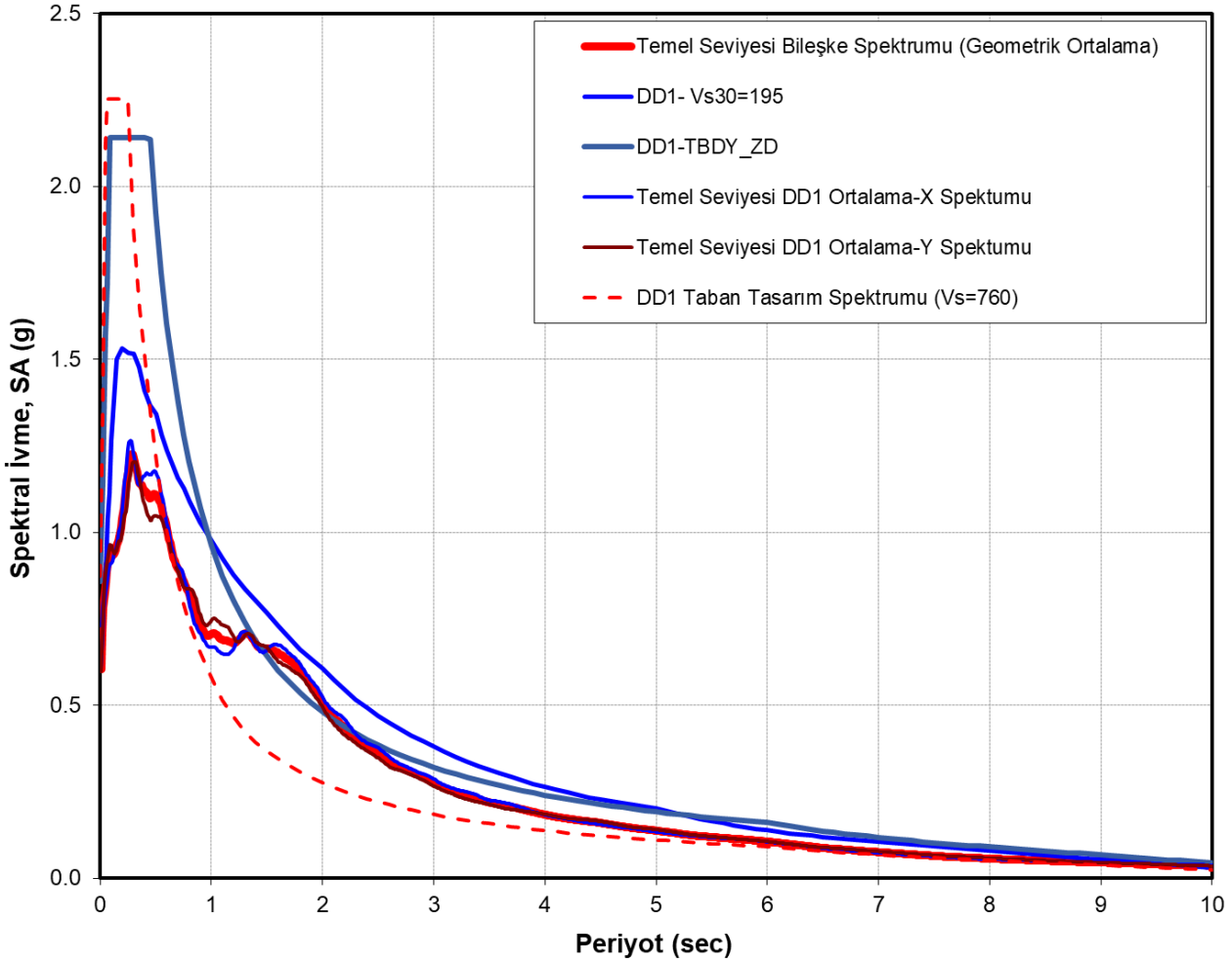
Deprem Tehlikesi Seviyesine Bağlı Temel Girdi Hareketi (%2 @ 50 yıl)

Çıktılar: Temel Seviyesi Tepki Spektrumu

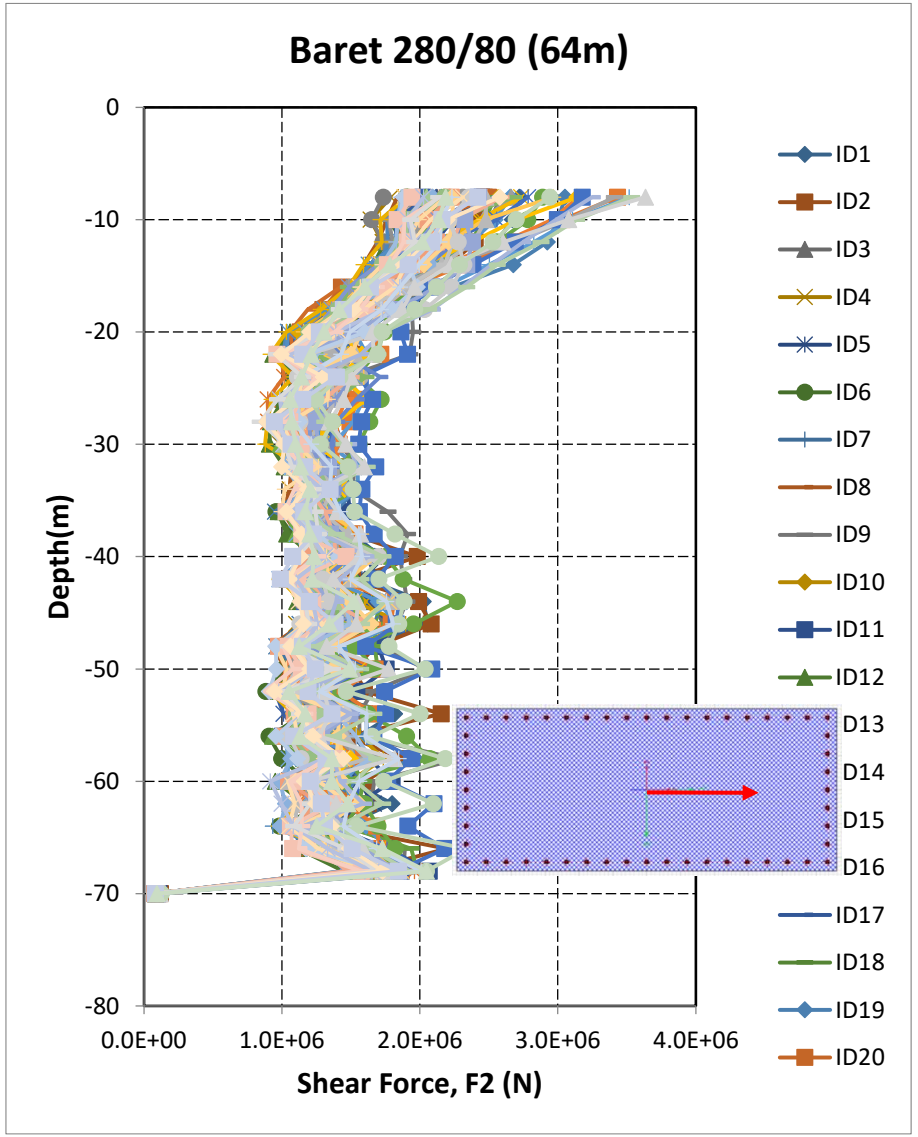


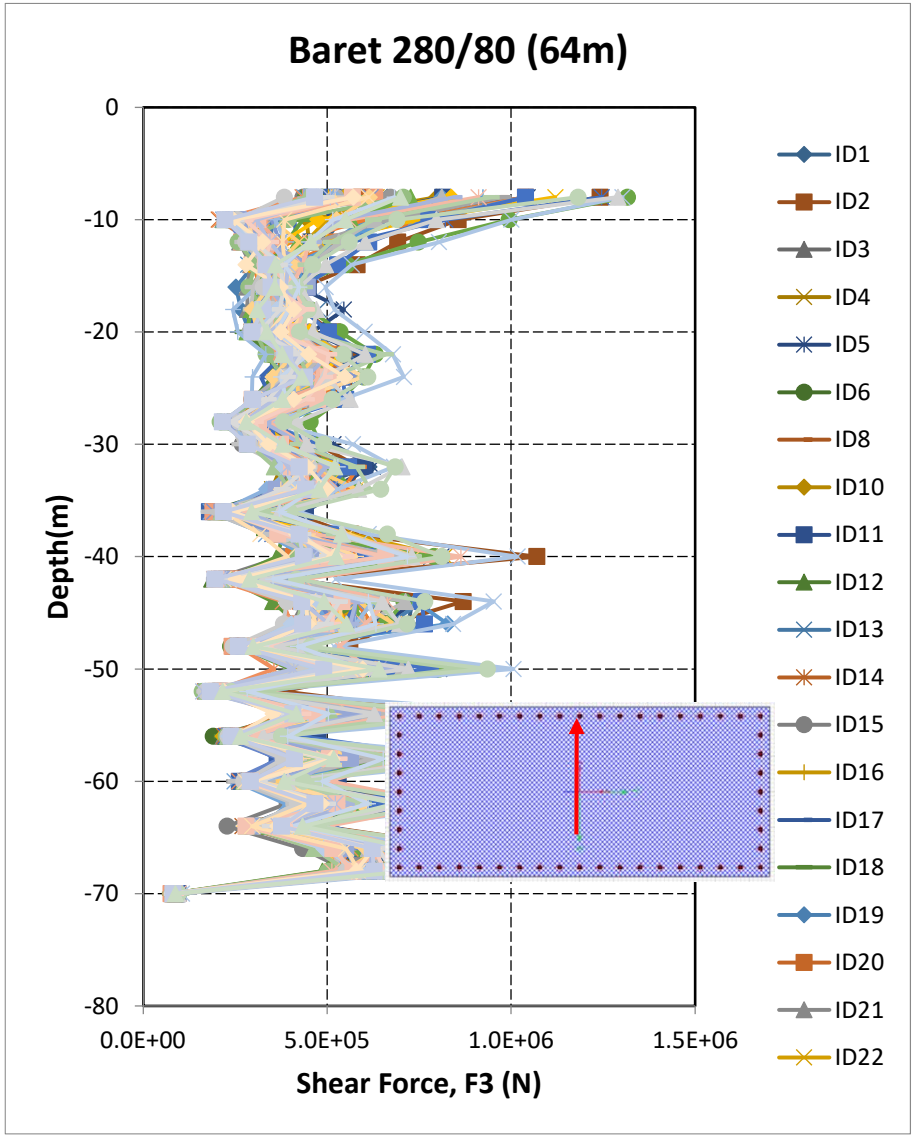


Çıktı Kontrolü: Farklı Durumlarda oluşan Tepki Spektrumları

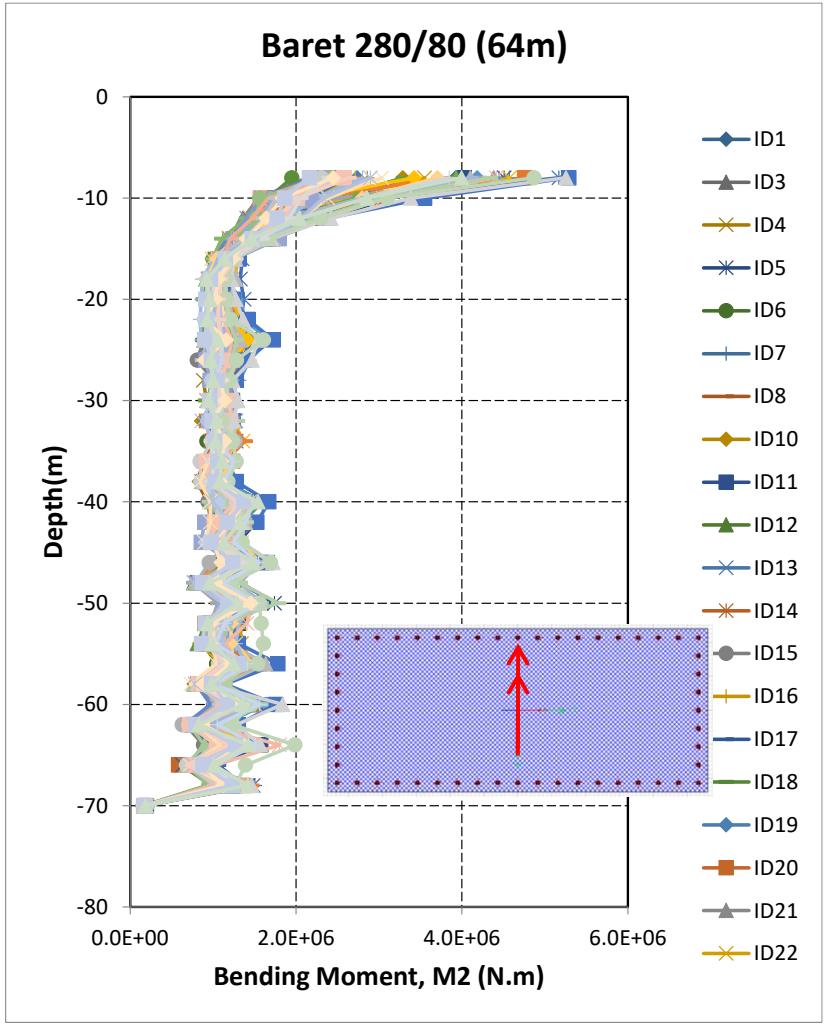


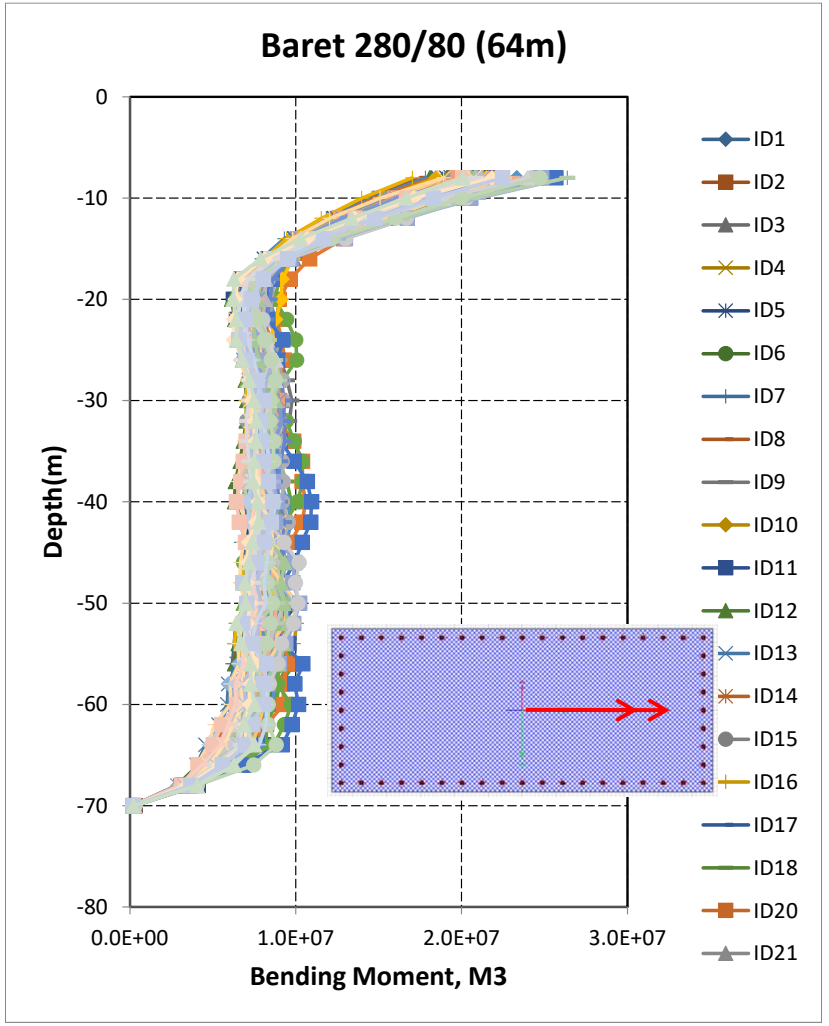
Çıktılar: Baret/Kazık Kesme Kuvveti Değerleri, F2, F3



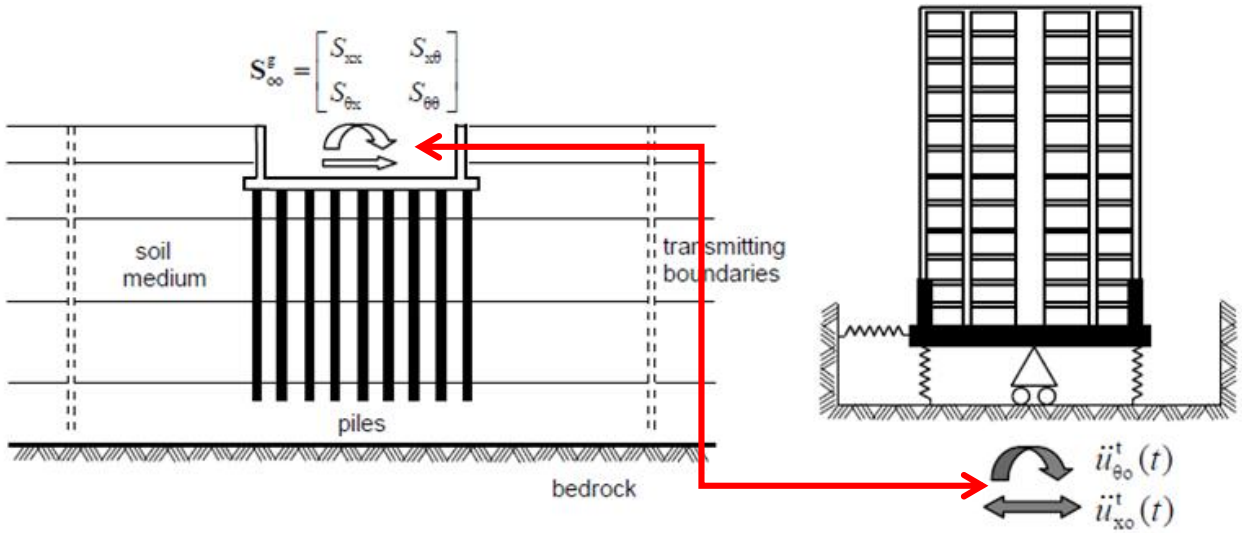


Çıktılar: Baret/Kazık Moment Değerleri, F2, F3





Altsistem Metodu – Eylemsizlik Etkileşimi



X yönü

$$S_{x\theta}^{g} = \begin{bmatrix} S_{x\theta} & S_{x\theta} \\ S_{\theta x} & S_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

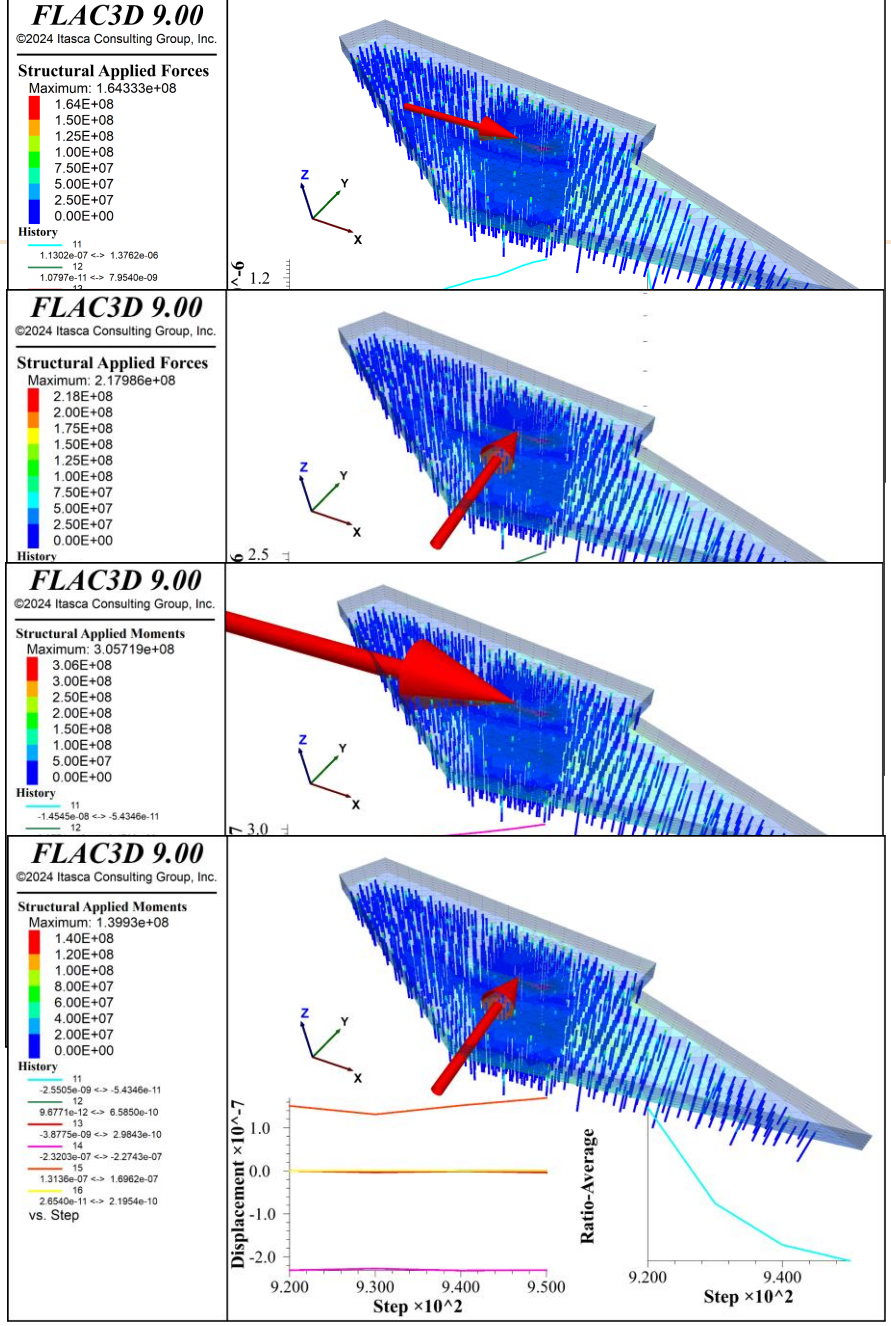
Y yönü

$$S_{y\theta}^{g} = \begin{bmatrix} S_{y\theta} & S_{y\theta} \\ S_{\theta y} & S_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

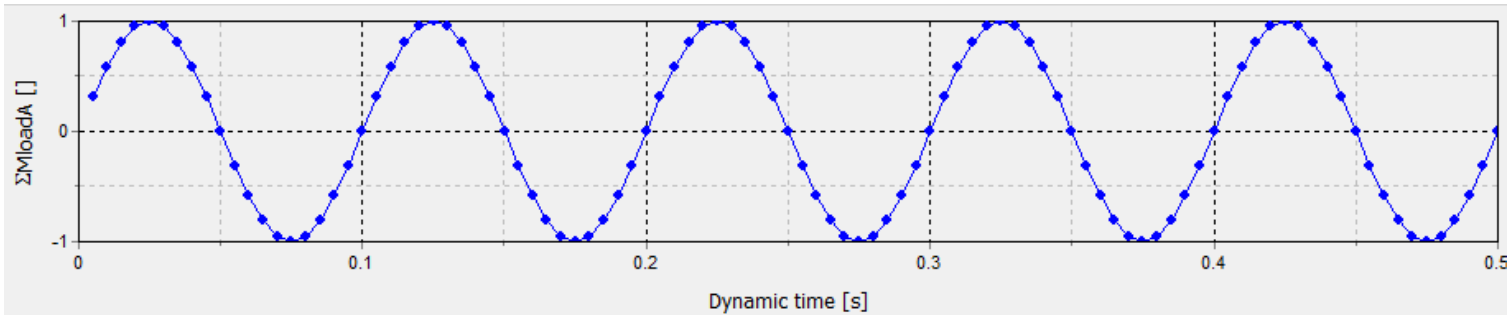
- Eşdeğer zemin rijitliği parametreleri, üstyapının temelinde yay rijitliği olarak kullanılacaktır.
- Üstyapının Analizleri sırasında yaydaki maksimum kuvvetler elde edilecektir.
- Maksimum kuvvet, birim kuvvet uygulamasının sonucunda oluşan kazık kuvvetlerini ölçeklendirmek için kullanılacaktır.

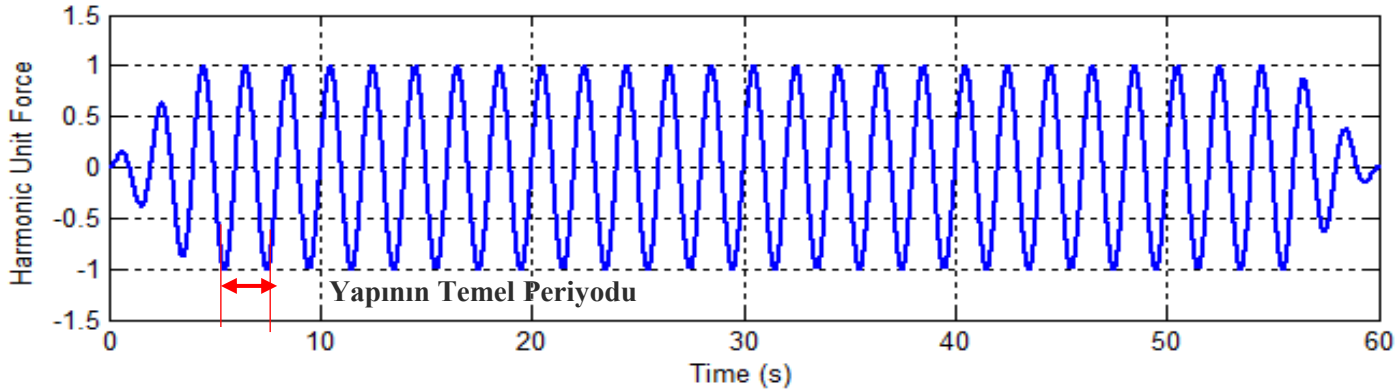
Zemin Eşdeğer Dinamik Rijitlik Matrisi

- Kinematik Etkileşim Analizlerinde hesaplanan ortalama gerinimlere karşılık gelen malzeme kesme modülünü her katman için değiştirin.
- Üst yapının temel periyoduna karşılık gelen frekansta birim harmonik hareket hazırlayın
- Hareketi, ayrı yük durumlarında radye temelin kütle merkezinde olacak şekilde Fx ve M_θ yönlerinde birim kuvvet olarak uygulayın
- Analizleri koşturun, maksimum Ux yer değiştirmesini ve maksimum θx Dönmeyi hesaplayın.
- Sonuçlardan Esneklik Matrisi oluşturun
- Zemin eşdeğer dinamik rijitlik matrisini elde etmek için Esneklik Matrisinin tersini alın (Inverse Matrix)
- Aynı aşamaları Y yönü için tekrarlayın.

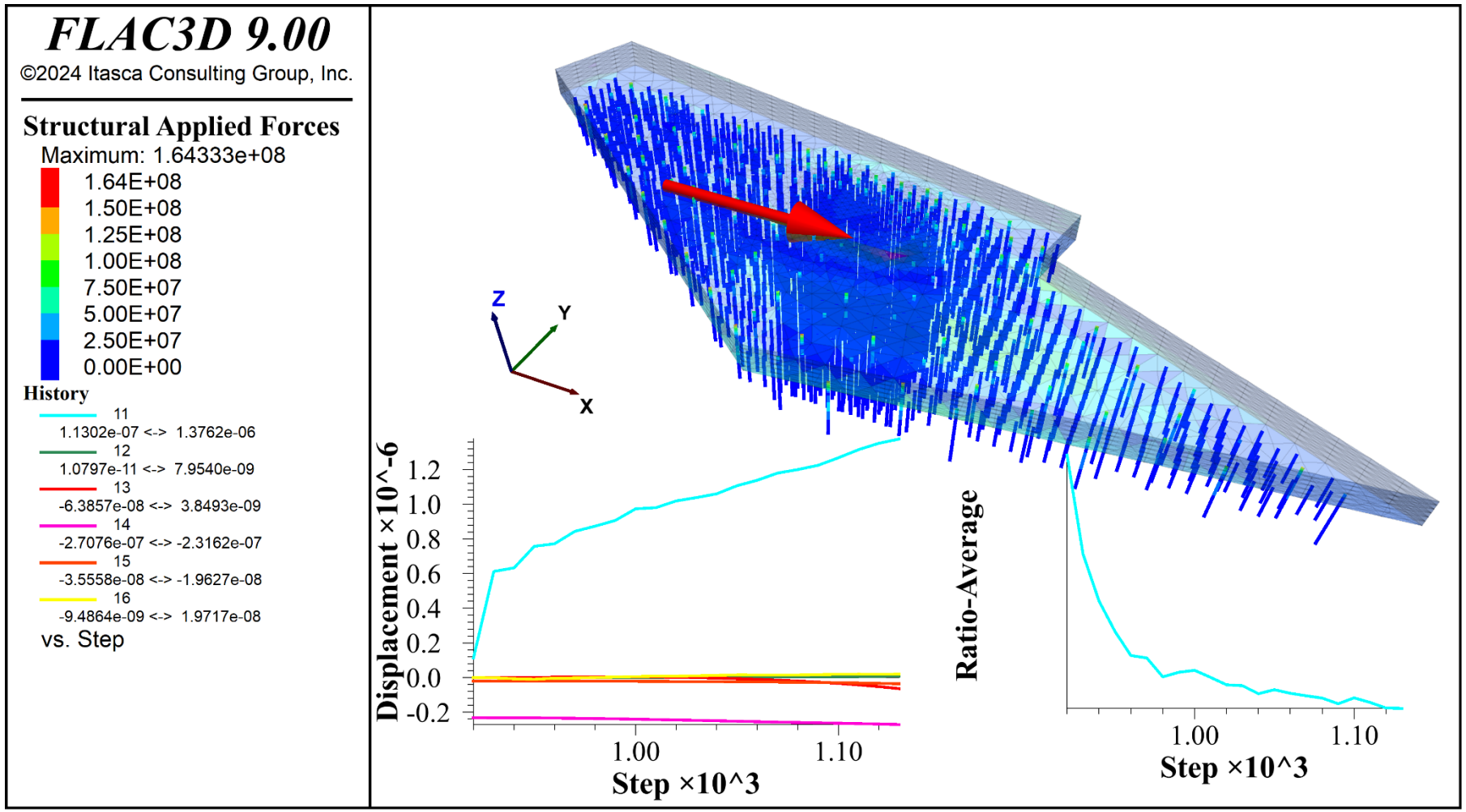


Harmonik Kuvvetin Elde edilmesi ve Uygulaması





Eylemsizlik Etkileşimi — Temel Rijitlik Matrisi



X Yönünde uygulanan Yükleme sonucunda oluşan Temel Deplasman çıktıları

Eylemsizlik Etkileşimi — Temel Rijitlik Matrisi

Foundation Flexibility Matrix (F)

1x10^-3 m/kN

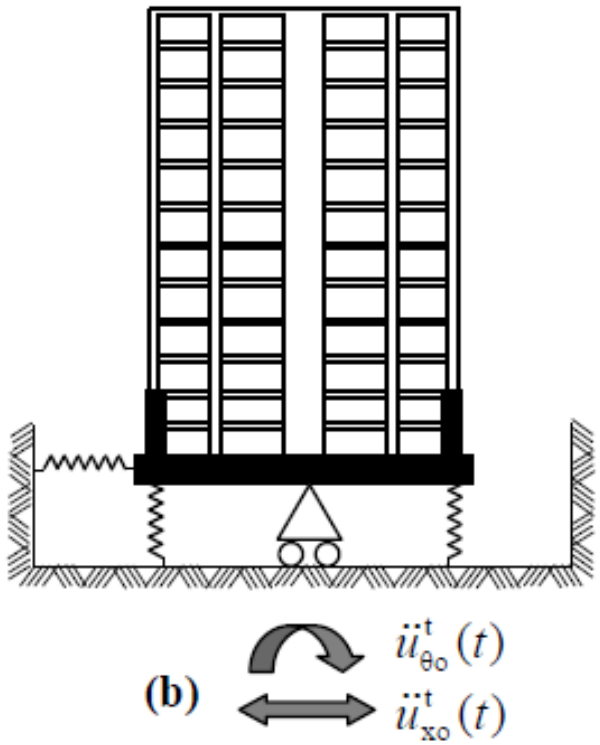
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Fx	2.93E-05	-1.21E-06	9.85E-08	1.73E-08	-5.54E-08	-4.62E-08
Fy	-1.22E-06	2.97E-05	1.23E-07	7.98E-08	-1.65E-08	-1.36E-08
Fz	-8.81E-08	-1.22E-07	-1.12E-05	2.69E-09	2.62E-08	-8.01E-10
Mx	1.75E-08	7.95E-08	-2.33E-09	4.02E-08	-5.15E-09	2.36E-11
My	-5.47E-08	-1.63E-08	-2.65E-08	-5.15E-09	3.29E-08	-2.08E-11
Mz	-4.44E-08	-1.32E-08	6.25E-10	1.50E-11	-1.95E-11	7.05E-08

Foundation Stiffness Matrix (K)

kN/m

	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
Ux	3.4355E+07	1.4788E+06	1.4045E+04	-1.0587E+07	5.6433E+07	2.2377E+07
Uy		3.3939E+07	1.1281E+03	-6.6798E+07	8.6008E+06	7.4261E+06
Uz			-8.9380E+07	3.6364E+05	-2.7131E+05	-1.0591E+05
Rx		*Symmetric*		2.5509E+10	3.9570E+09	-2.5531E+07
Ry					3.1169E+10	4.4958E+07
Rz						1.4205E+10

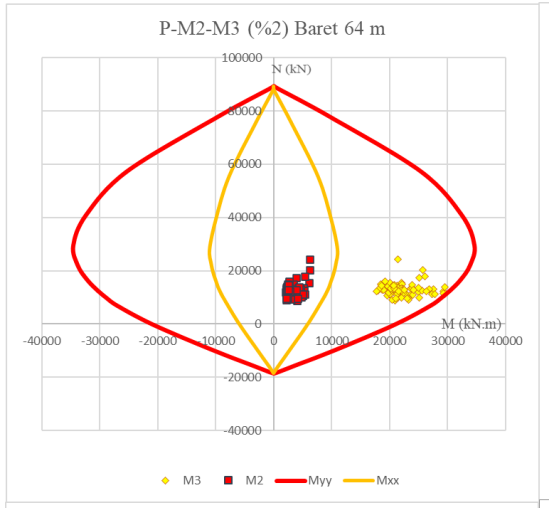
Altsistem Metodu – Eylemsizlik Etkileşimi

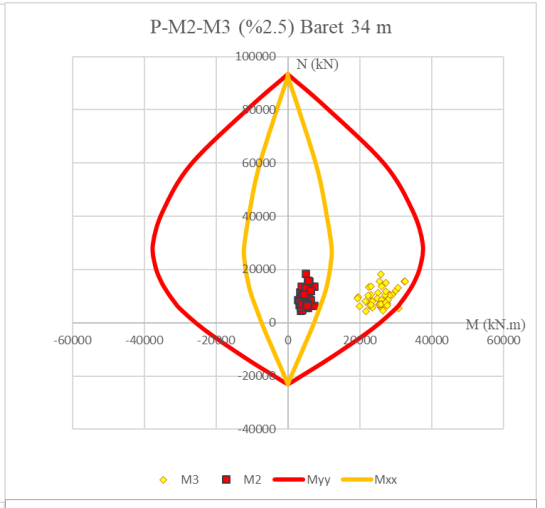


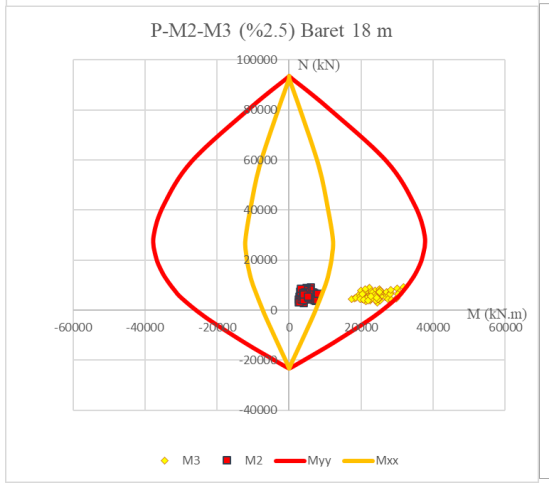
Çıktı :Temel Yayında Oluşan Kuvvet Eylemsizlik ve Kinematik Etkileşim nedeniyle oluşan Kuvvetlerin birleştirilmesi

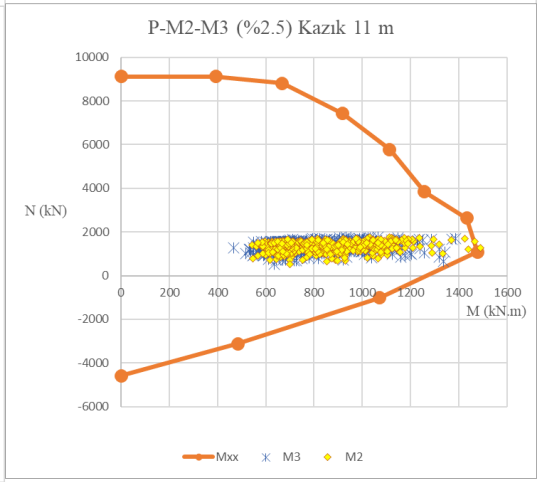
16C.5. KAZIKLARDA DEĞERLENDİRMEYE / TASARIMA ESAS ŞEKİLDEĞİŞTİRMELER VE İÇ KUVVETLER

16C.2, **16C.3** ve **16C.4**'te açıklanan yöntemler ile yapılan hesaplar sonucunda kazıklarda değerlendirmeye / tasarıma esas şekildeğiştirmeler ve iç kuvvetler, **kinematik ve eylemsizlik etkileşimi sonuçlarının mutlak değerlerinin toplamı** olarak hesaplanacaktır.

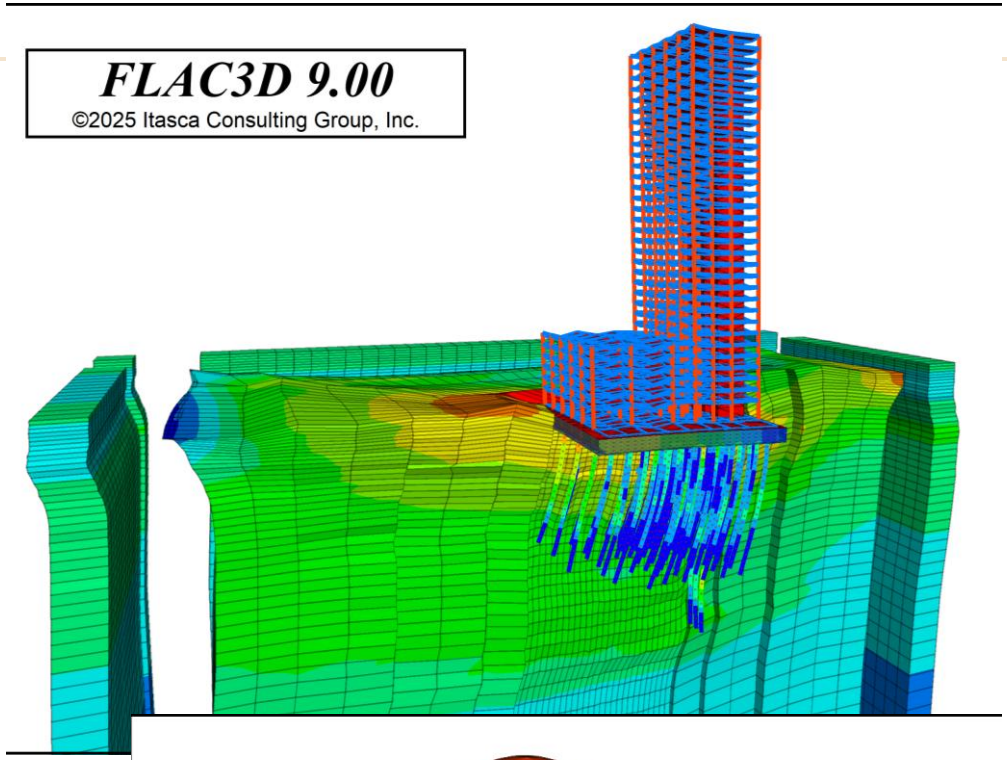


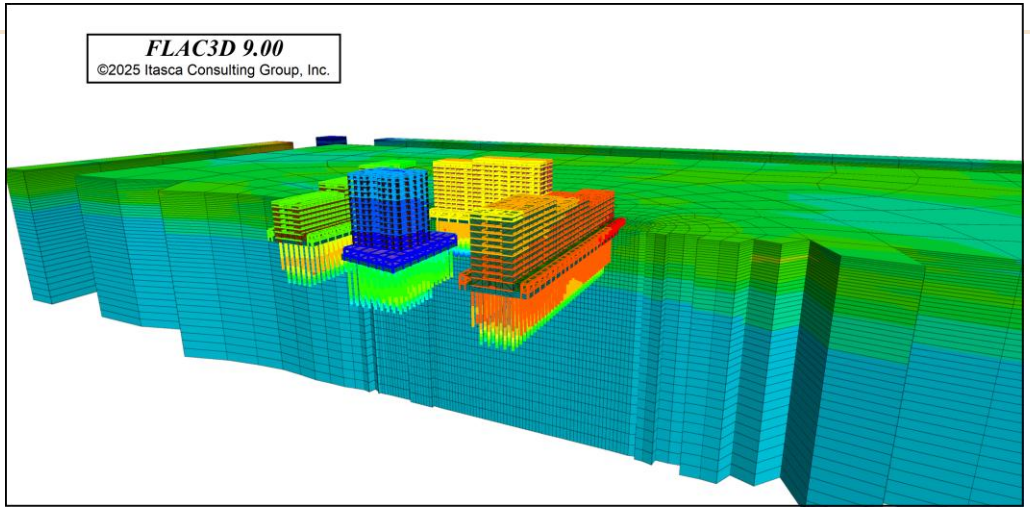


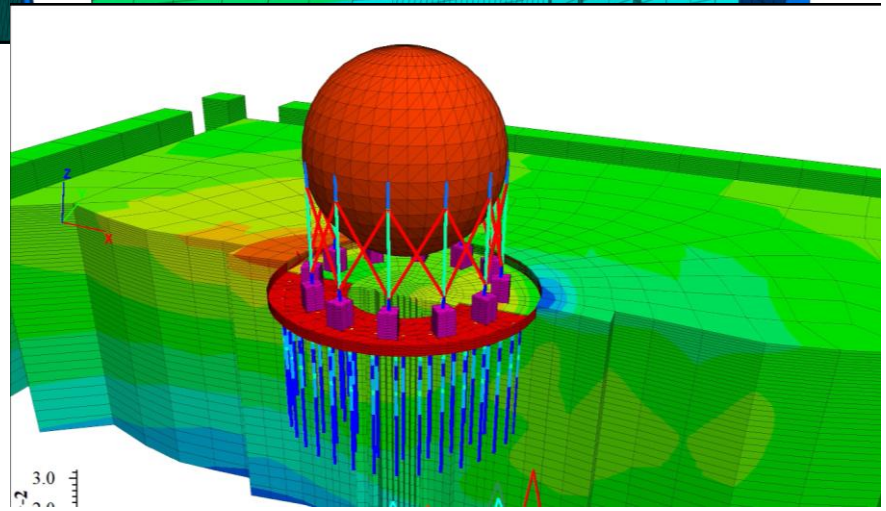


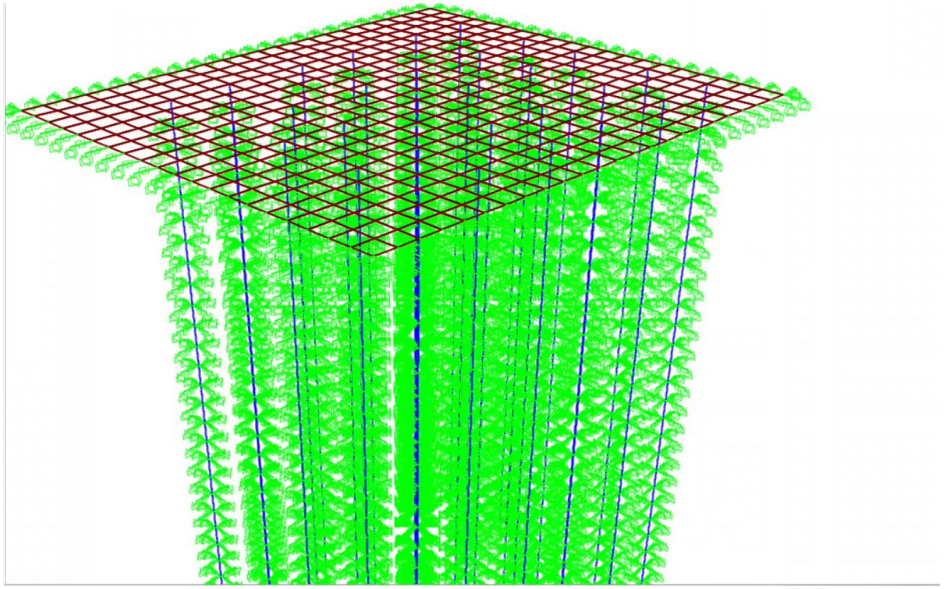


Çözüm Yöntemleri: Altsistem vs Direkt

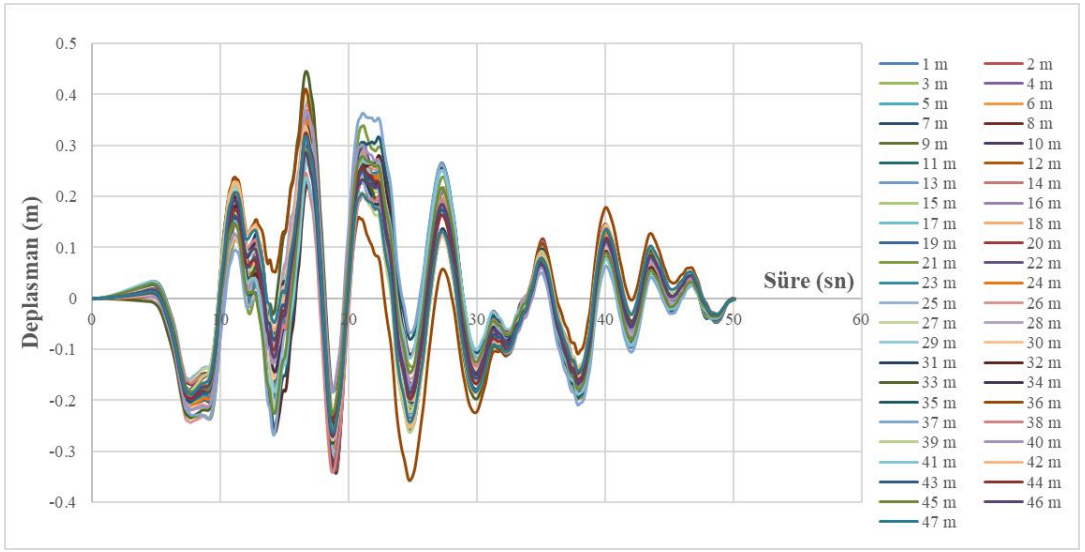


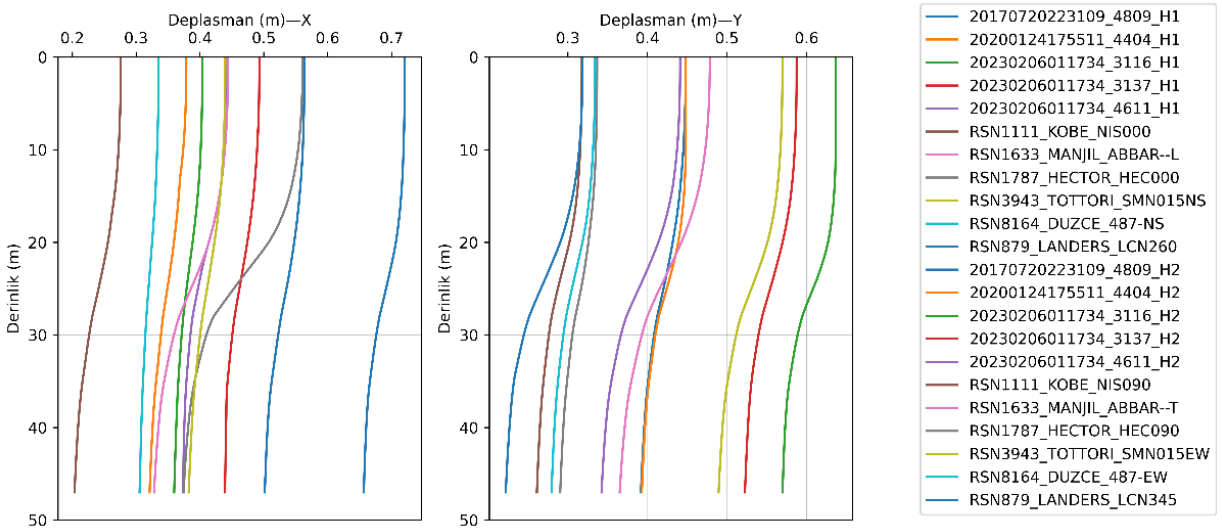






Yöntem II ve III

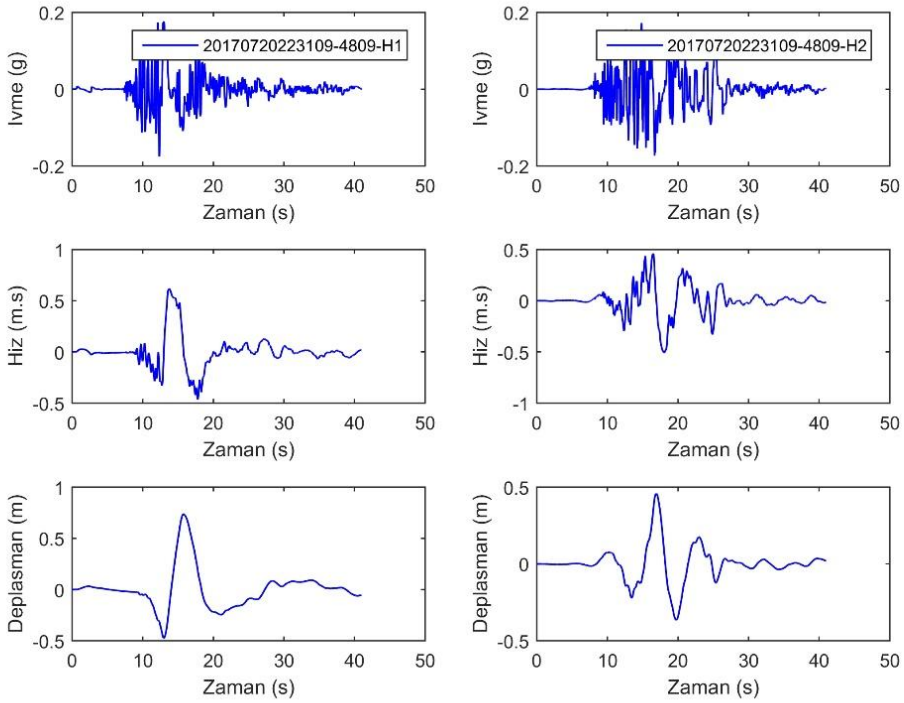




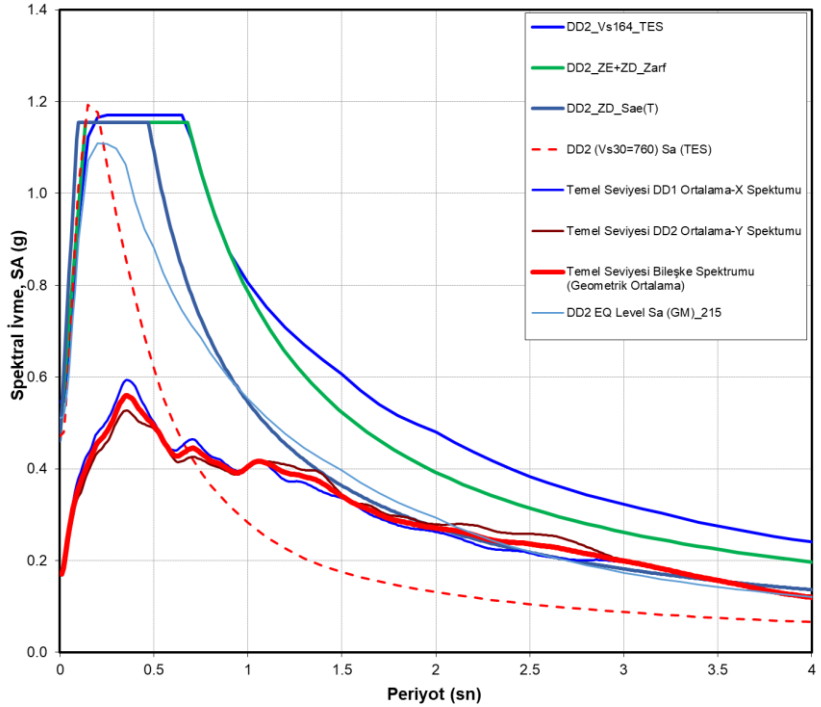
(d) *Deprem kayıtları* olarak, **16.5.2**'ye göre yapılan serbest zemin davranış analizlerinde taban kayasında her iki yatay doğrultuda ayrı ayrı etkitilen deprem kaydı çiftinden zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarında elde edilen *toplam yerdeğiştirmelerin zamana göre değişimleri* kullanılacaktır (*toplam yerdeğiştirme*, taban kayasının yerdeğiştirmesi ile zeminde meydana gelen rölatif yerdeğiştirmenin toplamıdır). Her bir *t* anında toplam yerdeğiştirmeler, her iki yatay doğrultuda eş zamanlı olarak, bir uçlarından kazık düğüm noktalarına bağlı olan p-y yaylarının öteki uçlarına basınç yönünde uygulanacaktır (*dinamik yerdeğiştirme yüklemesi*). Bu yerdeğiştirmeler, bodrumlu binalarda bir uçları perde sonlu eleman düğüm noktalarına bağlı p-y benzeri yayların öteki uçlarına da basınç yönünde uygulanacak ve böylece kinematik etkileşim modelinin zaman tanım alanında deprem analizi yapılacaktır.

(d) 16.5.2'ye göre yapılan tek boyutlu serbest zemin davranış analizlerinde gözönüne alınan deprem doğrultusunda taban kayasından yatay doğrultuda etkitilen depremlerden (onbir adet deprem kaydı) her biri için, zemin profili boyunca kazık düğüm noktaları hizalarında elde edilen *toplam yerdeğiştirmeler*'in zamana göre maksimumlarının zarfı alınacaktır. Toplam yerdeğiştirme zarfı, bir uçlarından kazık düğüm noktalarına bağlı olan *doğrusal olmayan* p-y yaylarının öteki uçlarına *basınç yönünde* sıfırdan başlayarak *statik olarak artımsal şekilde* uygulanacaktır (*statik artımsal yerdeğiştirme yüklemesi*). Aynı yerdeğiştirme zarfı, bodrumlu binalarda bir uçları perde sonlu eleman düğüm noktalarına bağlı p-y benzeri yayların öteki uçlarına da basınç yönünde uygulanacak ve böylece kinematik etkileşim modelinin yaklaşık *artımsal statik hesabı* yapılmış olacaktır.

Yöntem II ve III

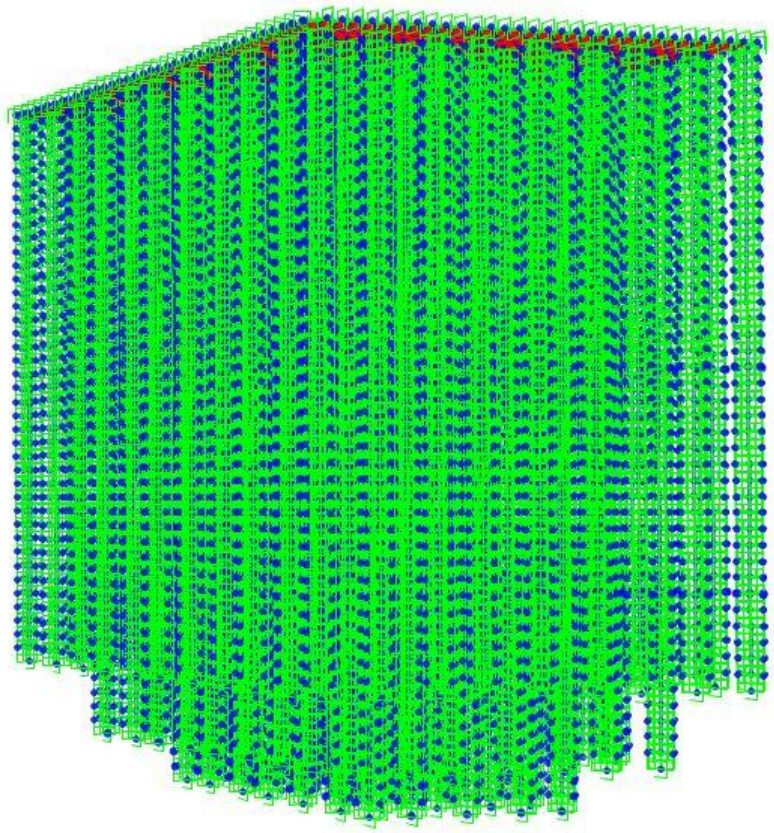


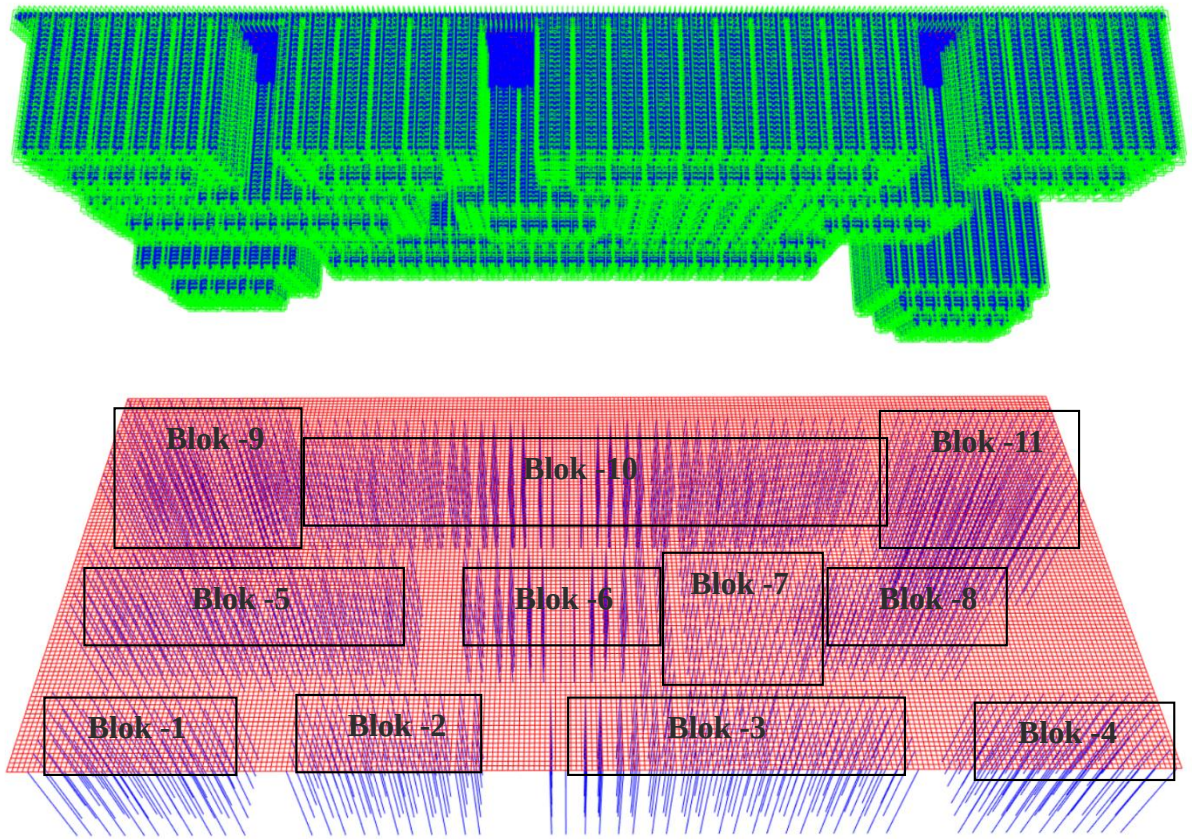
Yöntem II Temel Girdi Hareketi (FIM)



Yöntem III Zemin Tepki Spektrumu

Yöntem II ve III





Sonuç ve Öneriler

1

SSI Zorunluluğu

Yapı-zemin etkileşimi artık ihmal edilemez. TBDY 2018 ve EN 1997-3:2025 bunu zorunlu kılıyor.

2

Bütünsel Yaklaşım

Zemin araştırmasından modellemeye, deneylerden izlemeye kadar tüm süreç entegre yürütülmeli.

3

Doğru Model Seçimi

p-y, t-z, Q-z yaylarının seçimi ve kalibrasyonu saha koşullarına göre yapılmalı.

4

Deneysel Doğrulama

Statik ve dinamik yükleme deneyleri ile tasarım varsayımlarının sahada doğrulanması şart.

5

Kinematik + Eylemsizlik

TBDY 2018 gereği: Kazıklarda tasarıma esas iç kuvvetler her iki etkileşimin toplamıdır.

6

Sürekli İzleme

Inşaat sırasında ve sonrasında enstrümantasyonla performans izlenmeli.

Soru & Katkı