

Büyük Ölçekli Simülasyonlar Yardımıyla Zemin Büyütmesinin Modellenmesi: Orta ve Kuzey Doğu Amerika ve Batı Amerika için Uygulamalar

Okan Ilhan¹, Youssef M. A. Hashash², Joseph Harmon², Jonathan P. Stewart³, Ellen M. Rathje⁴, Kenneth W. Campbell⁵, Walter J. Silva⁶, ve Sissy Nikolaou⁷

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

²Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign

³Dept. of Civil and Env. Engineering, Univ. of California, Los Angeles

⁴Dept. of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, Univ. of Texas, Austin

⁵CoreLogic, Inc., 555 12th St., Suite 1100, Oakland CA

⁶Pacific Engineering and Analysis, Inc., El Cerrito, CA

⁷National Institute of Standards and Technology (NIST), 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi - Çevrimiçi Seminerleri

28 Nisan, 2022

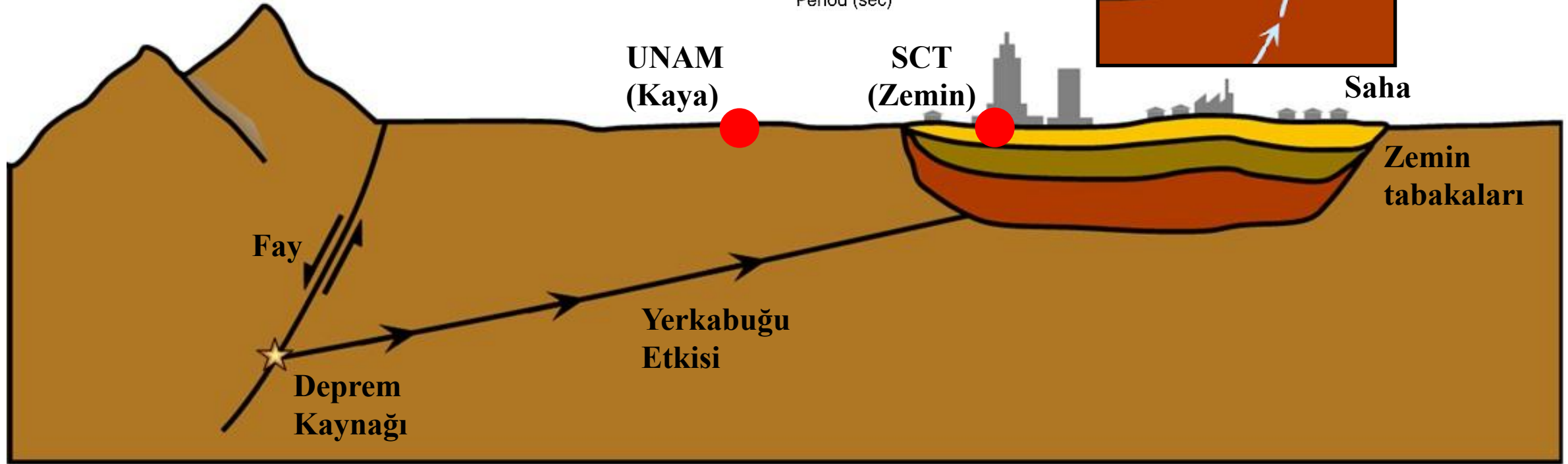
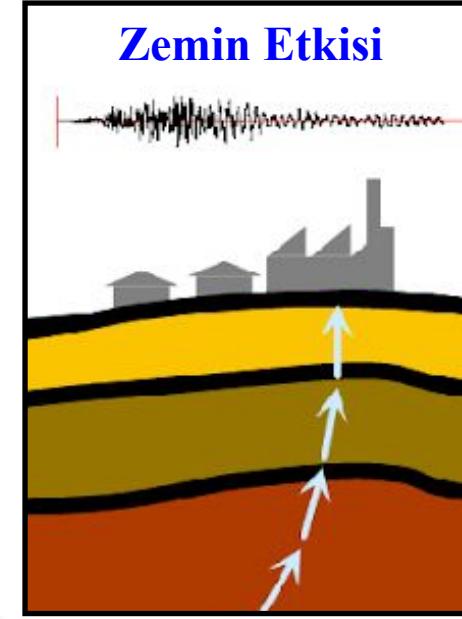
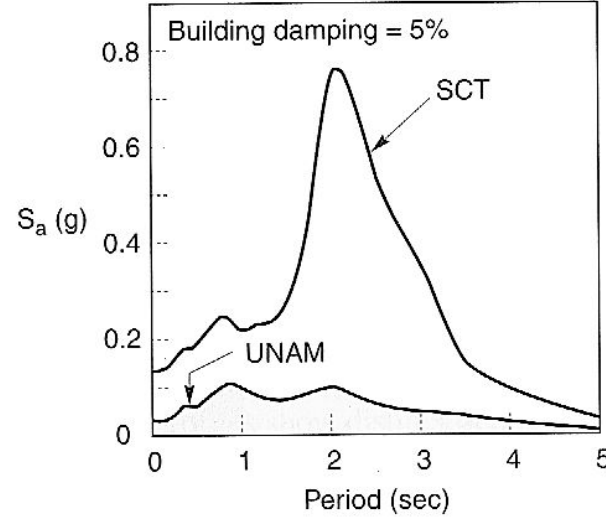
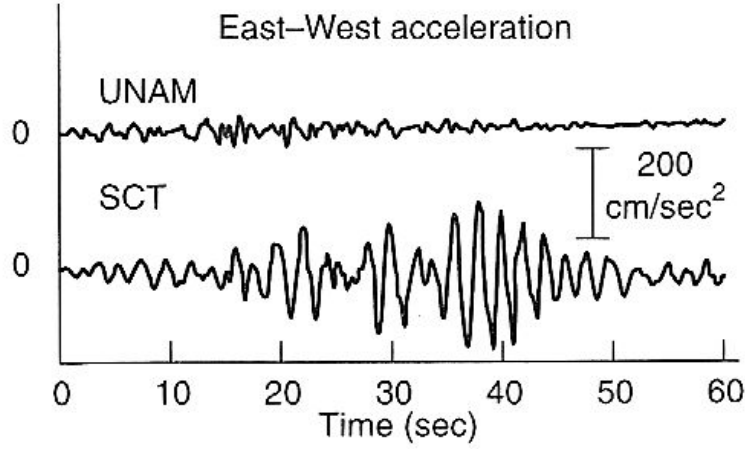
İÇERİK

- Giriş:
 - NGA-East Geoteknik Çalışma Grubu
 - Deprem Yer Hareketi Üzerinde Yerel Zemin Etkisi
 - Zemin Büyütmesi Tanımı
- Çalışma Motivasyonu ve Metodolojisi
- Tek Boyutlu (1D) Zemin Tepki Analizlerinin Gerçekleştirilmesi:
 - Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA) için Parametrik Çalışma Yardımıyla 1D Zemin Tepki Analizleri
 - Batı Amerika (BA) için Küçük Ölçekli bir Uygulama
- Modüler ve Simülasyon-tabanlı Zemin Büyütme Modelleri:
 - Lineer (Doğrusal) ve Nonlineer (Doğrusal olmayan) modeller
 - 2018 Amerika Ulusal Sismik Tehlike Haritalarına uygulama
- OKDA için Gelişmiş ve Geliştirilmiş Parametrik Çalışma (Ilhan, 2020):
 - Güncellenmiş ve geliştirilmiş parametrik çalışma metodolojisi
 - İyileştirilmiş konvansiyonel zemin büyütme modelleri
 - Derin öğrenme yardımıyla Yapay Sinir Ağları (YSA)-tabanlı zemin büyütme modelleri
- Sonuçlar

NGA-East Geoteknik Çalışma Grubu (GÇG)

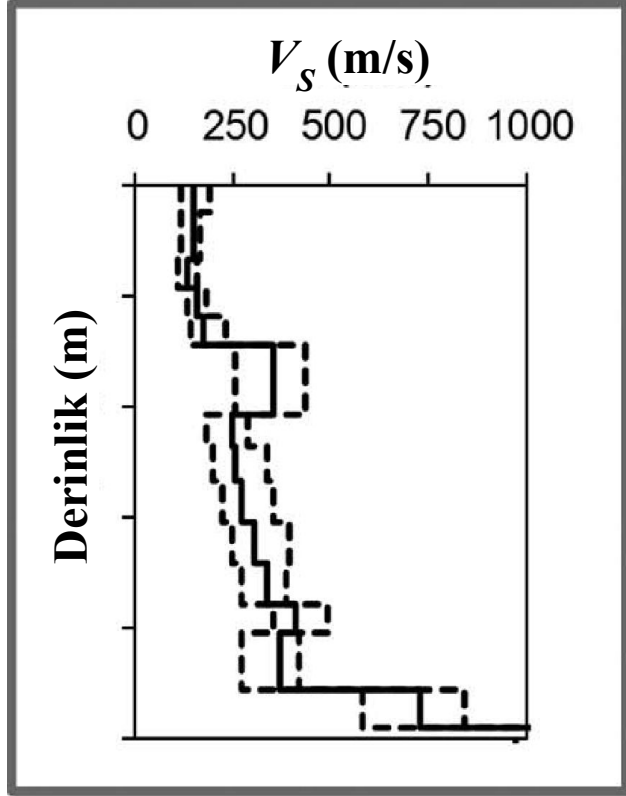
- Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA) için Yeni Nesil Azalım İlişkileri (NGA-East):
 - **Amaç:** OKDA için yer hareketi karakterizasyon modeli geliştirmek
 - Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından koordine edilmiştir.
 - **Sponsorlar:** ABD Enerji Bakanlığı, Elektronik Güç Araştırma Enstitüsü (EPRI) ve ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS)
- NGA-East Geoteknik Çalışma Grubu (GÇG):
 - **Amaç:** Referans taban kayası kayma dalgası hızı (V_s) ile kappa (yüksek frekans spektral azalım parametresi) değerlerinin tayin edilmesi ve zemin büyütme modellerinin geliştirilmesi
 - **Üyeler:**
 - Prof. Youssef M. A. Hashash (Yönetici) - University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC)
 - Prof. Jonathan P. Stewart - University of California, Los Angeles (UCLA)
 - Prof. Ellen M. Rathje - University of Texas at Austin (UT Austin)
 - Dr. Ken W. Campbell - CoreLogic
 - Dr. Walt J. Silva - Pacific Engineering
 - Sektörden önemli ortak çalışanlar ve lisansüstü öğrencileri...
 - Doktora boyunca Prof. Youssef M. A Hashash' ın danışmanlığında NGA-East GÇG için çalıştım ve hala aynı grupta çalışmaya devam etmekteyim.

Deprem Yer Hareketi üzerinde Yerel Zemin Etkisi



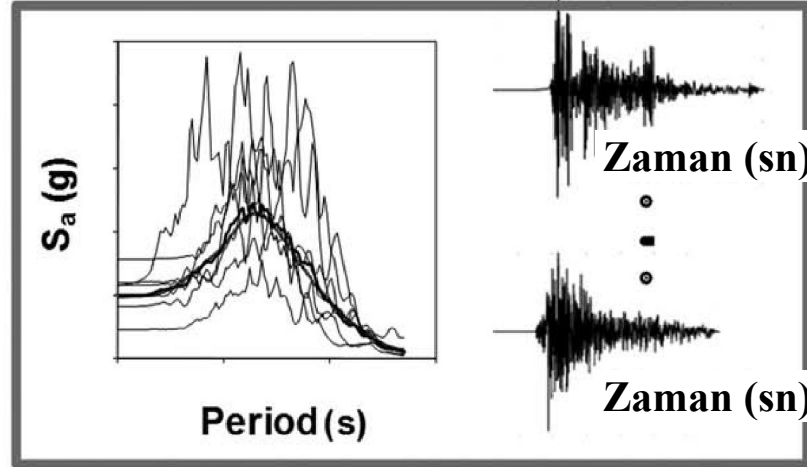
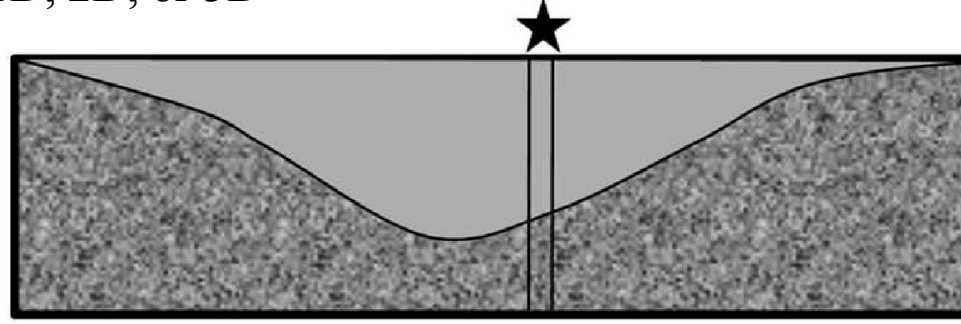
Yerel Zemin Etkisi: *Zemin Tepkisinde Belirsizliğin Kaynakları*

Kayma Dalgası Hızının (V_s) Karakterizasyonu

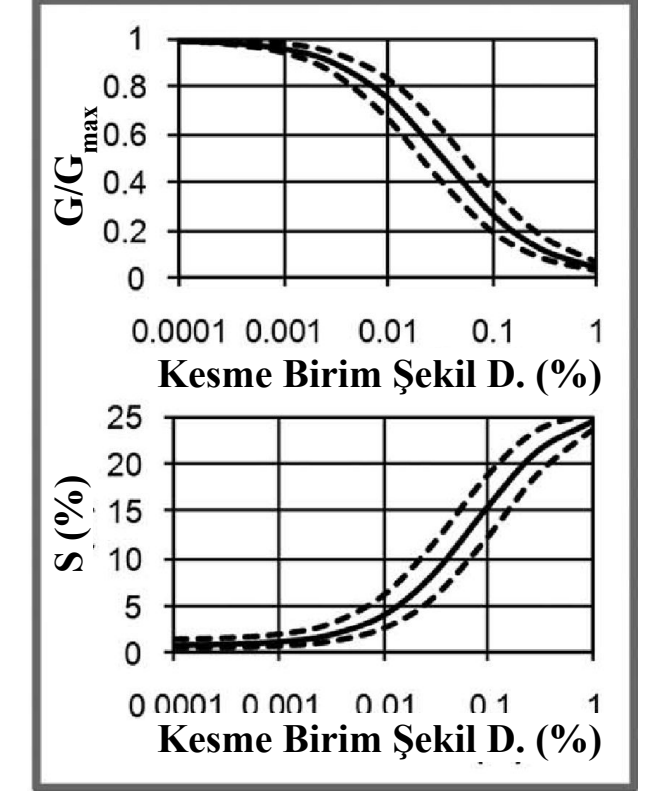


Analiz Yönteminin Seçimi

Eşdeğer-doğrusal, Doğrusal olmayan
1D, 2D, or 3D



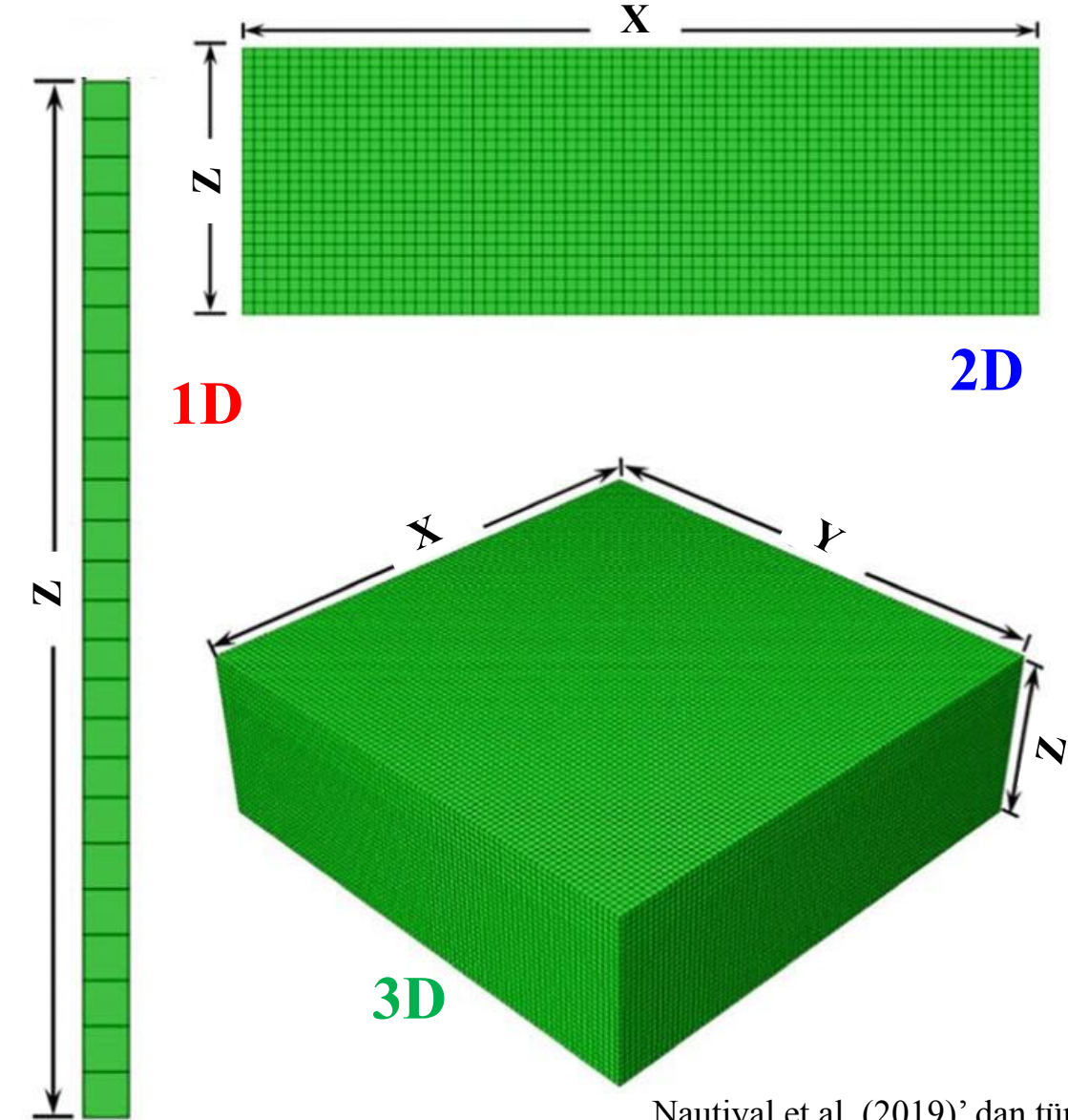
Doğrusal Olmayan Zemin Davranışının Belirlenmesi



Deprem Yer Hareketi Seçimi

Rathje et al. (2010)' den türetilmiştir.

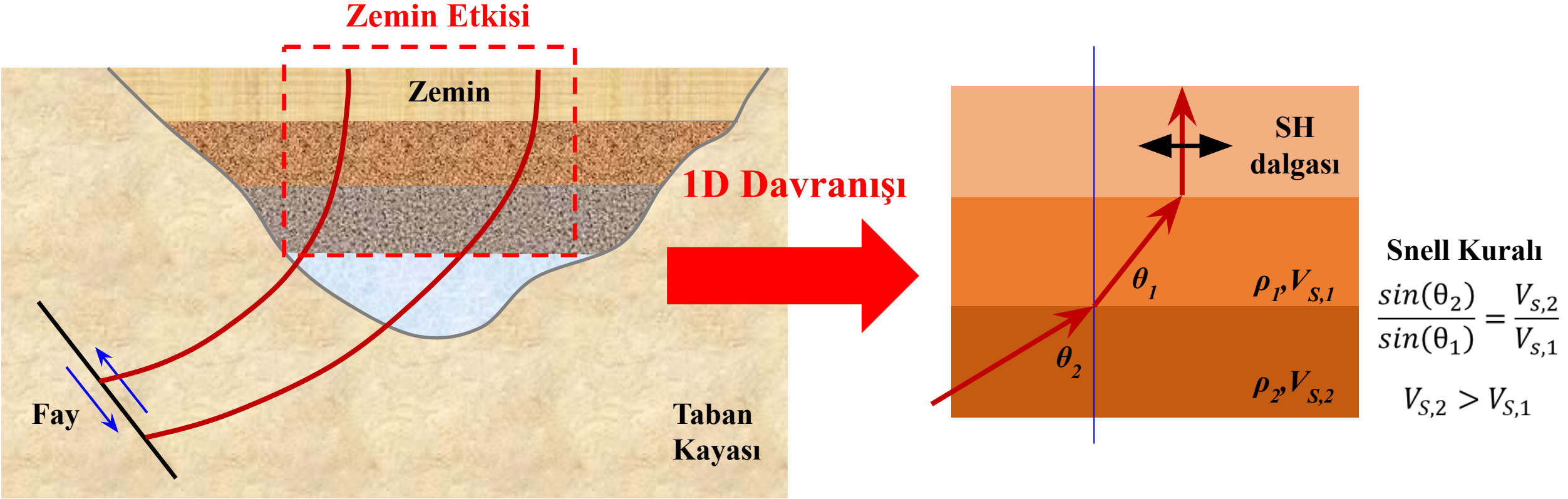
Yerel Zemin Etkisi: *Analiz Boyutu Seçimi*



- Seçilen analiz tipi boyutunun analizin karmaşıklığı üzerinde ciddi bir etkisi bulunmaktadır.
- **2D** ve **3D** analizlerin, zemin ortamında dalga yayılımı probleminin faktörlerini (basen ile basen-kenar etkileri, taban kayası eğimi, vb) **1D**'ye göre daha iyi temsil ettiği bilinen bir durumdur.
- Bu çalışma kapsamında, çok sayıda analiz yapılacağı ve zemin karakteristikleri ile ilintili bilginin kısıtlı olması sebebiyle, **1D** analiz yöntemi benimsenmiştir.

Nautiyal et al. (2019)' dan türetilmiştir.

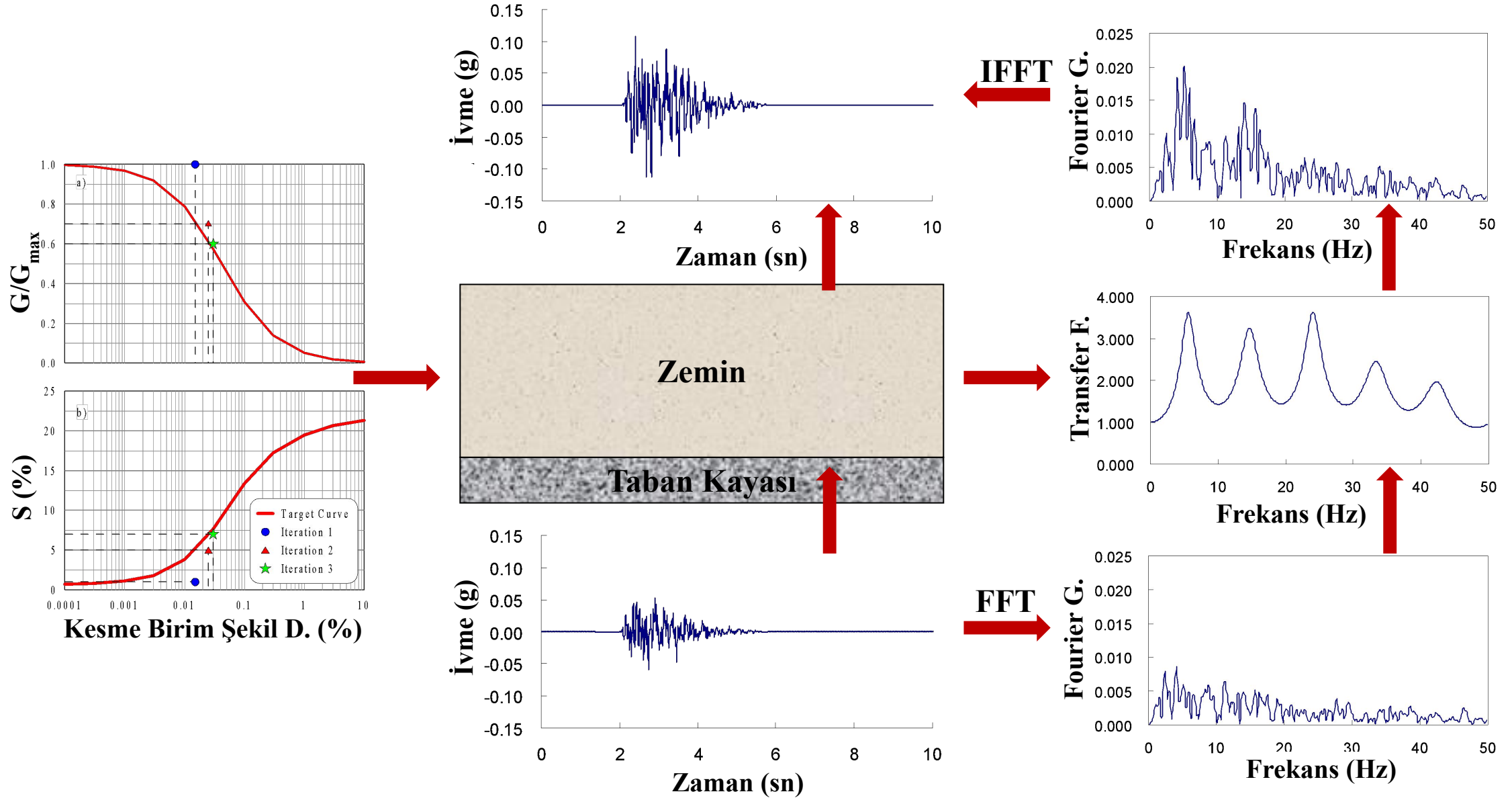
Yerel Zemin Etkisi: *Tek Boyutlu (1D) Analiz Kabulü*



1D Kabulleri:

- Deprem altındaki zemin davranışı, zemin yüzeyine doğru dikey olarak yayılan ve yatay olarak polarize olan SH dalgaları tarafından kontrol edilir.
- Tüm zemin tabaka sınırları yataydır ve tabakalar yatay biçimde sürgit uzanmaktadır.

Yerel Zemin Etkisi: *Eşdeğer Doğrusal 1D Analiz Yöntemi*

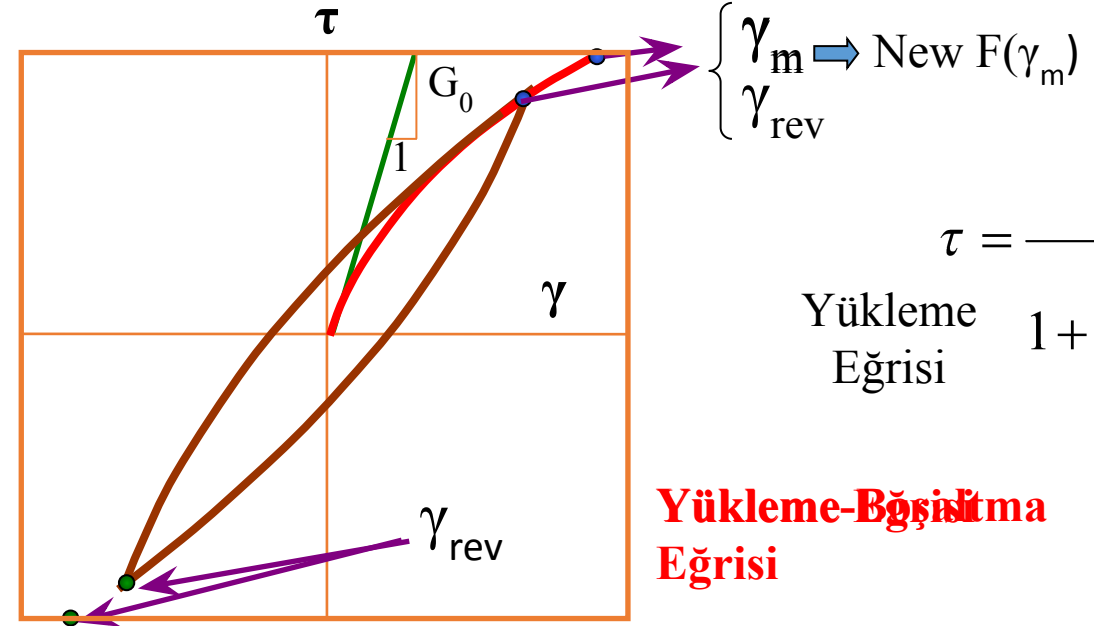
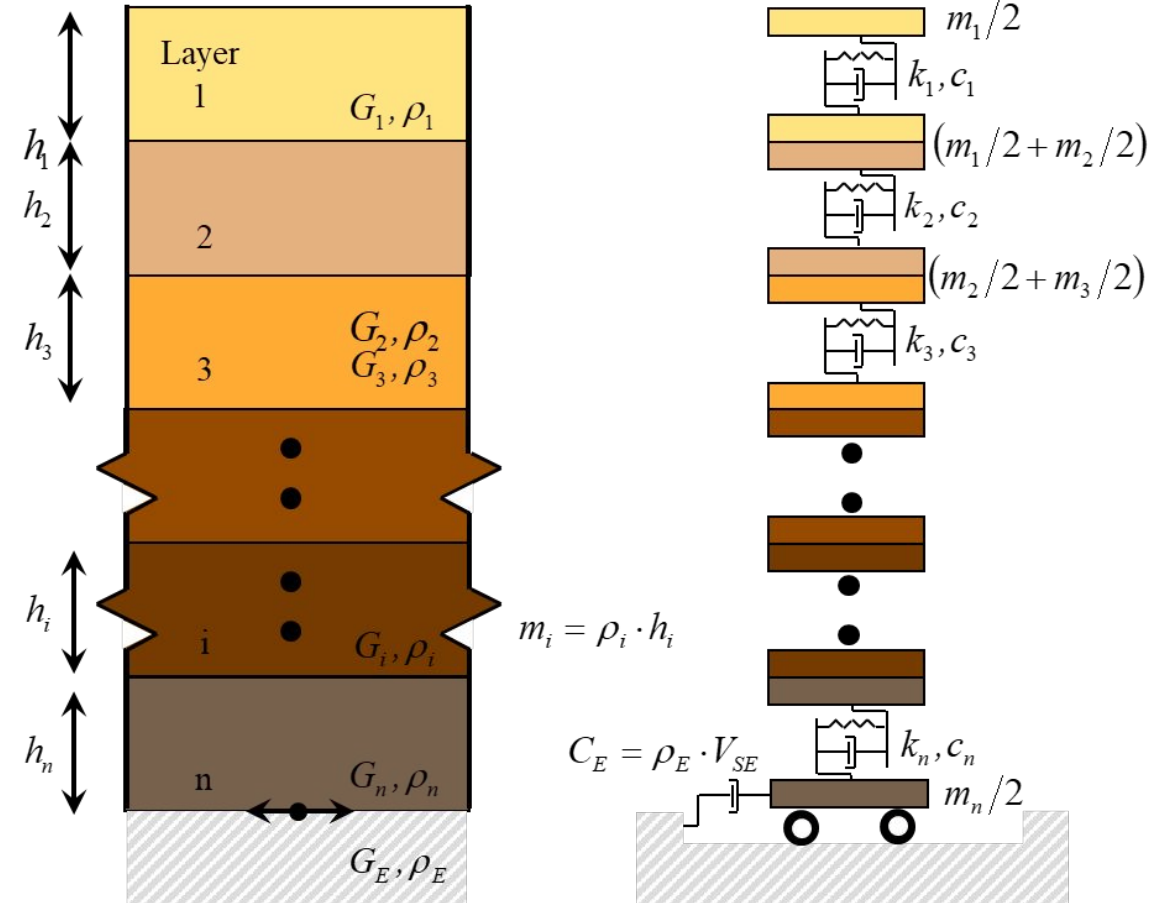


Yerel Zemin Etkisi: *Doğrusal Olmayan 1D Analiz Yöntemi*

**Hareket
Denklemleri**

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g$$

Nümerik Çözüm:



$$\tau = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s}$$

Yüklemme Eğrisi

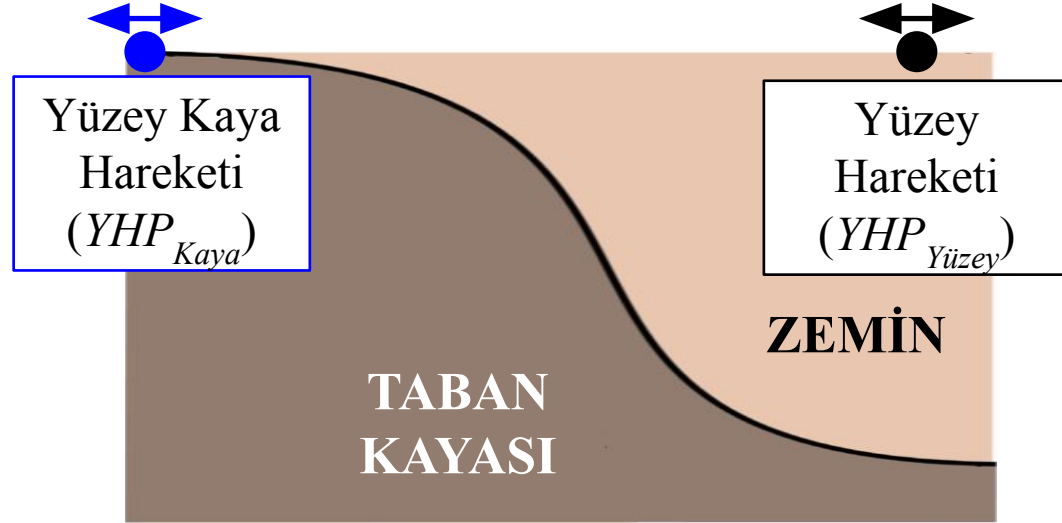
**Yüklemme-Boşaltma
Eğrisi**

$$\tau = F(\gamma_m) \cdot \left[2 \cdot \frac{G_0 \cdot \left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2} \right)}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2 \cdot \gamma_r} \right)^s} - \frac{G_0 (\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} \right] + \frac{G_0 (\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \cdot \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} + \tau_{rev}$$

Yüklemme-Boşaltma Eğrisi

Zemin Büyütmesi: *Tanım*

$$\ln(\text{büyütme}) = \ln \left(\frac{YHP_{Yüzey}}{YHP_{Kaya}} \right) = F_{lin} + F_{nl}$$



Toplam zemin büyütmesi, genellikle doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenlerin toplamı olarak ifade edilir:

- **Doğrusal Büyütme (F_{lin})**: Doğrusal zemin davranışı tarafından temsil edilir (düşük şiddetli depremler). **Zemin özelliklerine bağlıdır.**
- **Nonlinear Büyütme (F_{nl})**: Doğrusal olmayan zemin davranışı tarafından temsil edilir (yüksek şiddetli depremler). **Hem zemin hem de yer hareketi parametrelerine bağlıdır.**

Yer Hareketi Parametresi (YHP):

- PYİ: Pik Yer İvmesi
- PYH: Pik Yer Hızı
- TSİ: Tepki Spektrumu İvmesi (5% sönüm)
- FGS: Fourier Genlik Spektrumu (Düzleştirilmiş)

OKDA ve BA Tektonik ve Jeolojik Özellikleri

OKDA (Orta ve Kuzey Doğu Amerika):

Oldukça rijit taban kayası

Sağlam yerkabuğu,

$$V_s = 3000 \text{ m/s}$$

BA (Batı Amerika):

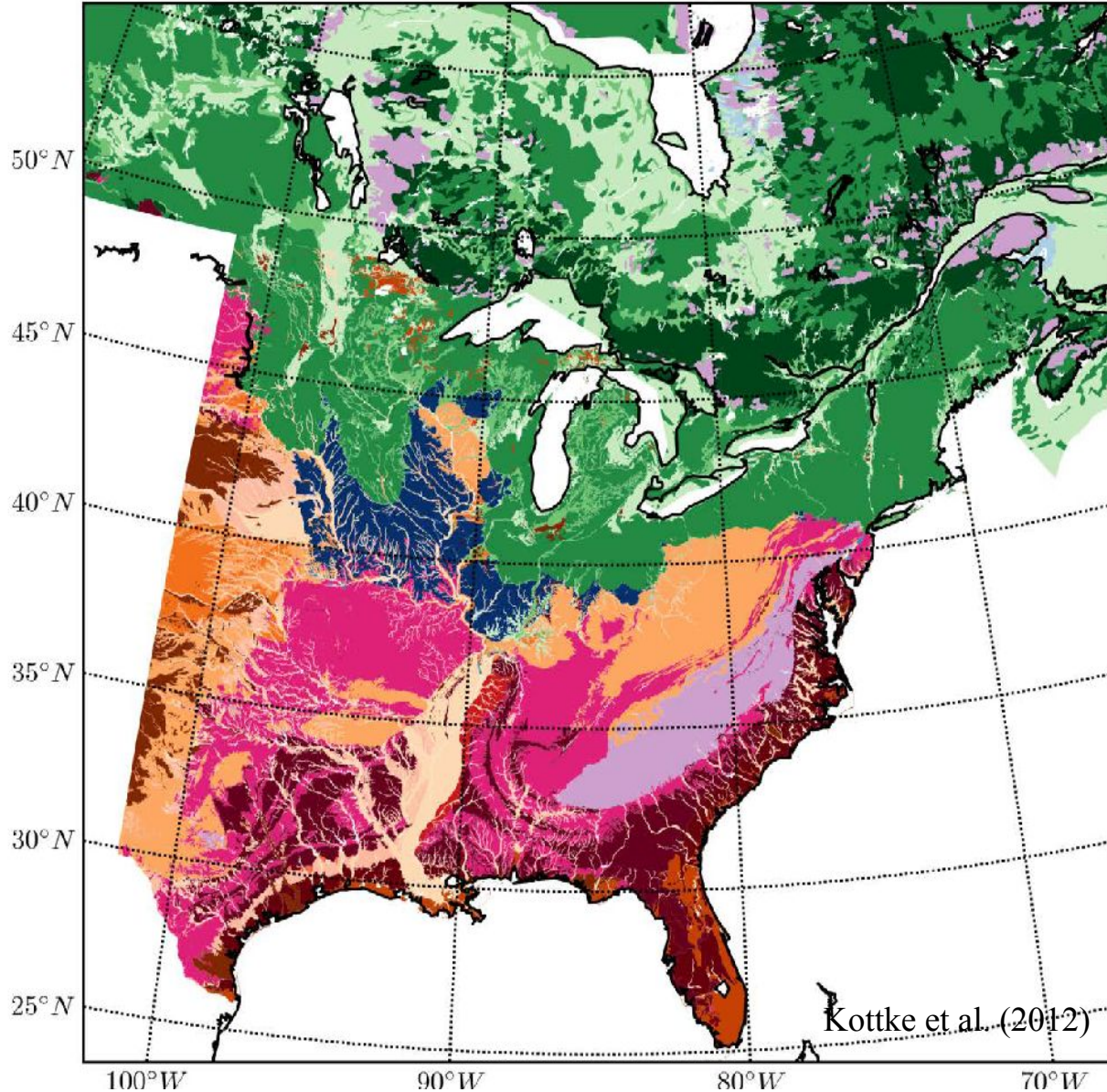
Yumuşak taban kayası

Yerkabuğunda önemli derecede faylanma

$$V_s = 760 \text{ m/s (ya da 1100 m/s)}$$

Petersen et al. (2018)

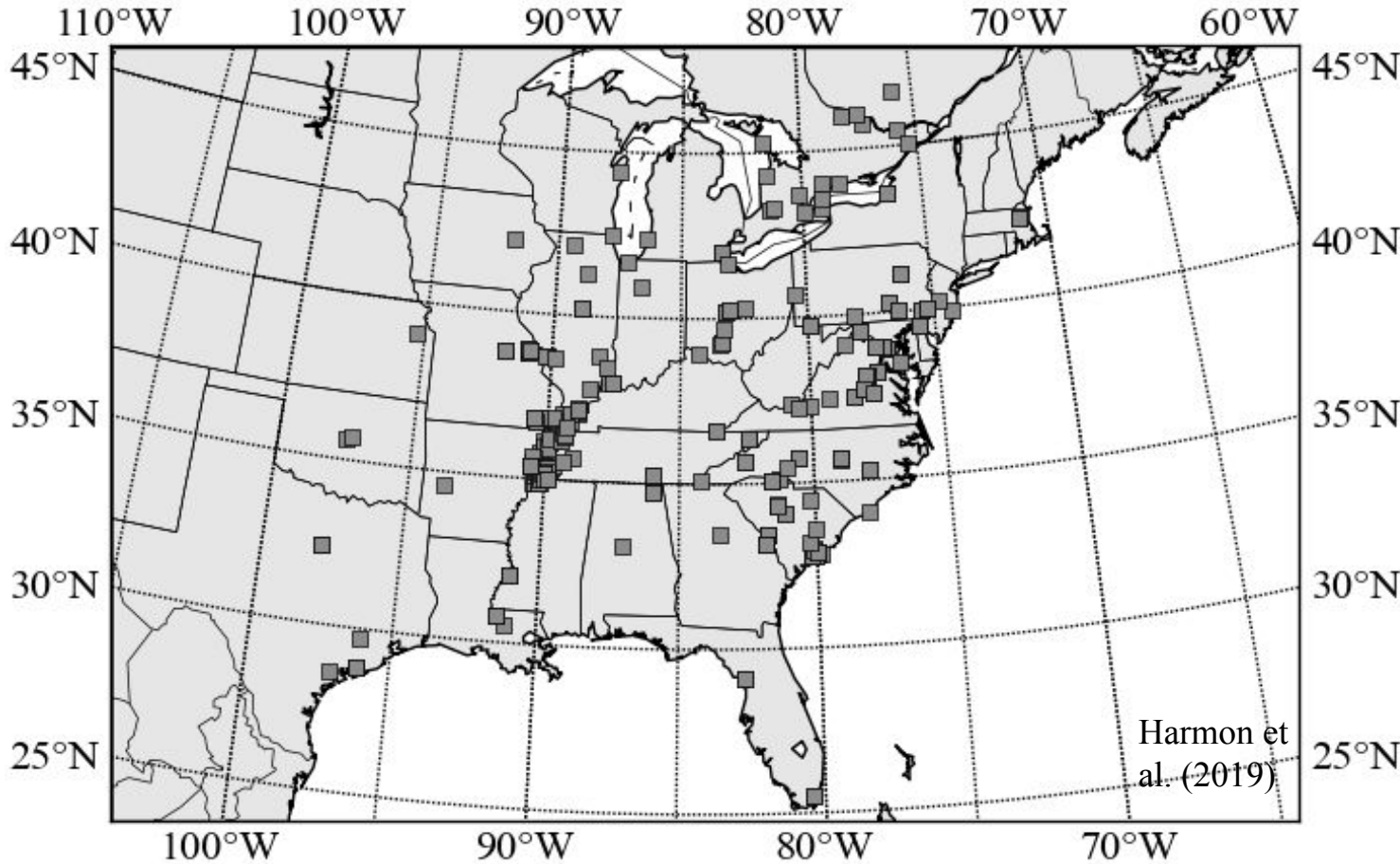
OKDA ve BA Tektonik ve Jeolojik Özellikleri



- OKDA' nın jeolojik yapısı, deprem altındaki zemin davranışını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.
- OKDA Bölgesi' ndeki jeolojik yapıyı kontrol eden buzullanma (glaciation) etkisi, oldukça zengin zemin koşullarının oluşmasına ön ayak olmuştur.
- Sonraki yansılarda görüleceği üzere bu durum, OKDA için mevcut jeolojik yapıların kayma dalgası hız profilleriyle ilişkilendirilmesine imkan tanımıştır.

Jeolojik Sınıflar									
NC	YGm	YNa	YNs	ONa	OGm	YGo	YNc	RRm	ONc
OGl	YGt	YNI	RRs	ONI	OGm	YGo	YNm	RSs	ONm

OKDA Tektonik Özellikleri ve Sismisitesi

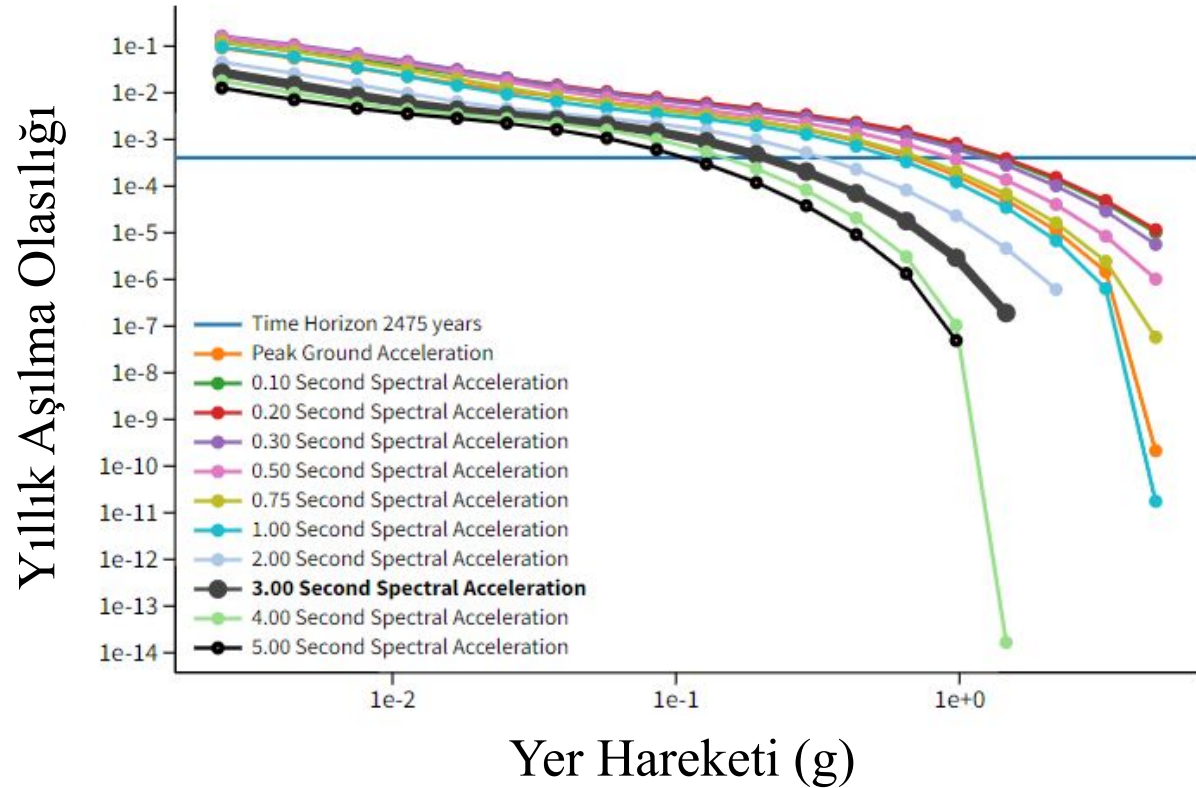


- OKDA'ya hakim taban kayasının oldukça rijit olması ($V_s = 3000$ m/s) sebebiyle ölçülen yer hareketi kayıtlarında yüksek frekanslı içeriğin yüksek olması beklenir.
- Fakat, OKDA stabil bir kıta sahası (stable continental region) olarak bilinir.
- Bu durum, yer hareketi tahmin modelinin geliştirilmesi ve zemin büyütmesinin karakterizasyonu için kısıtlı sayıda yer hareketi verisinin mevcudiyetine sebep olmaktadır.

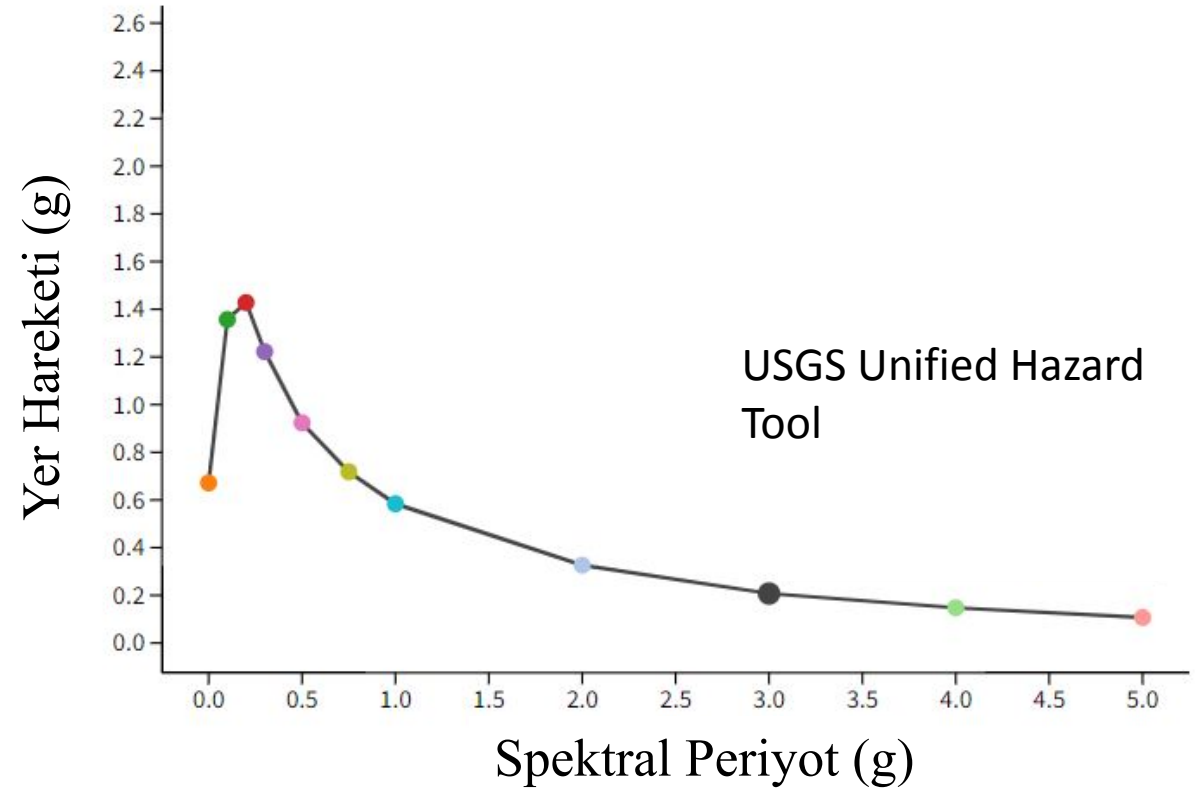
OKDA için yapılan sismik tehlike hesaplamaları kapsamında ***zemin büyütmesi*** ***modeline ihtiyaç bulunmaktadır.***

Sismik Tehlike Analizi: *Zemin Büyütme Modelinin Kullanımı*

Sismik Tehlike Eğrileri



Üniform Tepki Spektrumu



- Sismik tehlike analizinden elde edilen yıllık aşılma olasılığı eğrileri ve buna bağlı tepki spektrumu, taban kayasına göre elde edilir (OKDA için $V_{S30} = 3000$ m/s).
- Farklı zemin koşullarına karşılık gelen üniform tepki spektrumlarının hesabı için [zemin büyütme modellerine \(ya da katsayılarına\) ihtiyaç duyulmaktadır.](#)

Yerel Zemin Büyütmesi: *NEHRP (2015) Katsayıları*

Zemin sınıflandırması

Zemin Sınıfı	Tanım	V_{s30} (m/s)
A	Sağlam Kaya	> 1500
B	Kaya	760 - 1500
C	Çok sıkı zemin/yumuşak kaya	360 - 760
D	Sıkı zemin	180 - 360
E	Yumuşak zemin	< 180
F	Sahaya özel değerlendirme gerektiren profil	N/A

- 2018 Amerika ulusal sismik tehlike çalışmaları öncesi, OKDA için kullanılan yöntemdi.
- Fakat, NEHRP yerel etki katsayıları Batı Amerika yer hareketi veriseti kullanılarak geliştirilmiştir.
- Hashash and Moon (2016) göstermiştir ki, OKDA için üretilecek NEHRP katsayıları profil derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

Kısa-periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları, F_a

Zemin Sınıfı	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	Sahaya özel analiz		
F	Sahaya özel analiz					

Uzun-periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları, F_v

Zemin Sınıfı	$S_I \leq 0.10$	$S_I = 0.20$	$S_I = 0.30$	$S_I = 0.4$	$S_I = 1.50$	$S_I \geq 0.60$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
E	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
F	Sahaya özel analiz					

Yerel Zemin Büyütmesi: *YHM'deki Zemin Büyütme Terimleri*

Yer Hareketi Model (YHM) Formu

$$\ln Y = F_E + F_Z + F_Y + \boxed{F_S} + C$$

Zemin büyütme modeli

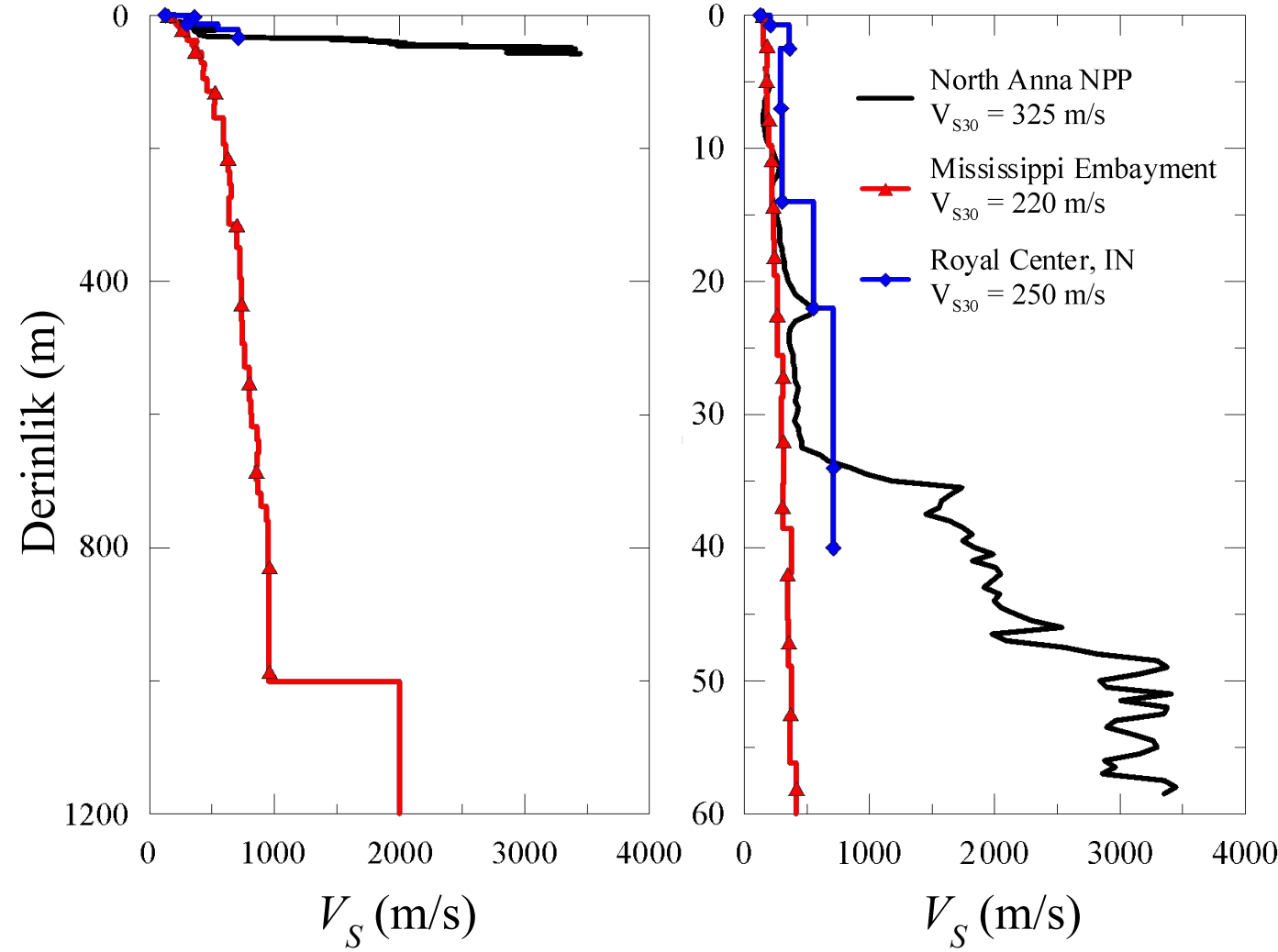
NGA-East kapsamında geliştirilen Yer Hareketi Modelleri

NGA-East Model (2015)	FS	Zemin Parametresi	760 m/s' ye göre zemin etkisi düzeltmesi	Referans koşulu düzeltmesi (760 m/s' den 3000 m/s' ye)
Boore (2015)	No	N/A	N/A	Boore (2015)
Yenier and Atkinson (2015)	Yes	V_{s30}	Seyhan and Stewart (2014)	Atkinson and Boore (2006) BC Crustal Amp
Frankel (2015)	No	N/A	N/A	Frankel et al. (1996)
Al Noman and Cramer (2015)	Yes	V_{s30}	Regression Parameter d_1	NA
Graizer (2015)	Yes	V_{s30}	1-D Site Response Analysis	Site Response Analysis-Based (Atkinson and Boore (2006), Atkinson and Boore (2011)' e benzer)
Hassani and Atkinson (2015)	Yes	V_{s30}	Seyhan and Stewart (2014)	Atkinson and Boore (2006), BC Crustal Amp (Atkinson 2012)
Hollenback et al. (2015)	Yes	V_{s30}	Regression Parameter c_g	Boore (2015)

Zemin büyütmesi modelleri:

- sadece V_{s30} (zemin yüzeyinden 30 m derinliğe kadar ortalama hız değeri) parametresine dayanmaktadır.
- Batı Amerika yer hareketi veritabanı kullanılarak geliştirilen modellerdir.

Yerel Zemin Büyütmesi: V_{S30} Parametresi ve Taban Kayası Derinliği



- OKDA' dan benzer V_{S30} değerlerine sahip üç zemin profili:
 - Mississippi Embayment
 - Mineral, VA
 - Royal Center, IN
- Benzer V_{S30} değerlerine rağmen taban kayası derinliğinin farklı olması, çok farklı zemin davranışının gözleneceğine işaret etmektedir.

Sadece V_{S30} parametresi, OKDA' da gözlenmesi muhtemel zemin koşullarını temsil etmemektedir.

Çalışma Motivasyonu

Orta ve Kuzey Doğu Amerika, bölgeye özgü zemin büyütme modellerinden (ya da katsayılarından) yoksundur.

- Ampirik modeller geliştirmek için yeterli sayıda kuvvetli yer hareketleri kaydı bulunmamaktadır.
- Mevcut zemin büyütme modelleri, farklı bölgeler için geliştirilmiştir.
- V_{s30} parametresi tek başına OKDA' daki zemin davranışını temsil etmek için yetersizdir.
- Tüm bu nedenler sebebiyle, OKDA için yapılacak sismik tehlike analizleri, yer hareketi modellemeleri ve mühendislik tasarımları için zemin büyütmesi fonksiyonlarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Çalışma Yöntemi

1. Aşama

Orta ve Kuzey Doğu zemin koşullarının tek boyutlu (1D) simülasyonlarını içeren bir veritabanı oluşturmak

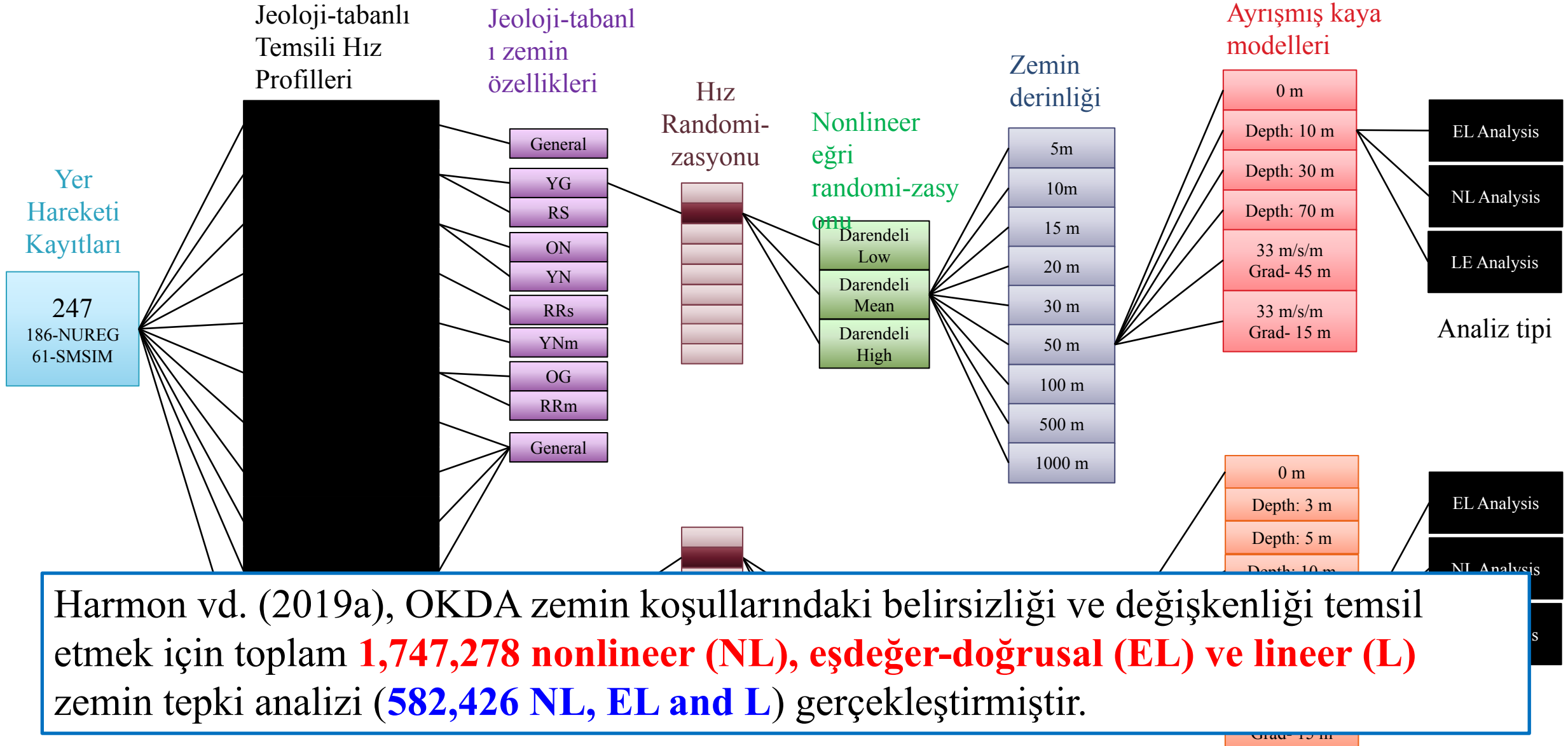
2. Aşama

Bu veritabanının simülasyon tabanlı zemin büyütme modelleri üretmek için kullanmak

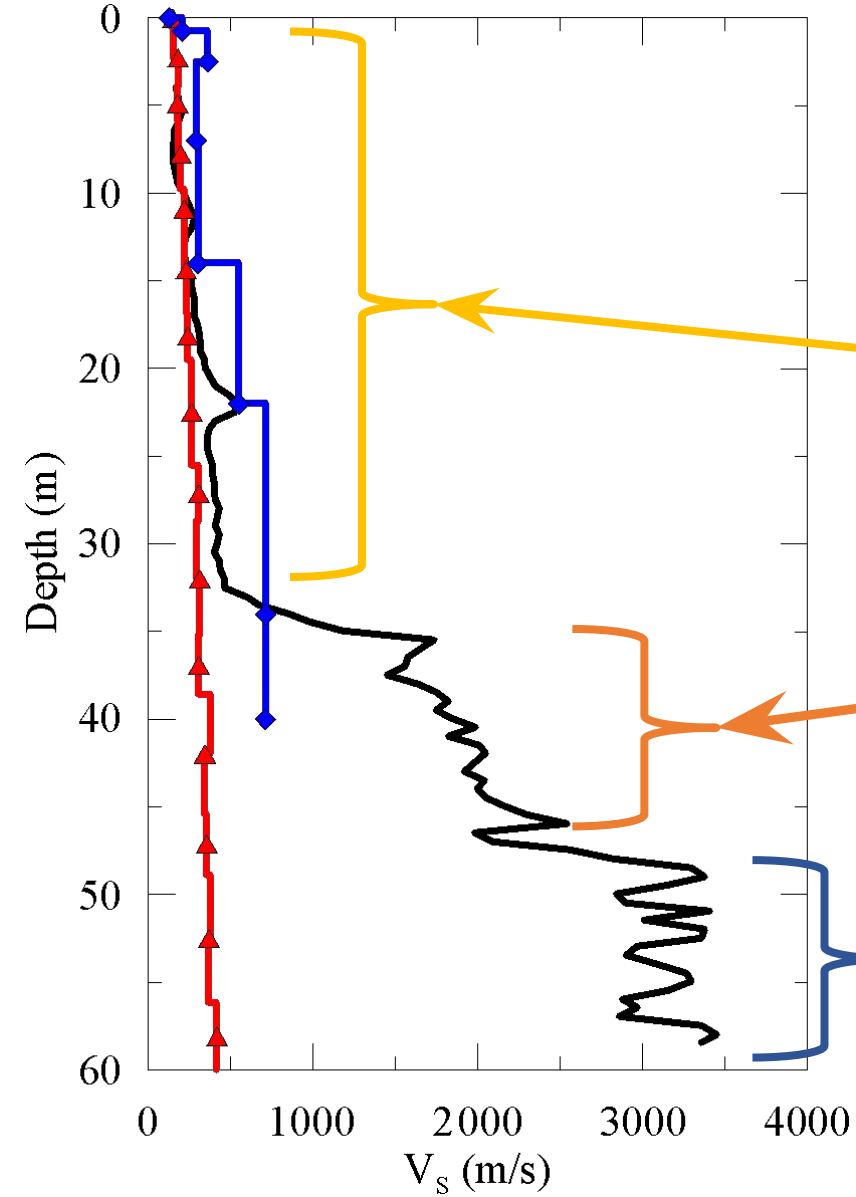
- Zemin tepkisindeki belirsizliği ve değişkenliği göz önünde bulundurmak için bir parametrik çalışma ağacı geliştirilmiştir.
- 1D zemin tepki analizlerinin hesaplama maliyeti düşüktür ve saha etkisinin önemli özelliklerini temsil edebilmektedir.

Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA) 1D Zemin Tepki Analizleri için Parametrik alışma Tasarımı

OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



OKDA için Parametrik Çalışma Ağacı: V_s Profili Yapısı



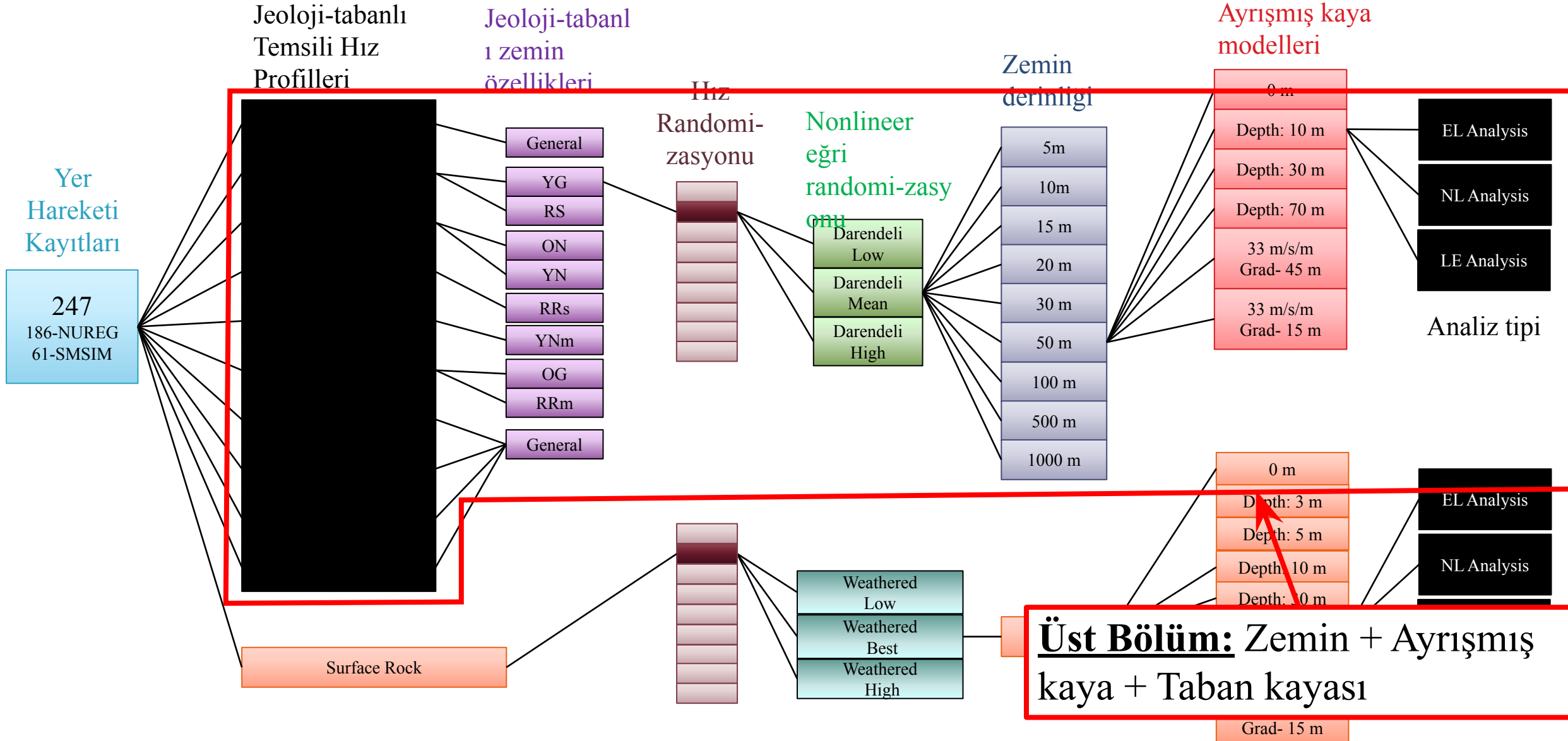
OKDA'daki zemin koşullarını tanımlamak için üç farklı horizon kullanılmıştır.

Zemin horizonu

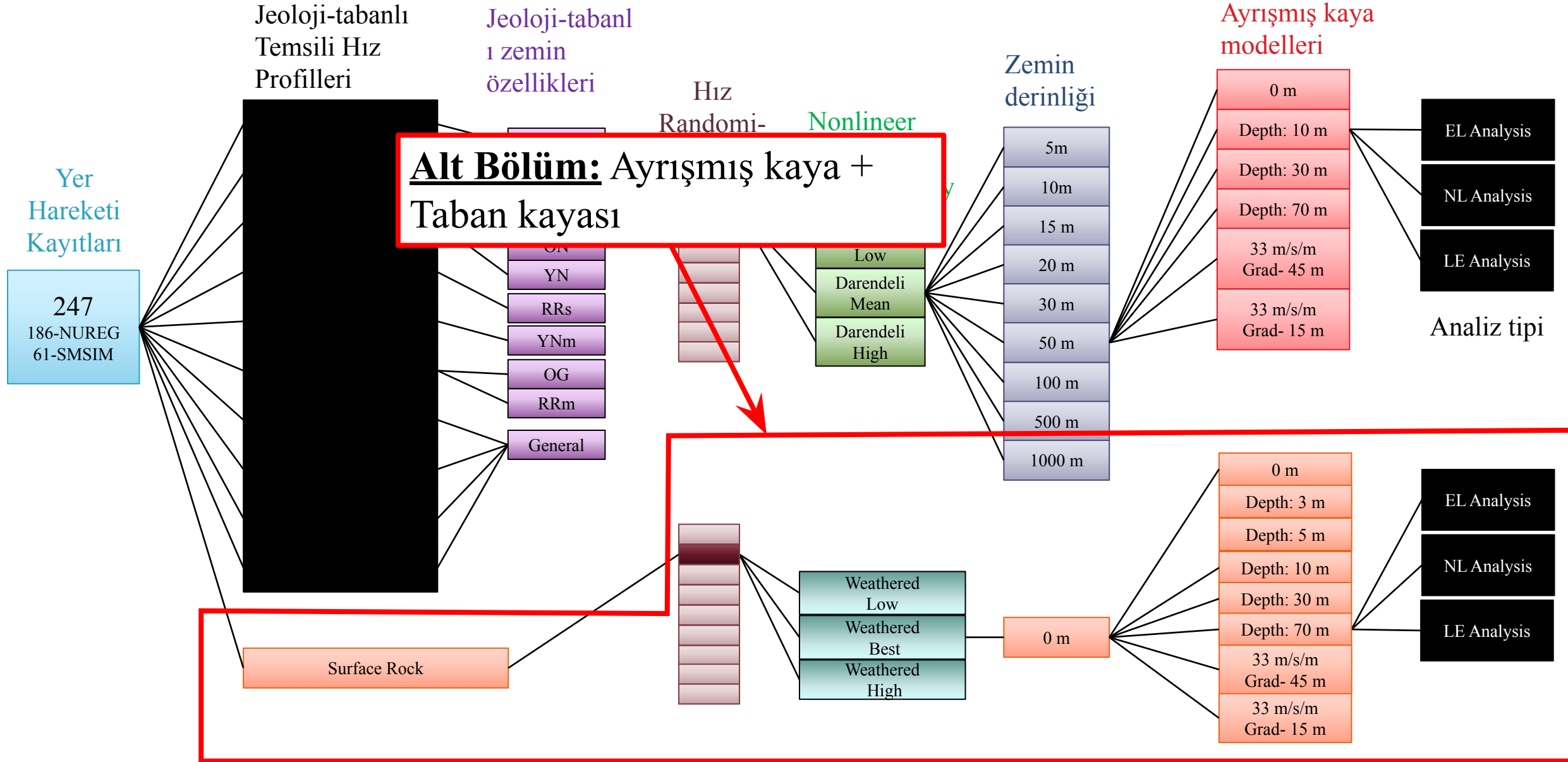
Ayrışmış kaya horizonu

Taban kayası horizonu
 $V_s = 3000$ m/s
(Hashash et al. 2014)

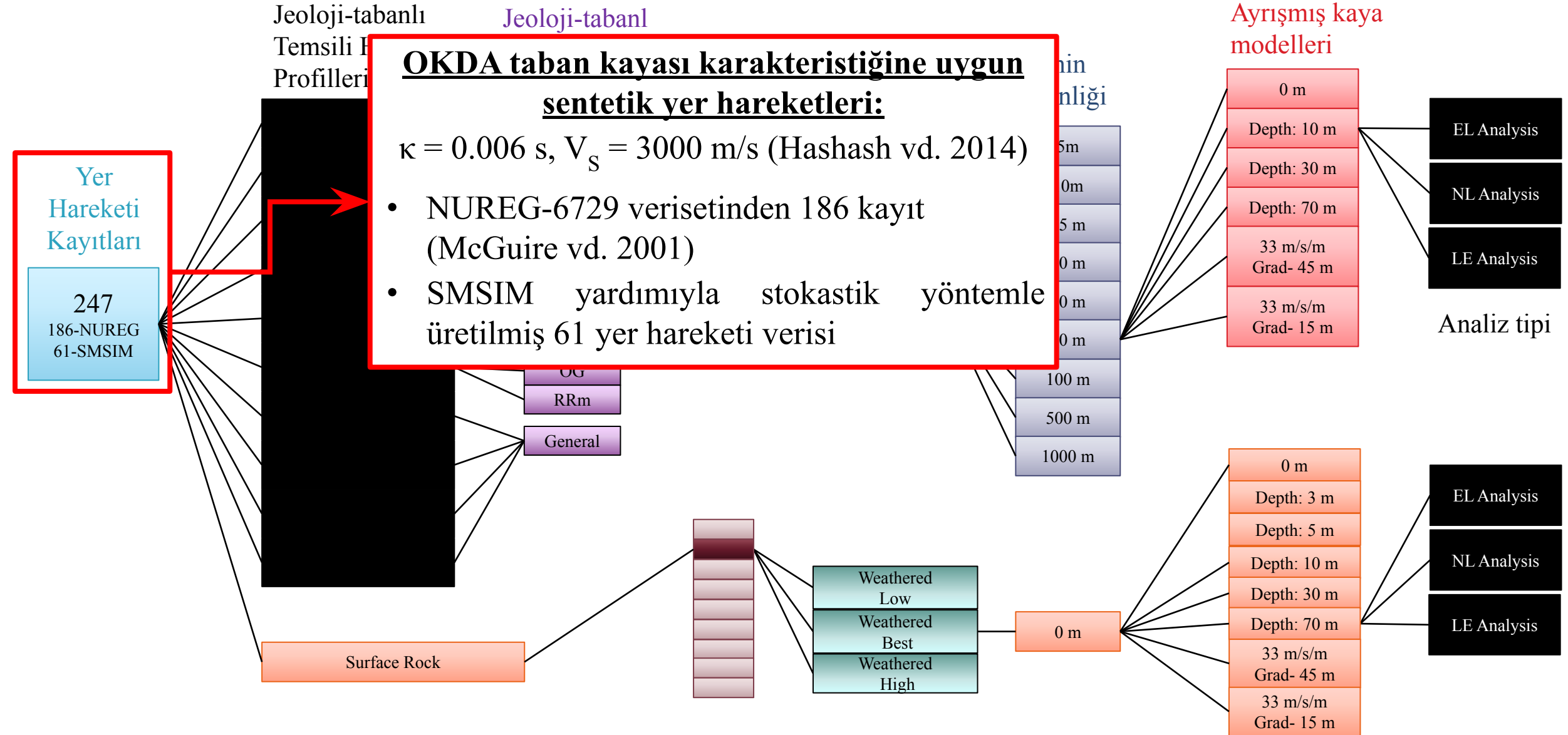
OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



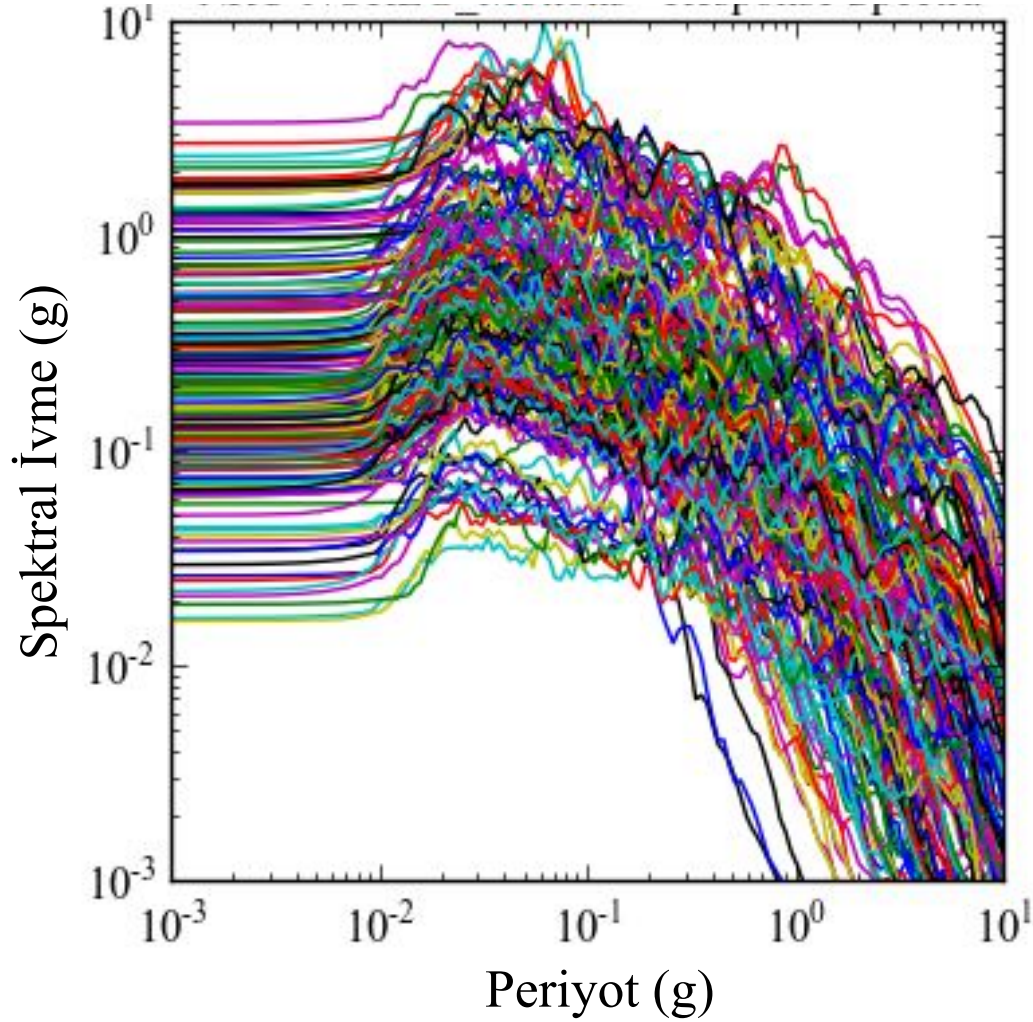
OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



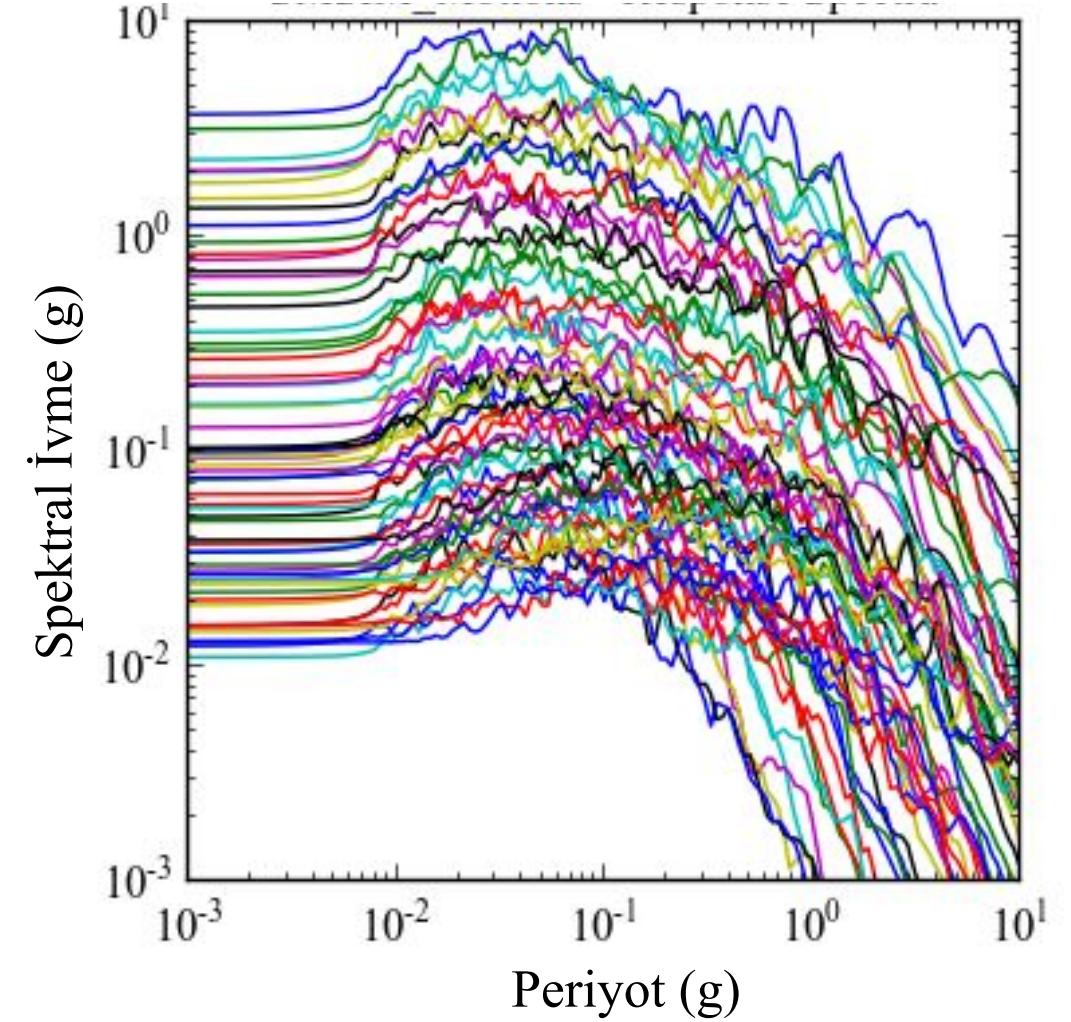
Parametrik Çalışma Ağacı: *Yer Hareketi Verileri*



Parametrik Çalışma Ağacı: *Yer Hareketi Verileri*

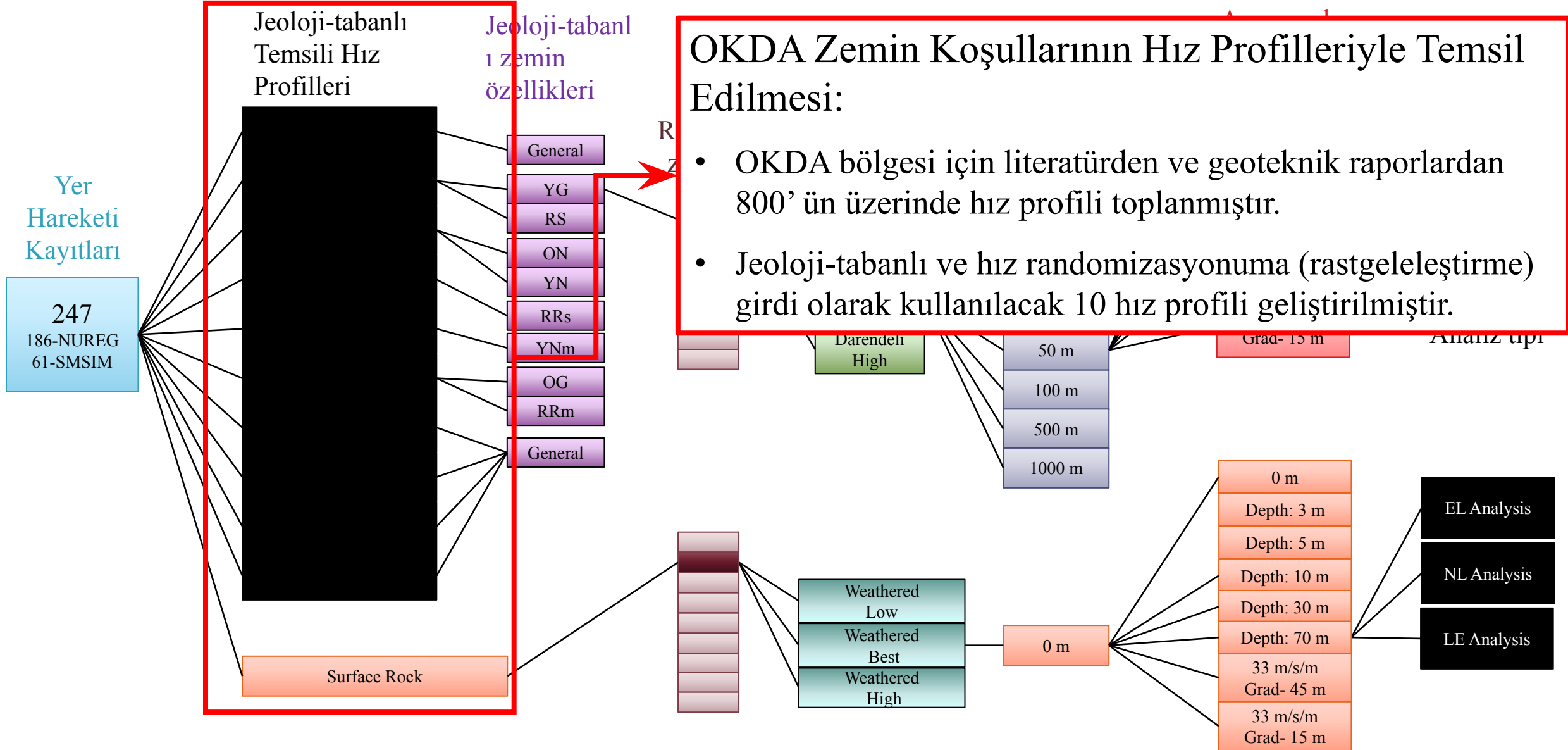


NUREG-6729 verisetinden 186 kayıt
(McGuire vd. 2001)

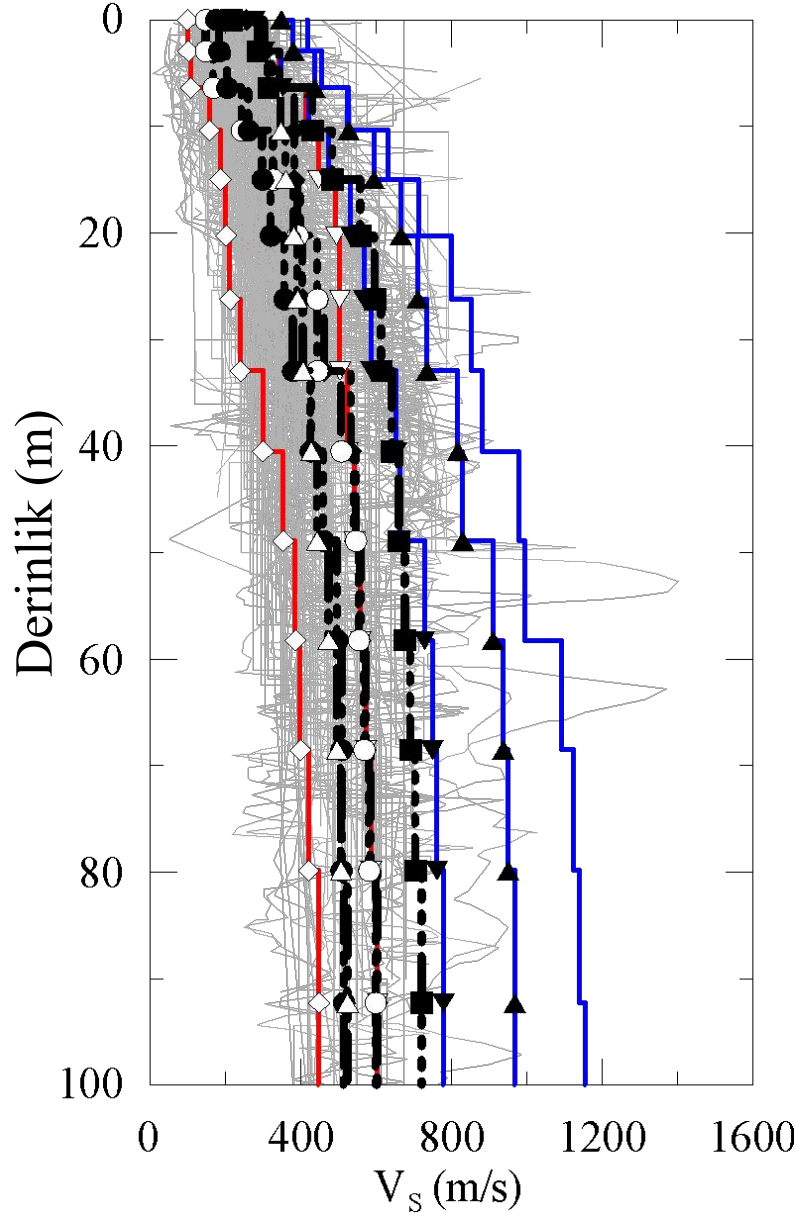


SMSIM yardımıyla stokastik yöntemle
üretilmiş 61 yer hareketi verisi

Parametrik Çalışma Ağacı: *Jeoloji-Tabanlı Temsili Hız Profilleri*

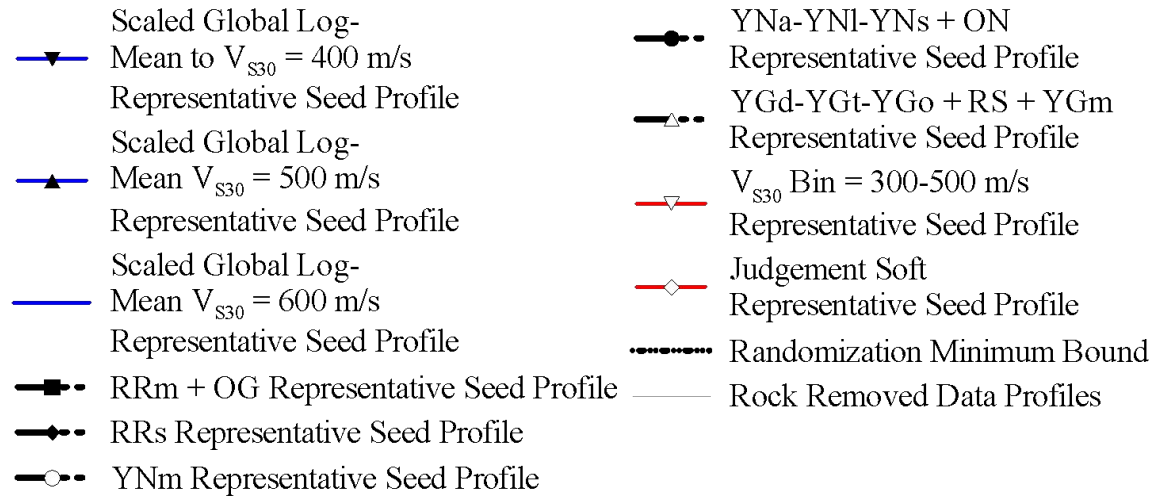


Parametrik Çalışma Ağacı: *Jeoloji-Tabanlı Temsili V_s Profilleri*



Geliştirilen 10 farklı hız profili, V_s randomizasyonuna (rastgeleleştirme) girdi olarak kullanılmıştır.

- Jeolojik sınıflandırmaya dayalı (Kottke vd., 2012) beş (5) profil
- Diğer beş (5) profil, mühendislik değerlendirmesine bağlı olarak türetilmiştir.



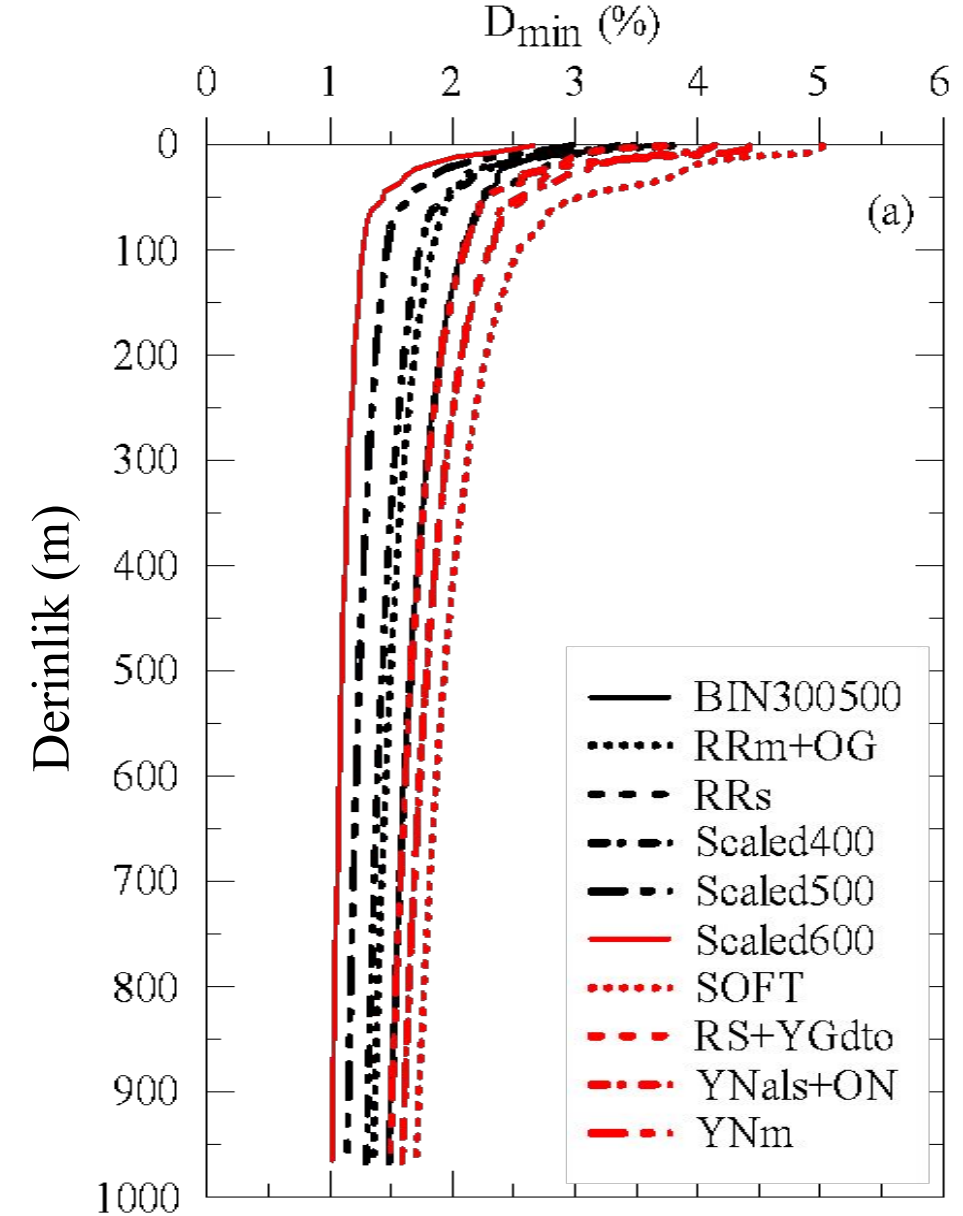
Parametrik Çalışma Ağacı: D_{min} Modeli Seçimi

- D_{min} : Oldukça düşük kayma birim şekil değiştirme değerlerindeki zemin sönüm değeri (viskoz sönüm).
- Fourier genlik spektrumunun şeklinin tayininde oldukça etkili bir parametredir.

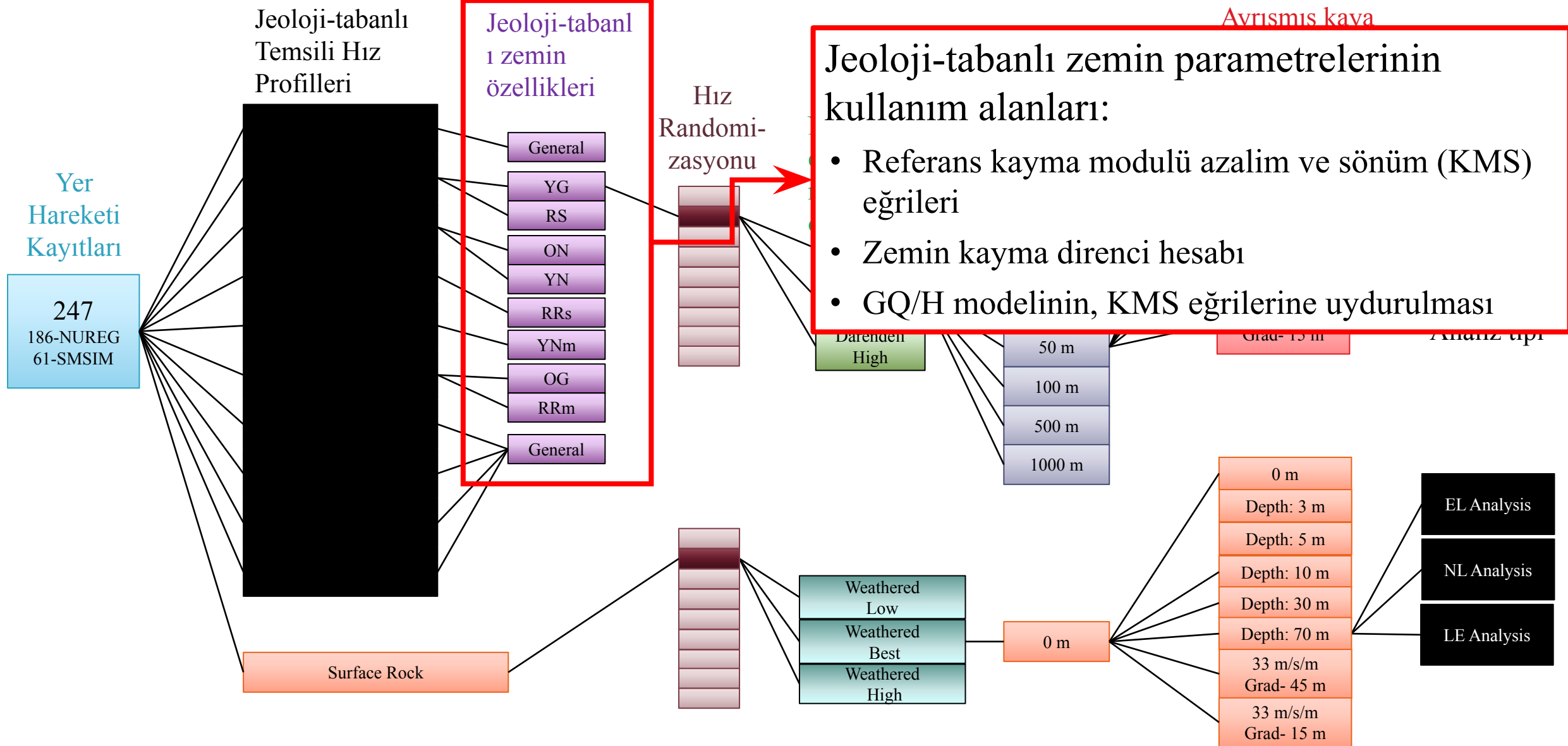
Campbell (2009) Model I

$$Q = 7.17 + 0.0276 V_S, D_{min} = \frac{1}{2Q}$$

D_{min} değerleri derinliğe bağlı olarak, jeolojik-tabanlı V_S profilleri için solda görüldüğü üzere hesaplanmıştır.



Parametrik Çalışma Ağacı: *Jeoloji-Tabanlı Zemin Özellikleri*

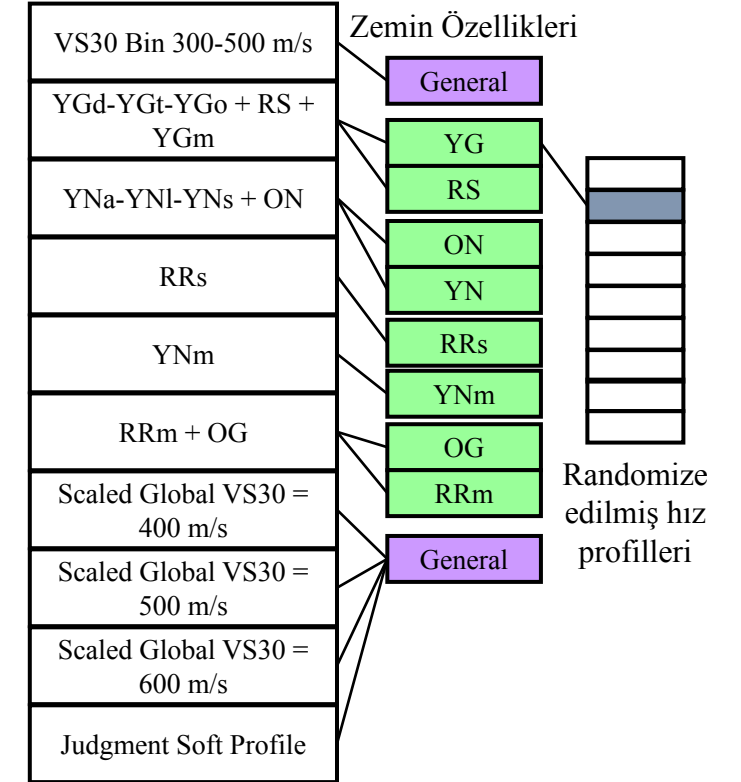


Jeoloji Tabanlı Zemin Parametreleri

Zemin parametreleri, Darendeli (2001)'nin formüle ettiği kayma modülü azalım ve sönüm eğrilerinin hesabında kullanılmıştır.

Zemin Materyali	PI (%)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	OC R	Kayma Direnci Açısı (ϕ°)
General	15	19	1.5	25
Weathered Rock Zone	5	21	3	40
Young Glaciated	15	18.9	1.3	30
Old Glaciated	20	18.6	3	30
Young Nonglaciated	20	18.5	1.3	30
Old Nonglaciated	30	19	2	30
Residual Soil from Sedimentary Rock	24	19.4	3	25
Residual Soil from Metamorphic Rock	10	19	3	25
Residual Soil	30	19.3	3	25

Temsili V_s profilleri



Kayma Modülü Azalım ve Sönüm (KMS) Eğrilerinin Belirlenmesi

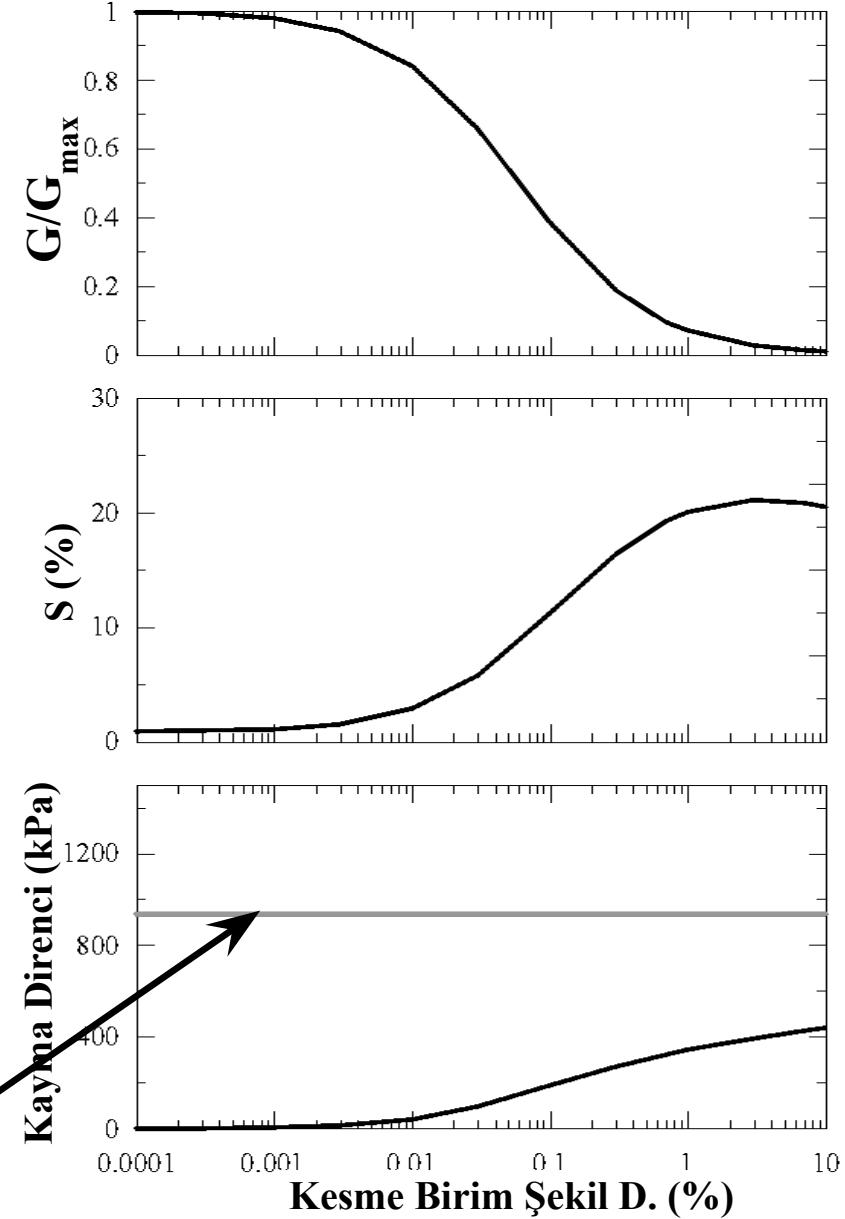
Darendeli (2001) tarafından geliştirilen kayma modülü azalım ($G/G_{\max}$) ve sönüm (S) ilişkileri (KMS), doğrusal olmayan zemin davranışını belirlemek için kullanılmıştır.

- Plastisite indeksi, aşırı konsolidasyon basıncı ve ortalama çevresel basınç
- $G/G_{\max}$ ve sönüm eğrileri için ampirik ilişkiler

Kayma direnci kontrolü yoktur.

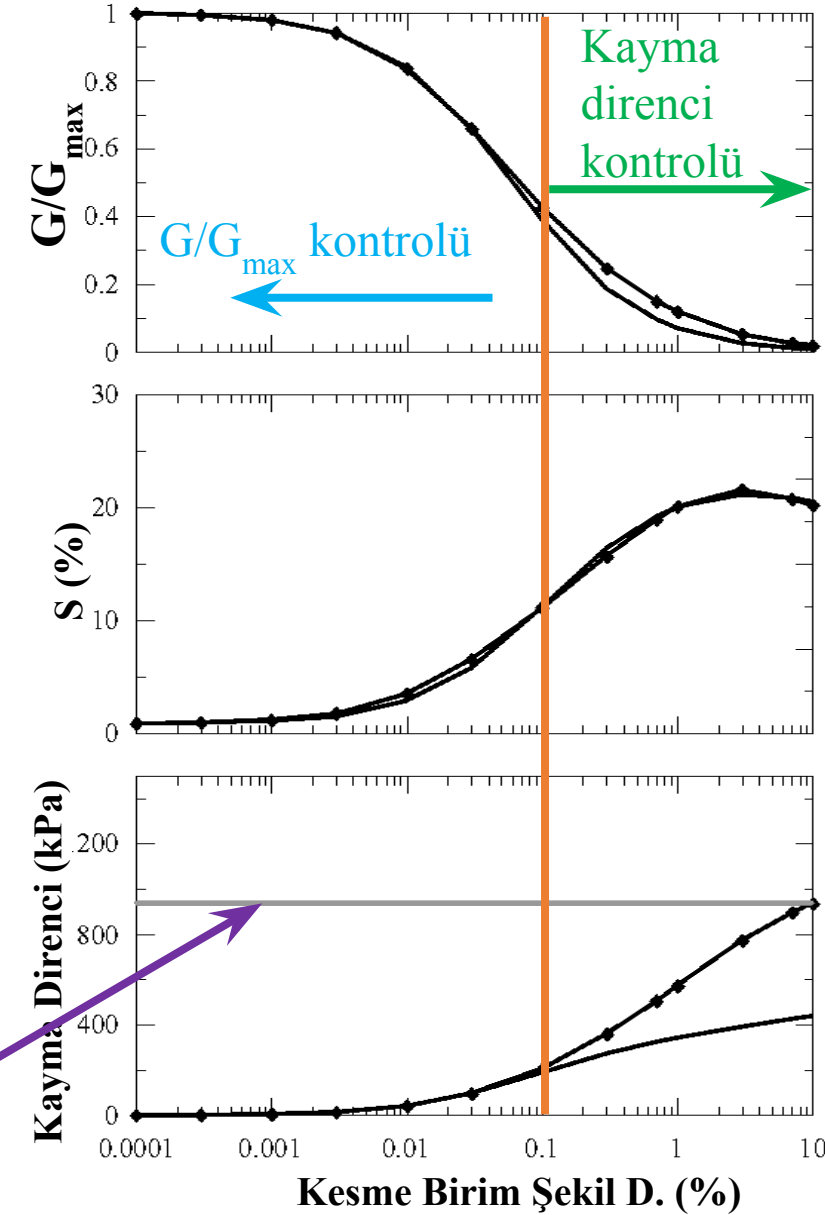
$$\tau_{\text{implied}} = \rho \cdot V_s^2 \cdot \frac{G}{G_{\max}} \cdot \gamma$$

Hedef Kayma Direnci



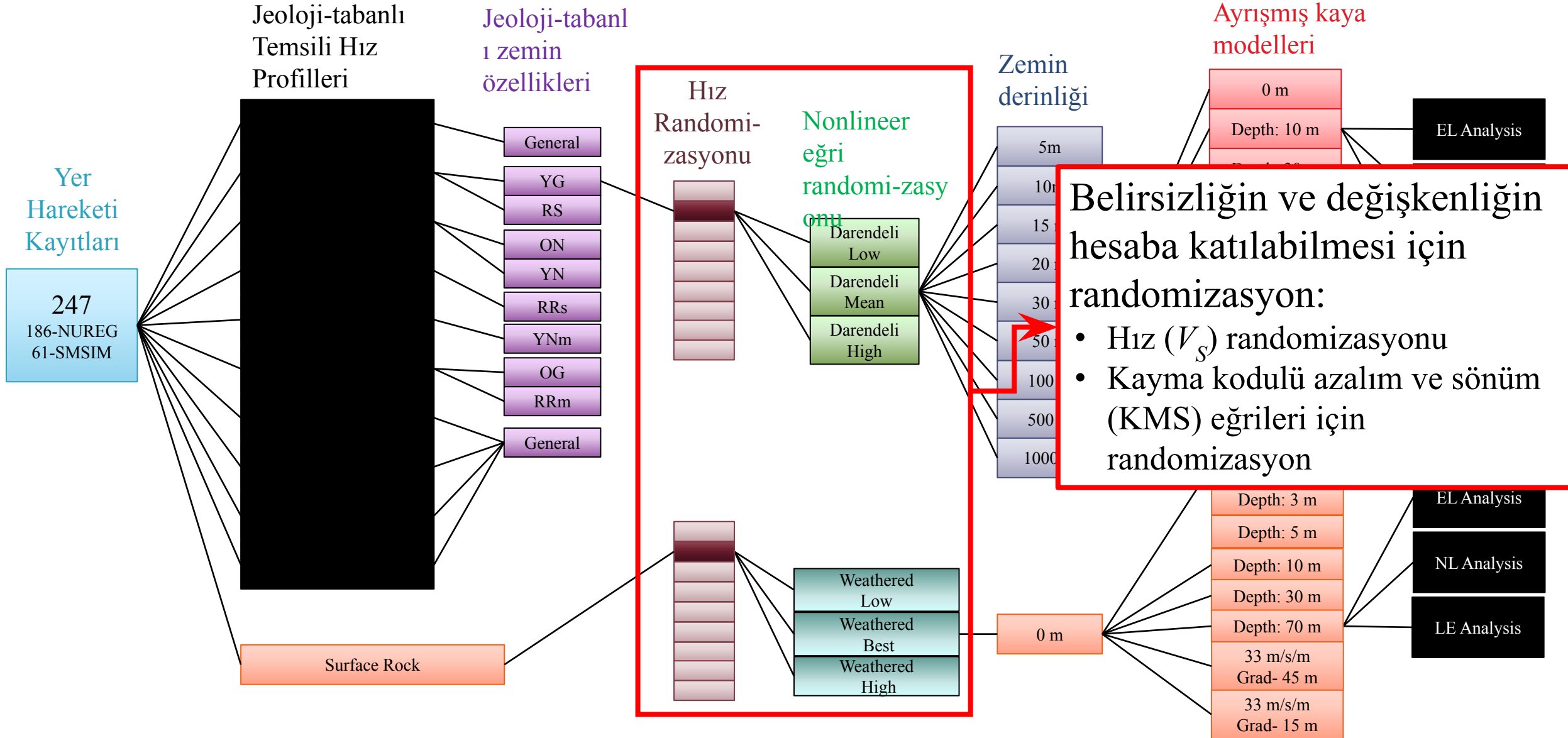
KMS Eğrilerinin Belirlenmesi: *GQ/H Zemin Modeli*

- KMS eğrilerini temsil etmek için, GQ/H (general quadratic/hyperbolic) modeli (Groholski vd., 2016) Darendeli (2001) eğrilerine uydurulmuştur.
- GQ/H modeli:
 - yüksek kayma birim şekil değiştirme (BŞD) değerlerinde, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin zemin kayma direncine asimptot oluşturmaya
 - Düşük kayma BŞD değerlerinde ise, G/G_{max} davranışının korunmasınaimkan tanınmaktadır.



Hedef Kayma Direnci

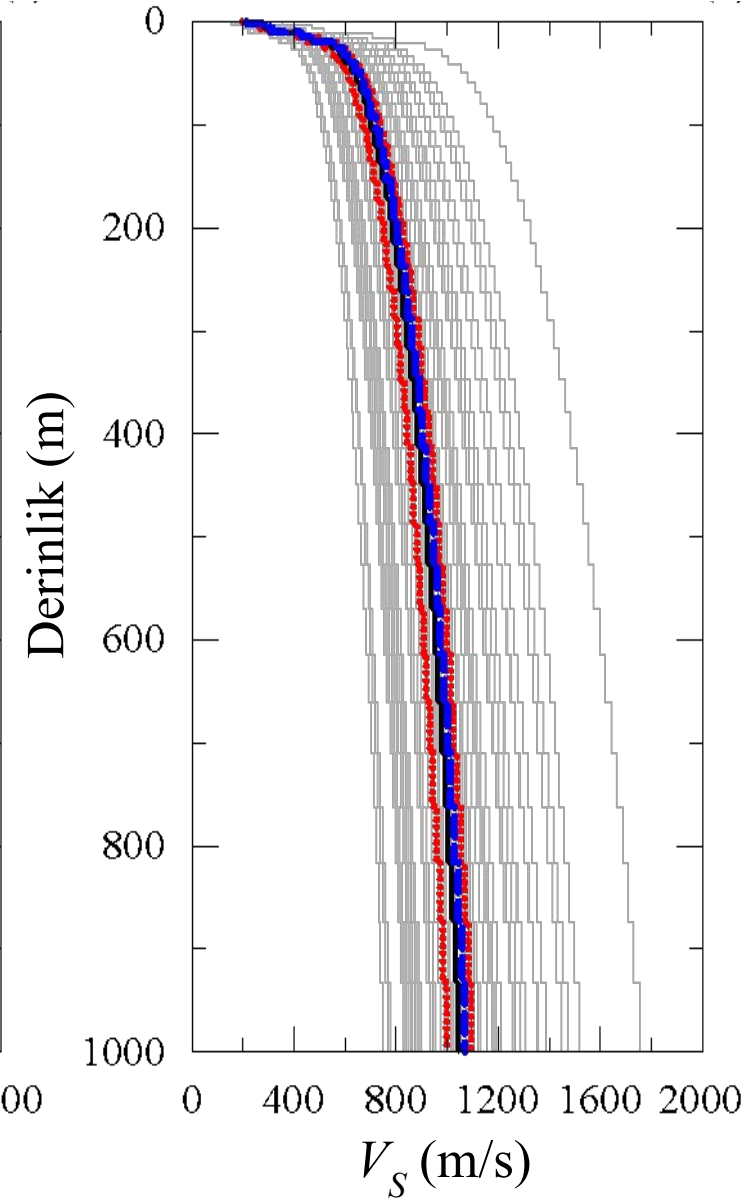
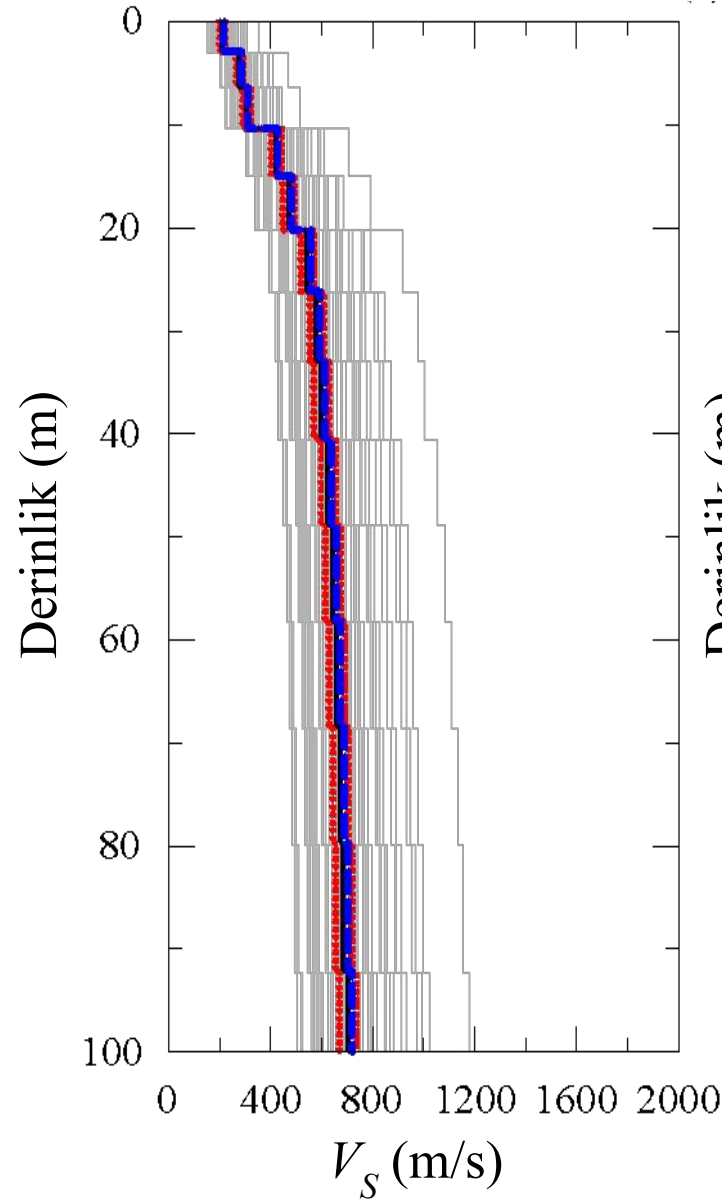
Parametrik Çalışma Ağacı: *KMS ve V_s Randomizasyonu*



Hız (V_s) Randomizasyonu

V_s randomizasyonu:

- **Jeoloji-tabanlı temsili V_s profili**, Toro (1995) istatistiksel hız modeline girdi olarak verilir.
- **İstenilen sayıda (30) jenerik V_s profili**, modele verilen katsayılar dikkate alınarak Toro (1995) tarafından üretilir.
- Seçilen Toro (1995) modeli katsayıları:
 - Tabakalar arası korelasyon katsayısı (ρ) = 1.0
 - V_s standart sapması ($\sigma_{\ln V_s}$) = 0.2



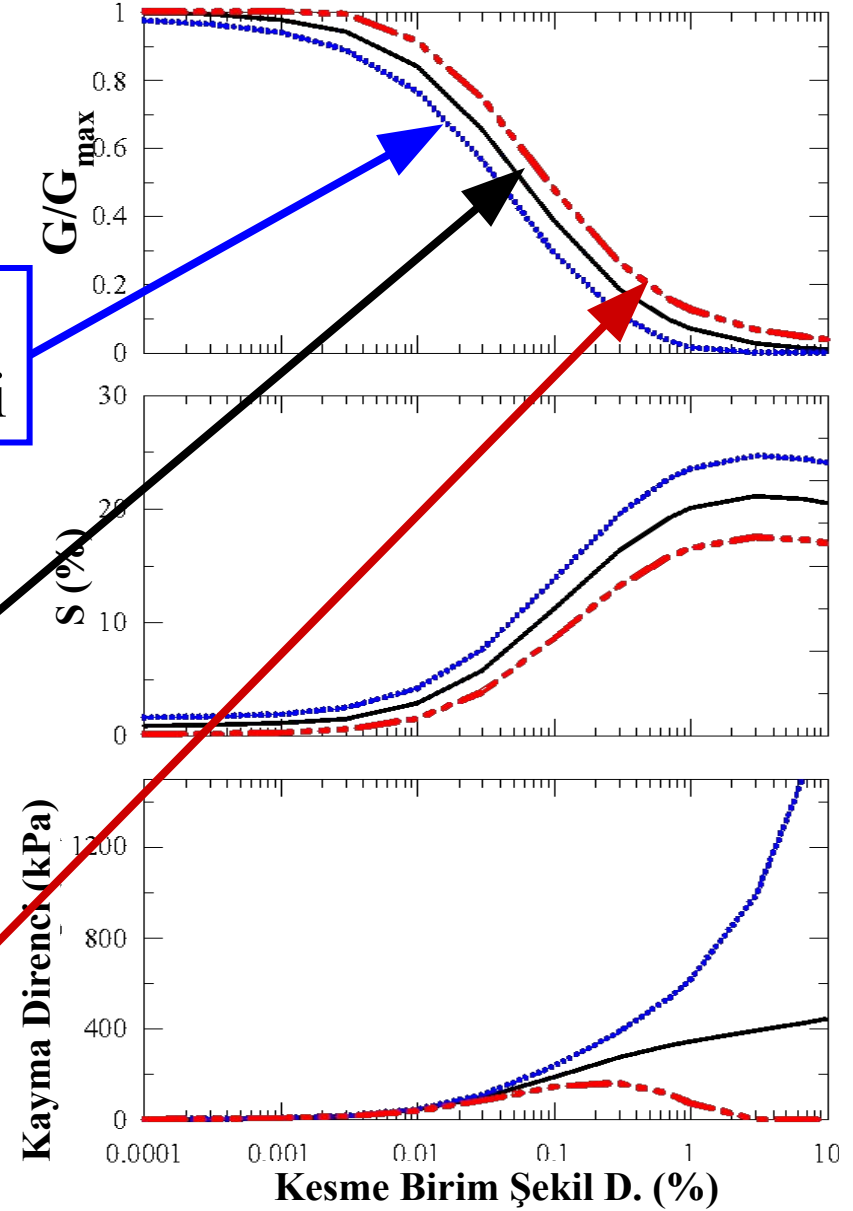
Kayma Modülü Azalım ve Sönüm (KMS) Eğrileri Randomizasyonu

- Darendeli (2001) varyans denklemi, jenerik KMS eğrilerinin elde edilmesi için kullanılmıştır.
- KMS randomizasyonu, aslen STRATA (2008) tarafından geliştirilmiştir.

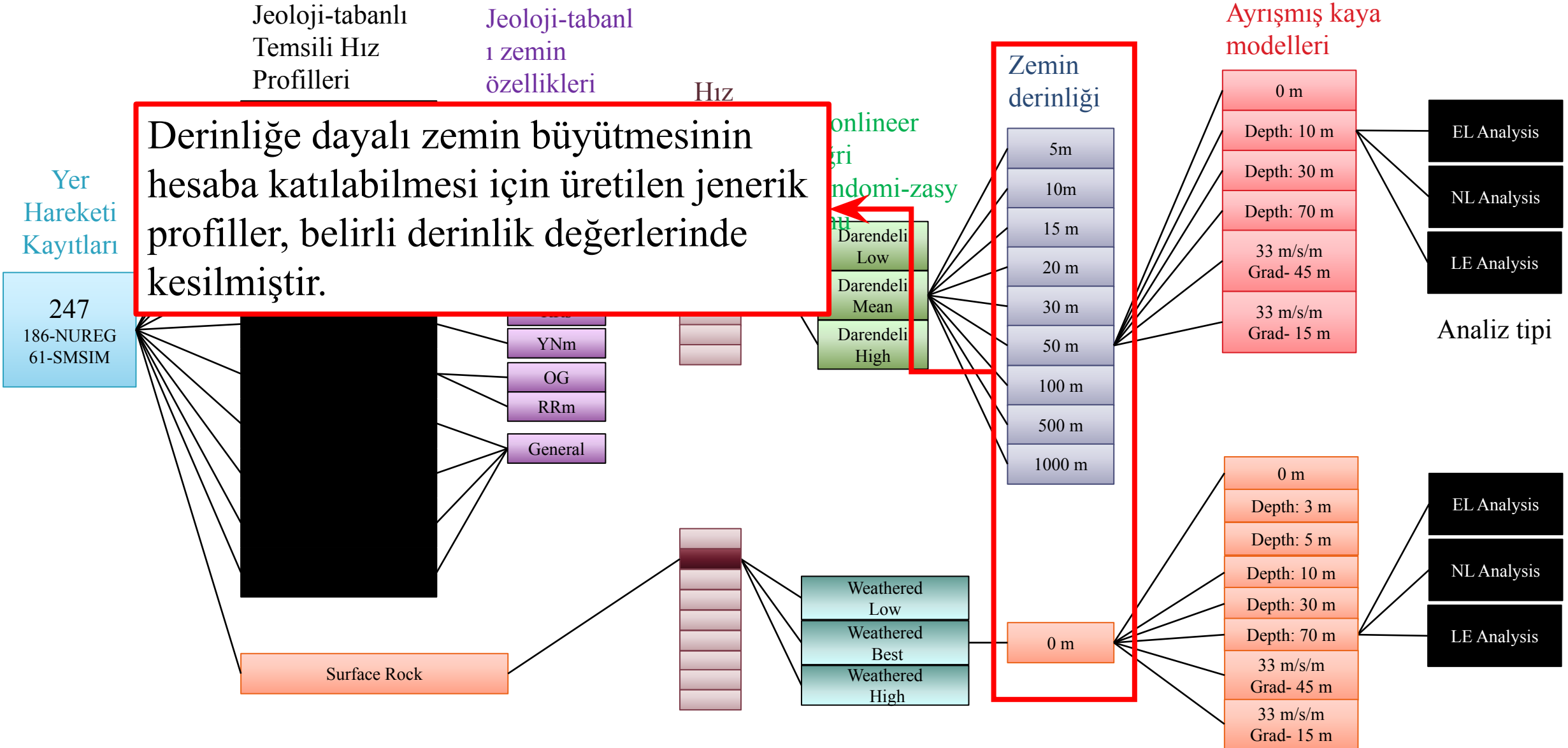
Sistemik olarak
alçak G/G_{max} eğrisi

Ortalama G/G_{max}
eğrisi

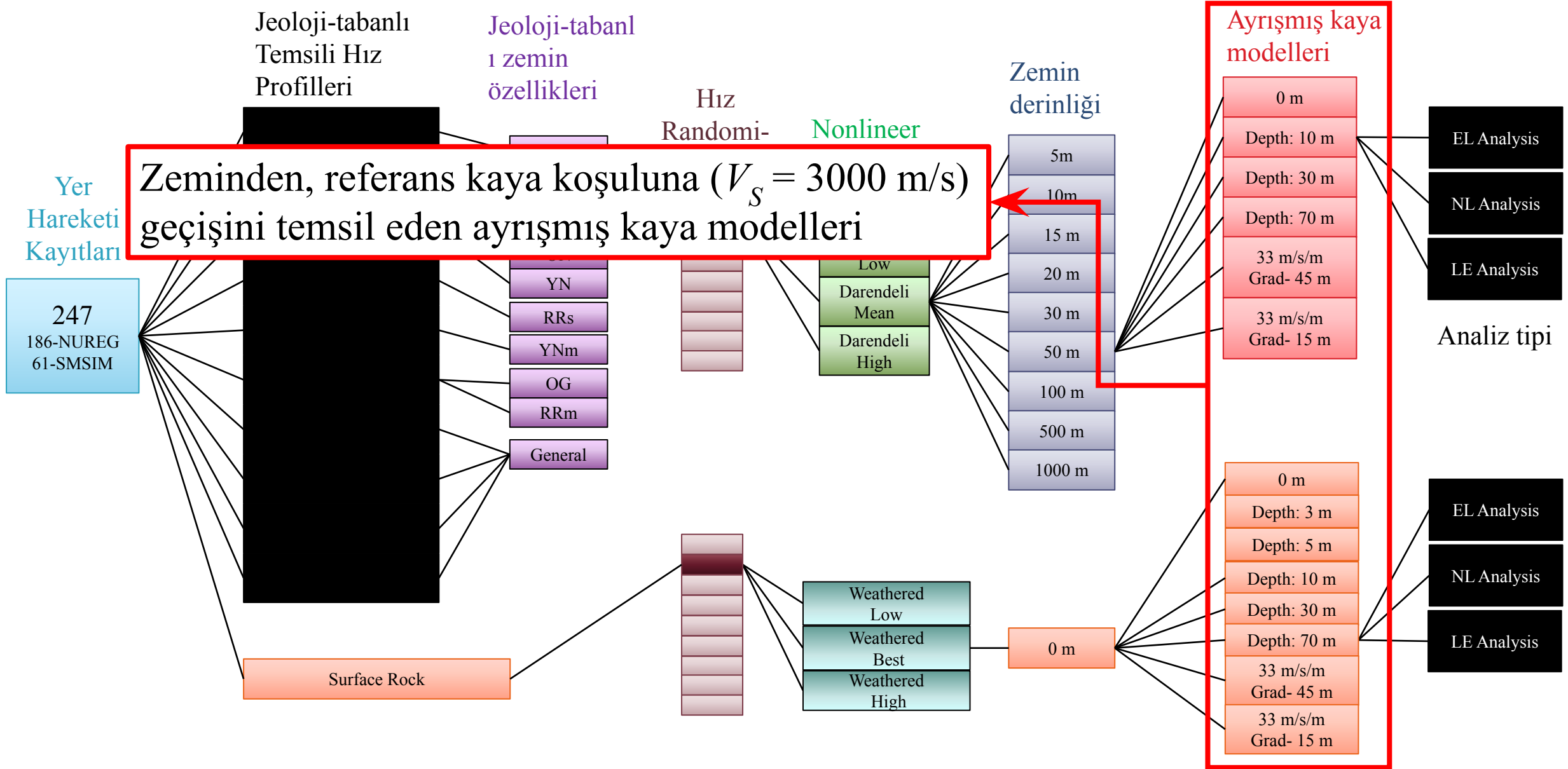
Sistemik olarak
yüksek G/G_{max}
eğrisi



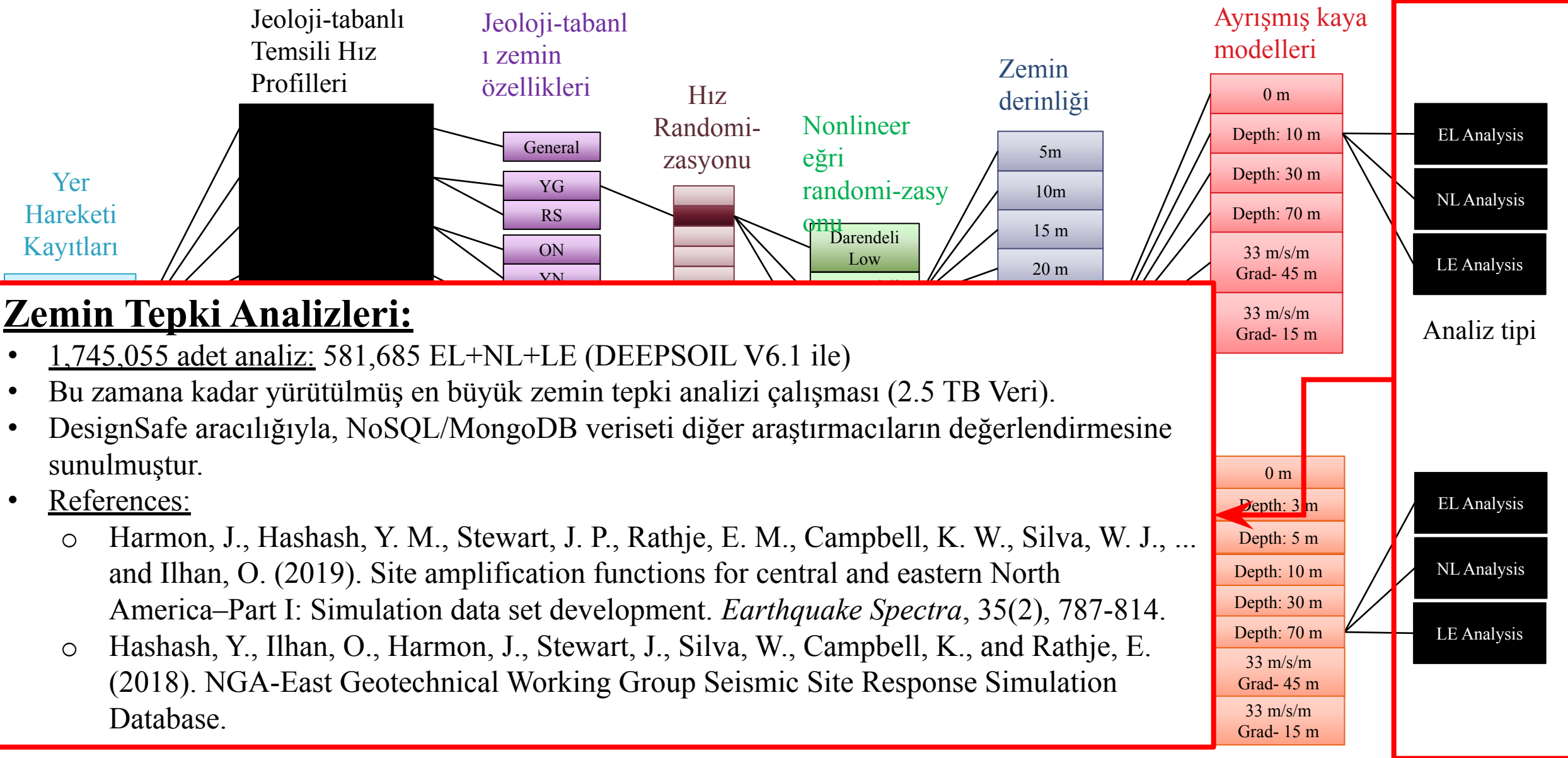
OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



OKDA Simülasyonları için Parametrik Çalışma Ağacı



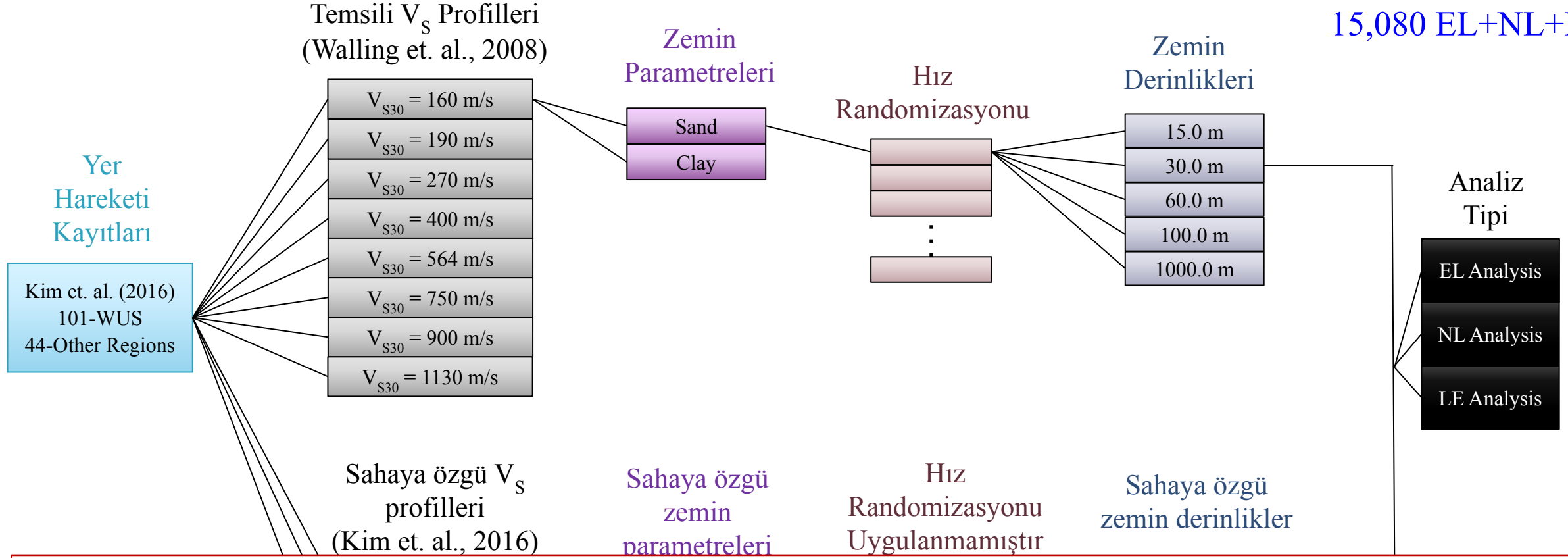
Zemin Tepki Analizleri:

- 1,745,055 adet analiz: 581,685 EL+NL+LE (DEEPSOIL V6.1 ile)
- Bu zamana kadar yürütülmüş en büyük zemin tepki analizi çalışması (2.5 TB Veri).
- DesignSafe aracılığıyla, NoSQL/MongoDB veriseti diğer araştırmacıların değerlendirmesine sunulmuştur.
- References:
 - Harmon, J., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., ... and Ilhan, O. (2019). Site amplification functions for central and eastern North America–Part I: Simulation data set development. *Earthquake Spectra*, 35(2), 787-814.
 - Hashash, Y., Ilhan, O., Harmon, J., Stewart, J., Silva, W., Campbell, K., and Rathje, E. (2018). NGA-East Geotechnical Working Group Seismic Site Response Simulation Database.

Geliştirilen Yöntemin Batı Amerika Zemin Koşullarına Uygulanması

45,240 adet analiz

15,080 EL+NL+LE



Referans: Hashash, Y. Ilhan, O. Harmon, J. (2019) "Fourier Amplitude Spectrum Site Amplification Modelling in Western United States", in Hashash et al. (2018) Western United States Site Response Simulation Database. *DesignSafe-CI*. <https://doi.org/10.17603/ds2-yxjv-5a15>.

Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA) Sim¼lasyon Tabanlı Zemin Büy¼tme Modelleri

Tepki Spektrumu Büyütme Modelleri

$$\ln(büyütme) = \underbrace{f(V_{s30}) + f(Z_{soil}) + f(T_{Nat})}_{\text{Lineer (Doğrusal) Büyütme}} + \underbrace{f(NL)}_{\text{Nonlinear (Doğrusal Olmayan) Büyütme}}$$

Lineer (Doğrusal) Büyütme

Nonlinear (Doğrusal Olmayan)
Büyütme

- Lineer Büyütme:

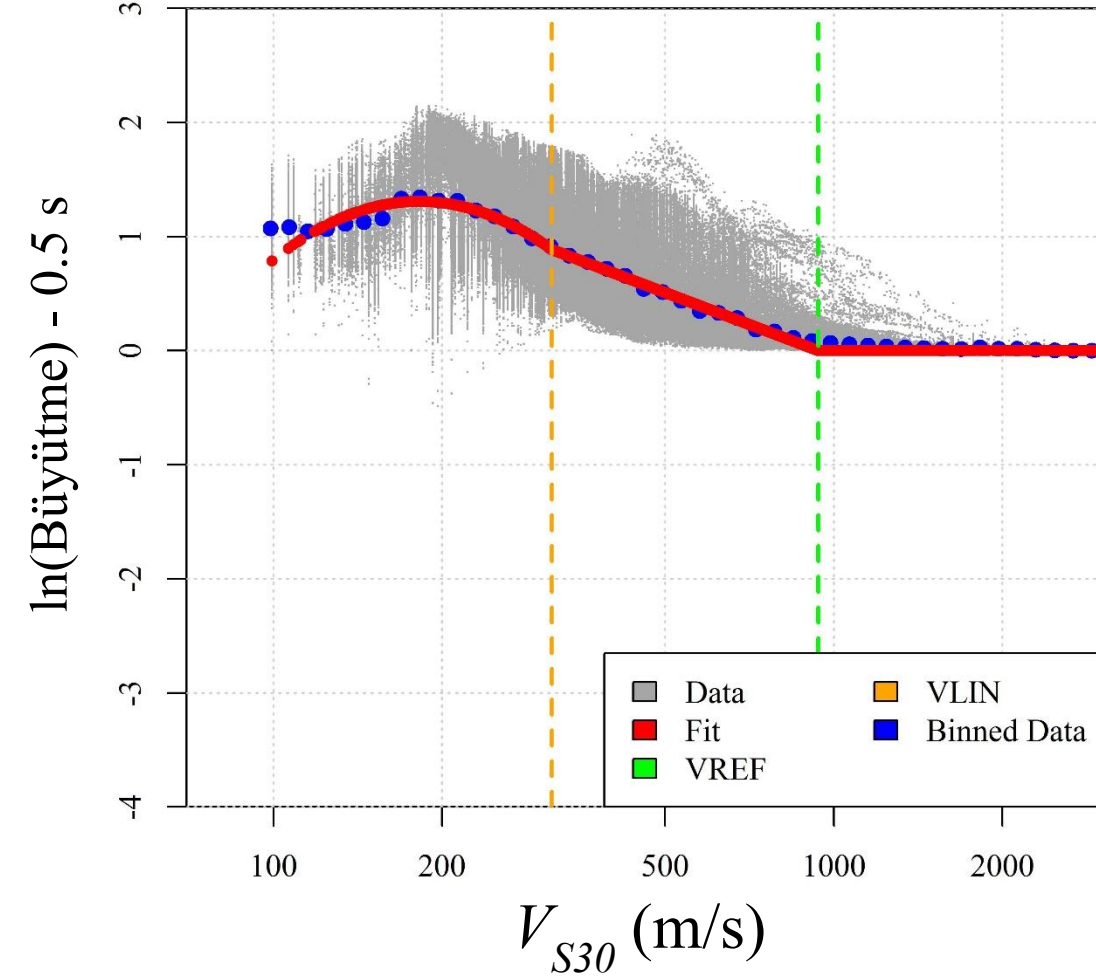
- 1D lineer elastik zemin tepki analizleri kullanılmıştır.
- Parametreler: V_{s30} , Taban kayasına ya da ayrıışmış kaya horizonuna olan derinlik (Z_{Soil}), Saha profili doğal periyodu (T_{nat})
- Zemin büyütmesinde önemli saha doğal periyodu etkileri

- Nonlinear Büyütme:

- Nonlinear ve lineer analizler arasındaki fark kullanılmıştır.
- Parameterler: V_{s30} , Taban kayasındaki Pik yer ivmesi (PYİ) ve spektral ivme

- Zemin büyütme modelleri orijinal olaral **OKDA** (Harmon et al., 2019) için oluşturulmuştur ve **BA** (Hashash et al., 2019) için de uygulanmıştır.

Lineer Tepki Spectrumu (TS) Modelleri: V_{S30} -Tabanlı L1



$$f(V_{S30}) = \begin{cases} \text{Data} & V_{S30} < V_{S30} \\ \text{Data} & V_{S30} < V_{S30} < V_{S30} \\ \text{Data} & V_{S30} < V_{S30} \end{cases}$$

$$f(V_{S30}) = c_1 \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{S30}} \right) + c_2 \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{S30}} \right) + c_3 \log \left(\frac{V_{S30}}{V_{S30}} \right)^2$$

- Güncel pratikte en çok benimsenen saha parametresidir.
- V_{S30} Tanımı: Zemin yüzeyinin ilk 30 m' sinde ortalama kayma dalgası hızı değeridir.

$$V_{s30} = \frac{30m}{\sum_i \Delta t_i}$$

$$\Delta t_i = \frac{\Delta z_i}{(V_s)_i}$$

Lineer TS Modelleri: V_{S30} ve T_{nat} -Tabanlı L5

V_{S30} Modelinin
Rezidüelleri

İlk mod büyütmesinin
oluştugu değer:

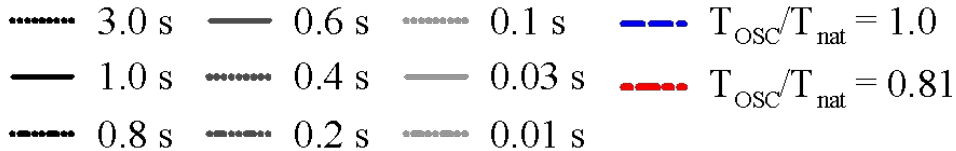
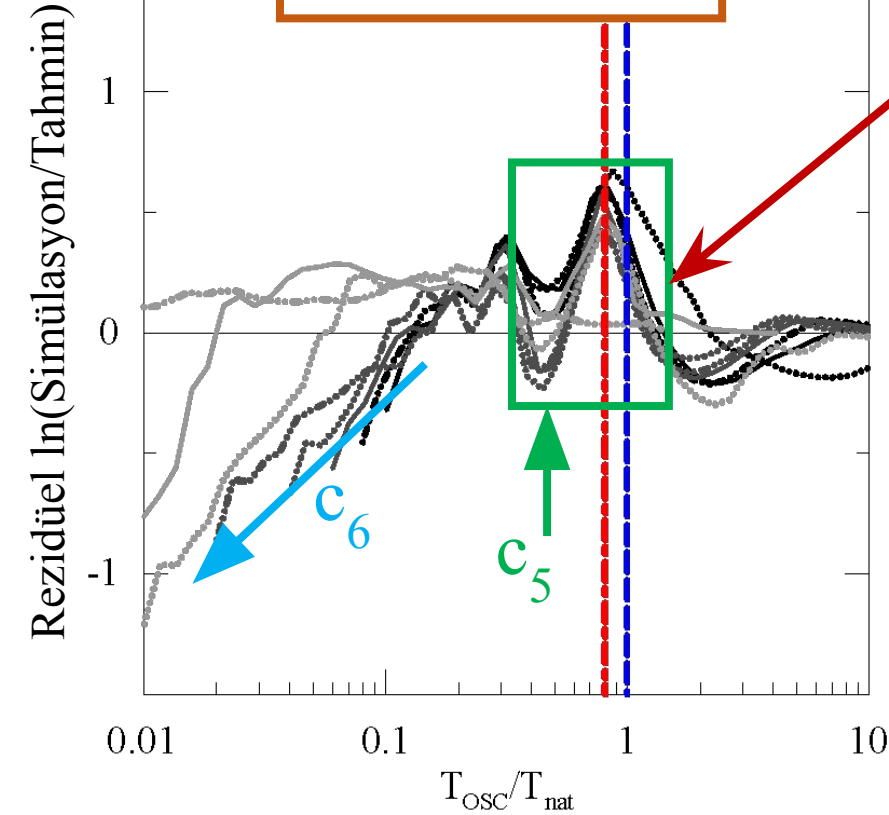
$$\frac{\text{Salınım Periyodu}}{\text{Doğal Periyot}} = 0.81$$

$$\text{Rezidüel} = \ln \left(\frac{\text{Simülasyon}}{\text{Model Tahmini}} \right)$$

Büyütme Modeli

$$\ln(\text{amp}) = f(V_{S30}) + c_5 R + c_6 \text{NatPeriod}$$

Ricker Dalgacık
(Wavelet)

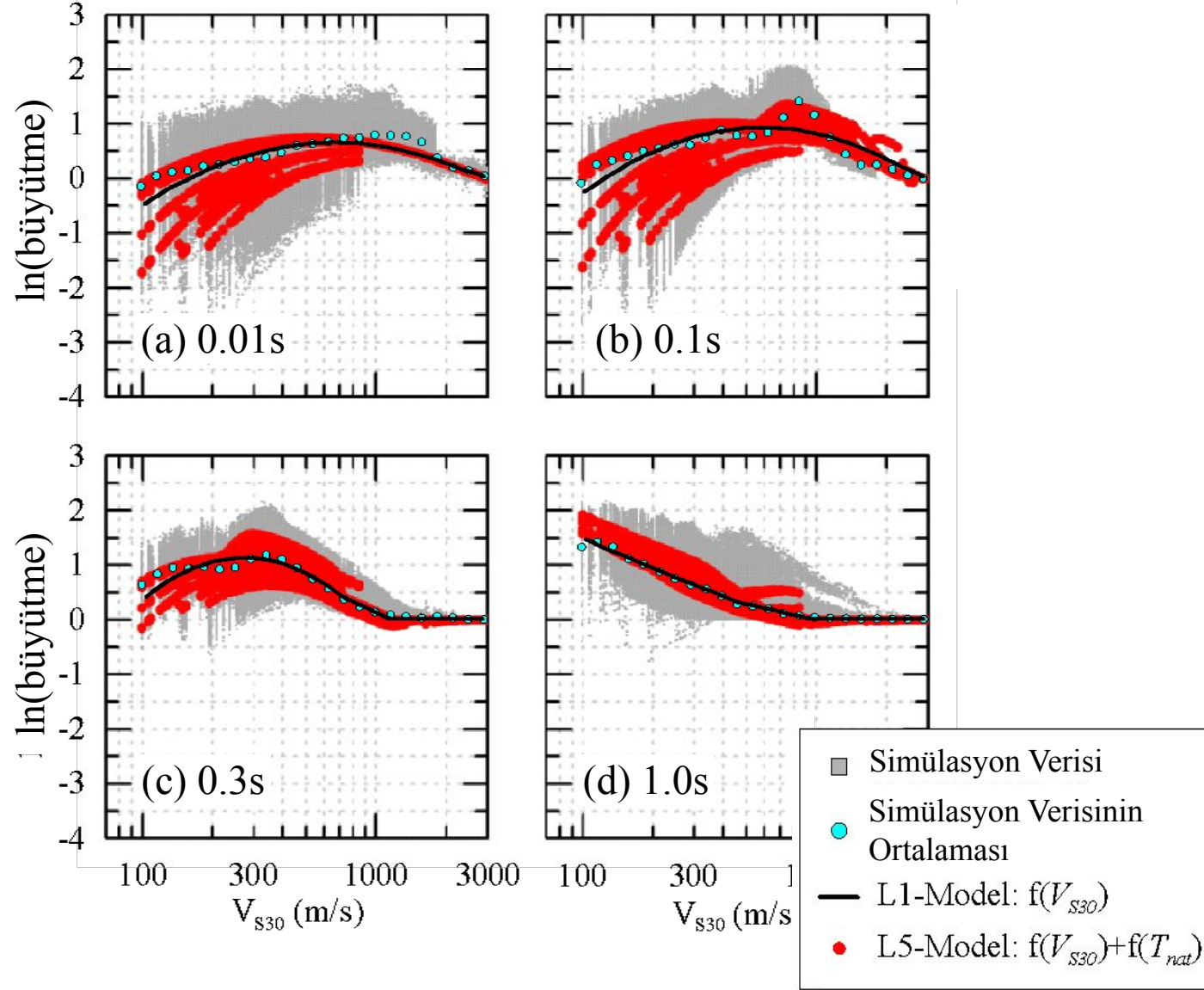


T_{osc} = Tek serbestlik derecesi salınım periyodu
 T_{nat} = Saha doğal periyodu

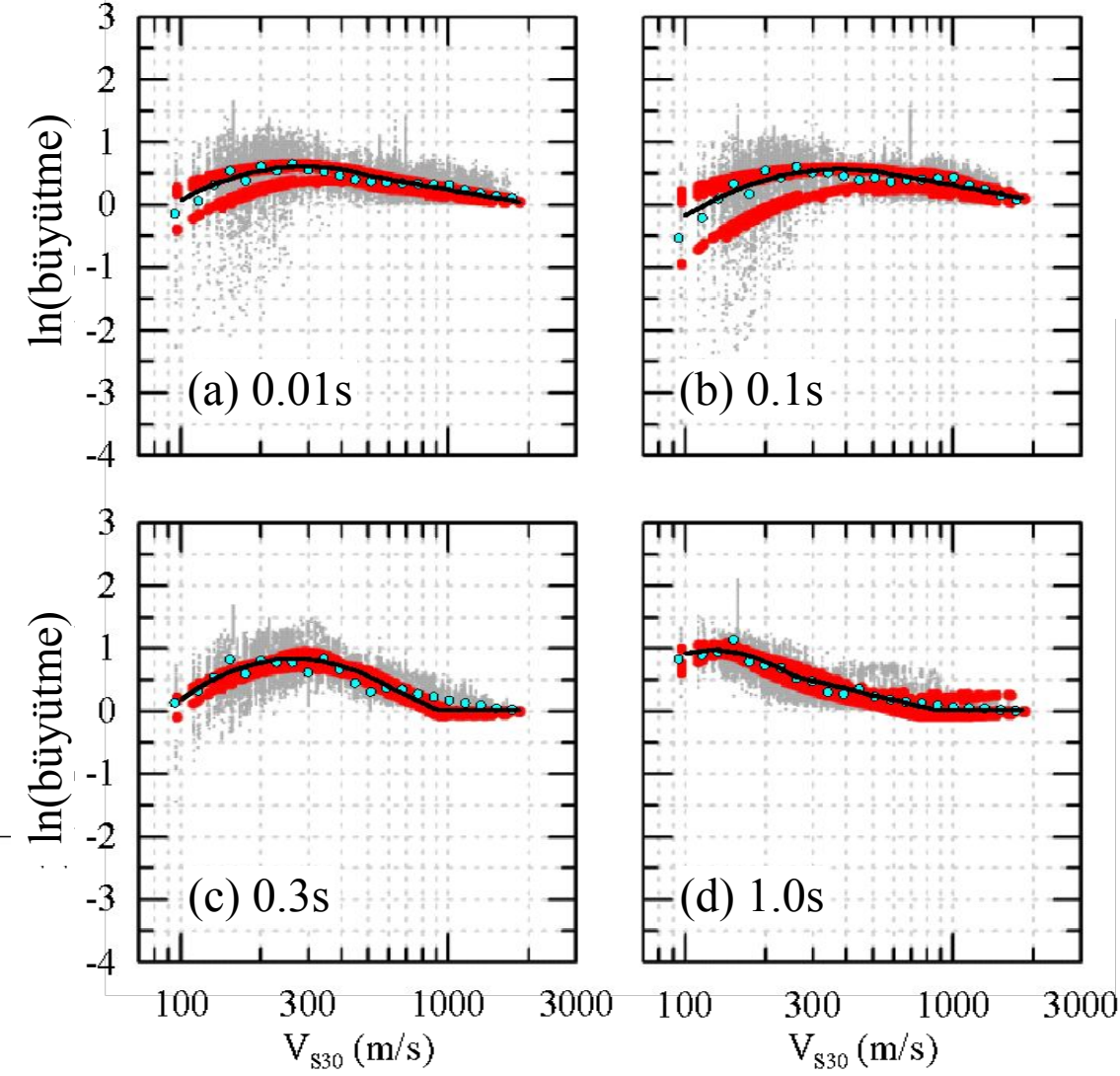
$$T_{nat} = \sum_{i=1}^n \frac{4 \cdot H_i}{V_{S,i}}$$

Lineer TS Büyütme Modelleri: V_{S30} (L1) & T_{nat} (L5)-based

Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA)



Batı Amerika (BA)

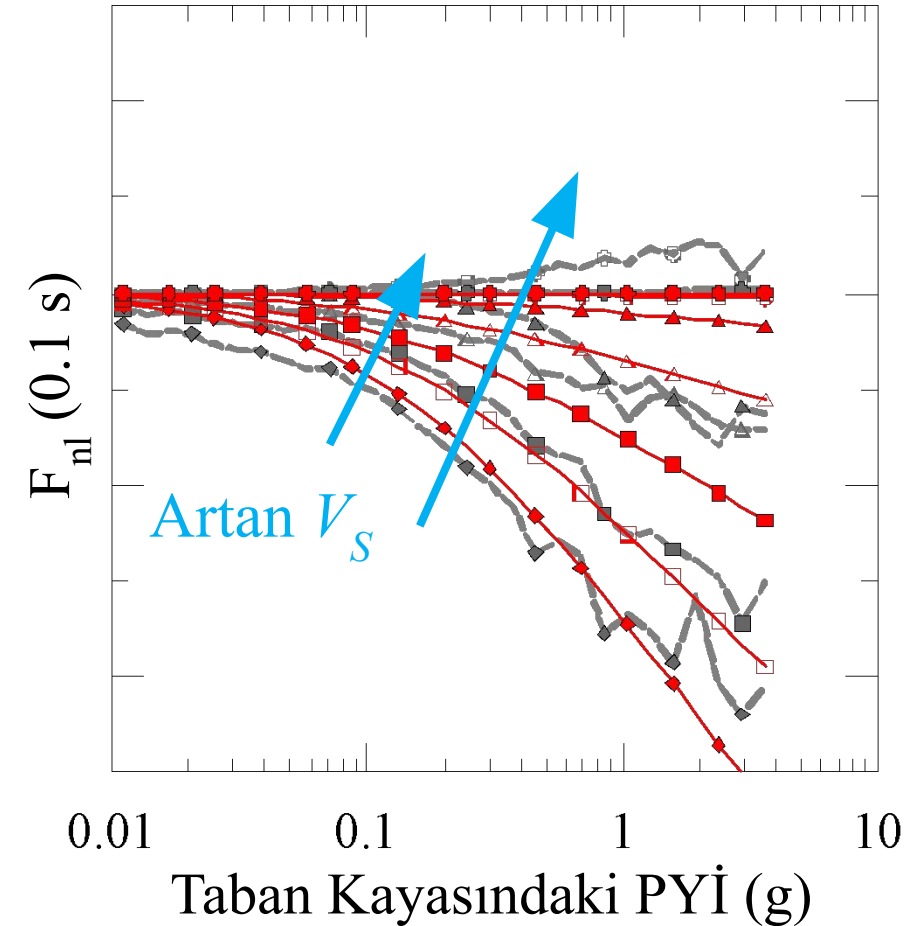


Nonlinear TS Büyütme Modelleri (Orijinal olarak **OKDA** için)

$$F_{nl} = \begin{cases} V_{S30} < V_c & f_2 \ln \left(\frac{PGA_r + f_3}{f_3} \right) \\ V_{S30} \geq V_c & 0 \end{cases}$$

$$f_2 = f_4 \left[\exp\{f_5(\min(V_{S30}, V_{ref}) - 360)\} - \exp\{f_5(V_{ref} - 360)\} \right]$$

- Model formu, Chiou and Youngs (2008) ve Seyhan and Stewart (2014) tarafından geliştirilmiştir.
- Referans Koşulu (V_{ref}):
 - OKDA:** 3000 m/s
 - BA:** 760 m/s

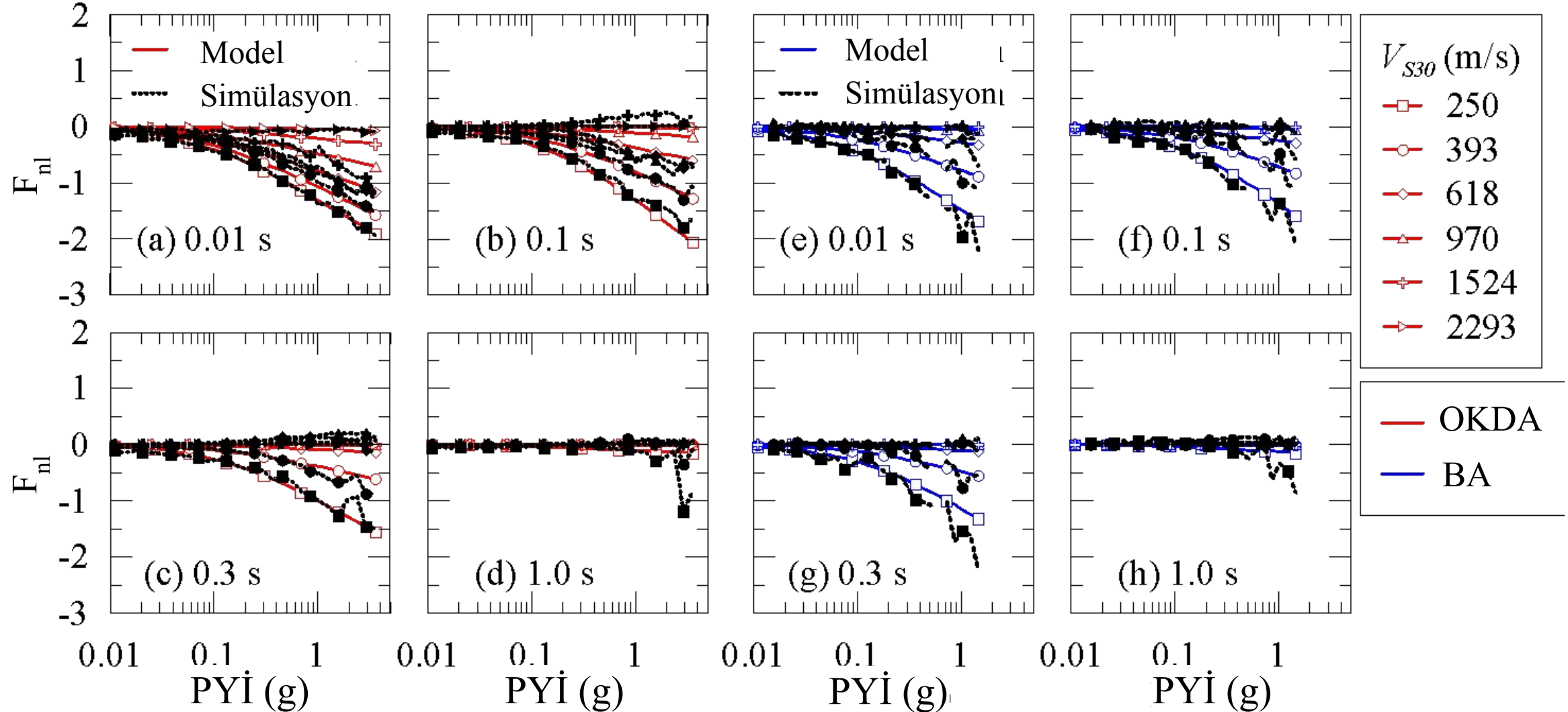


--- Simülasyon Verisi Ortalaması
— N Büyütme Modeli

Nonlinear TS Büyütme Modelleri (*OKDA* ve *BA* için)

Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA)

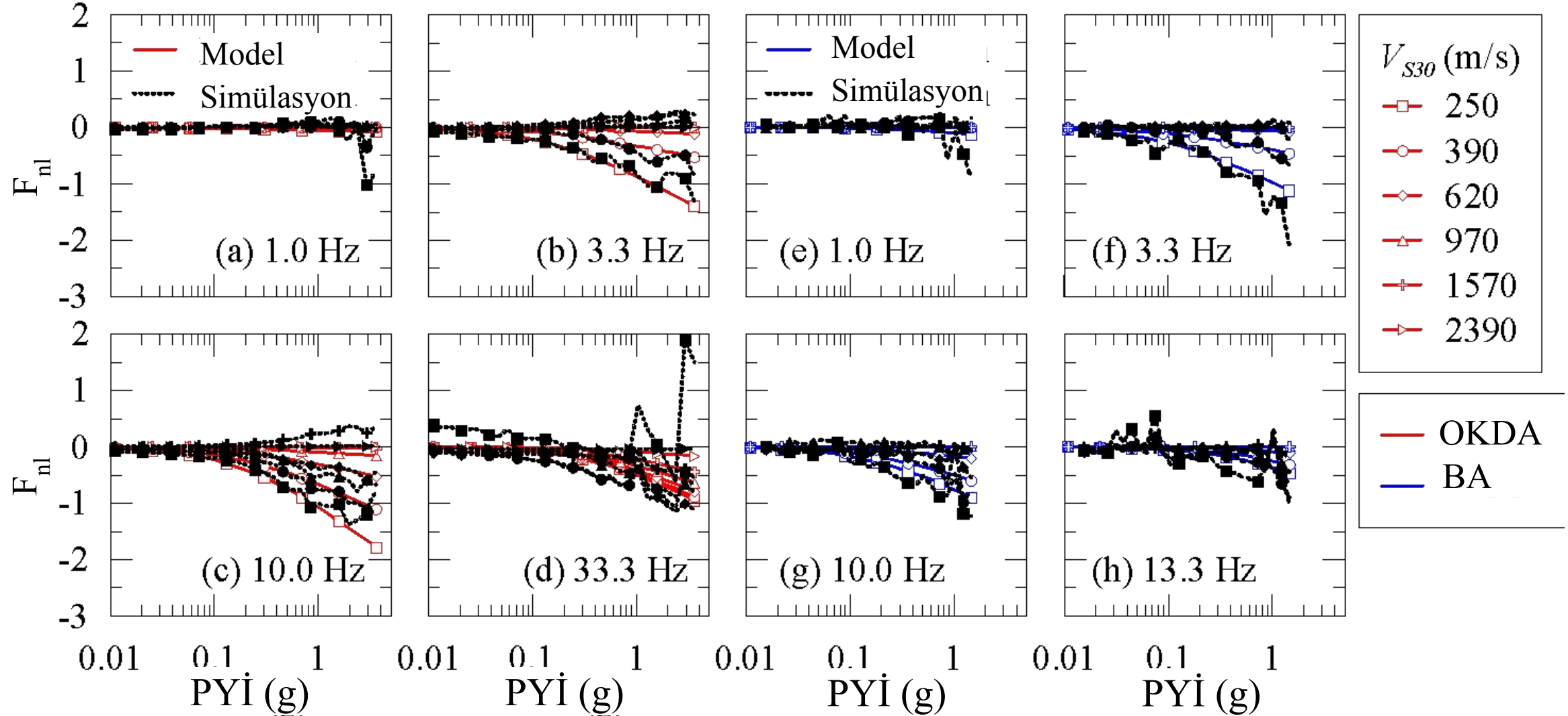
Batı Amerika (BA)



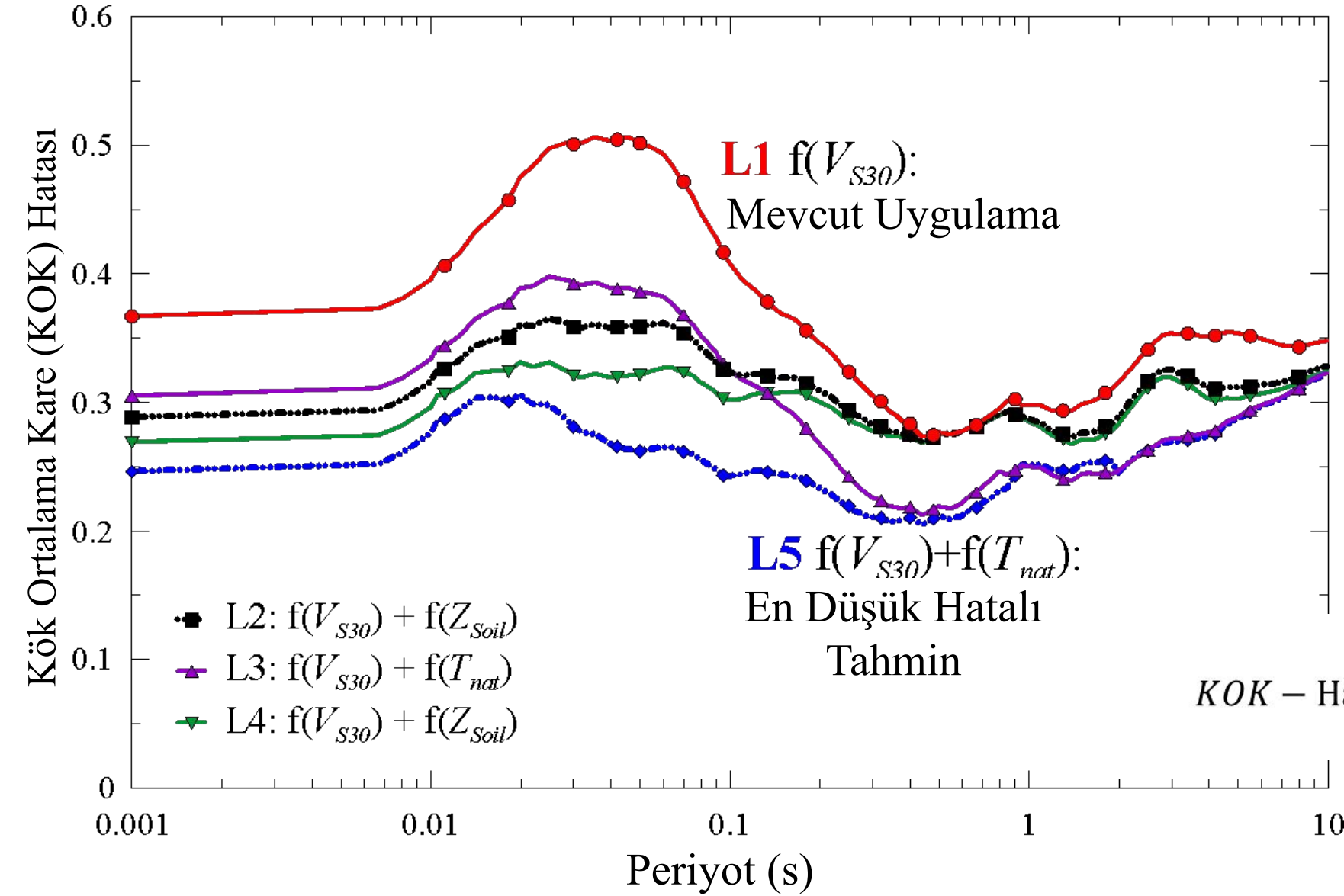
Nonlinear Fourier Genlik Spektrumu Büyütme M. (*OKDA* & *BA*)

Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA)

Batı Amerika (BA)



Simülasyon Tabanlı Modeller için KOK Hatası Değerlendirmesi (*OKDA*)



OKDA'daki zemin büyütmesinin tahmini için saha doğal periyodu önemli bir rol oynamaktadır.

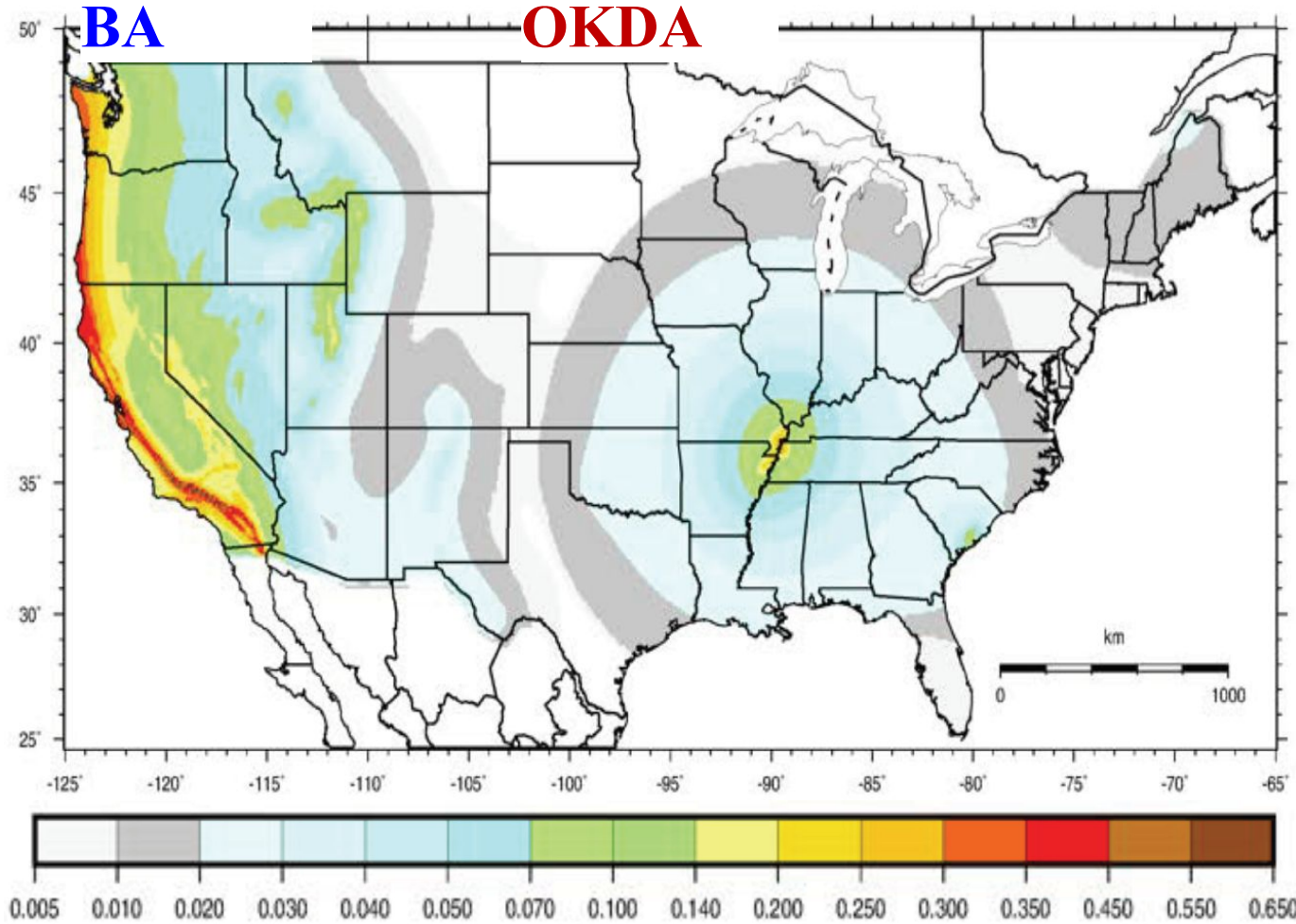
$$KOK - Hatası = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (Büyütme - Model)^2}{Simülasyon Adedi}}$$

Zemin Büyütme Modellerinin 2018 USTH' de Kullanılması

2018 Ulusal Sismik Tehlike Haritası (USTH)

Petersen et al. (2020)

$$F_S = F_{lin} + F_{nl}$$



- F_S : referans taban kayasına ($V_S = 3000$ m/s) göre toplam zemin büyütmesi.
- F_{lin} : Stewart et al. (2020) yarı-ampirik lineer model
- F_{nl} : Hashash et al. (2020) tarafından Harmon et al. (2019) türetilmiş simülasyon tabanlı nonlineer zemin büyütmesi modeli

Sonuçlar - Öncül Parametrik Çalışma

- ***Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA)***, deprem verisinin seyrek olması sebebiyle bölgeye özel zemin büyütme fonksiyonlarından yoksundur.
- Bu sebeple, çok sayıda 1D doğrusal (L), eşdeğer-doğrusal (EL) ve doğrusal olmayan (NL) zemin tepki analizine (ZTA) imkan tanıyan parametrik çalışma metodu geliştirilmiş ve küçük-ölçekli bir benzeri ***Batı Amerika (BA)*** için uygulanmıştır.
- Modüler ve simülasyon-tabanlı Tepki Spektrumu ve Fourier Genlik Spektrumu zemin büyütme modelleri:
 - 1D ZTA' lar, ampirik modelleri desteklemek için kullanılabilir.
 - 2018 Amerika Ulusal Sismik Tehlike Haritaları' nda OKDA için kullanılabilecek doğrusal olmayan zemin büyütmesi modeli üretilmiştir.
 - **Önemli zemin parametresi:** Saha doğal periyodu

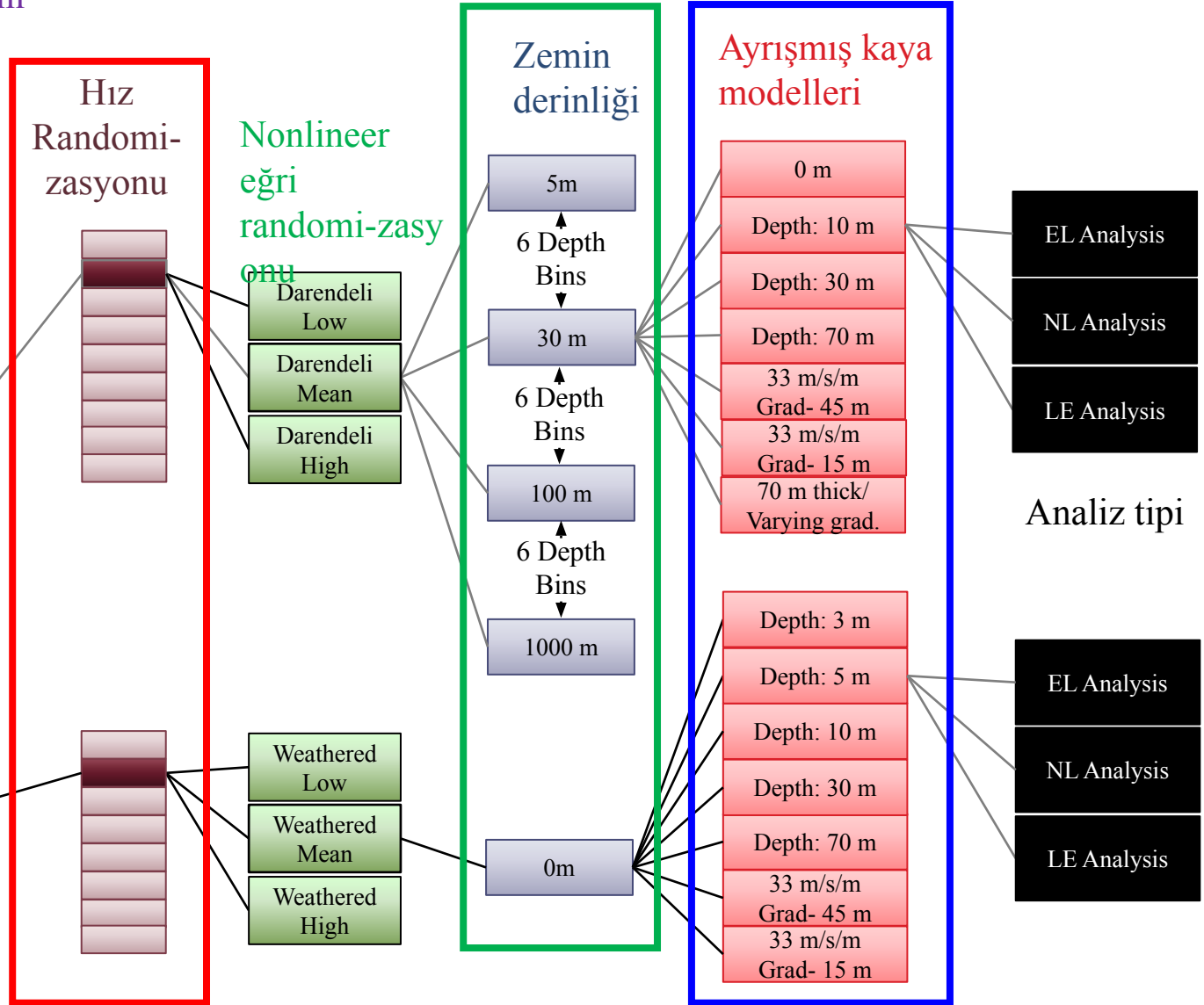
- Başlık: Orta ve Kuzey Doğu Amerika (OKDA) için Konvansiyonel ve Derin Öğrenme Tabanlı Zemin Büyütme Modelleri
- Parametrik çalışma tasarımı yardımıyla yürütülen tek boyutu (1D) zemin tepki analizleri güncellenmiştir.
- Konvansiyonel zemin büyütme modellerinin geliştirilmiş (daha düşük KOK-hatası üreten) versiyonları
- Yapay Sinir Ağları (YSA) yardımıyla derin öğrenme metoduna dayalı zemin büyütme modelleri
- Zemin Büyütme Modellerinde belirsizliği ve değişkenliği hesaba katabilmek için standart sapma modelleri

1D OKDA Simülasyonları için Güncellenmiş Parametrik Çalışma Tasarımı

Jeoloji-tabanlı
Temsili Hız
Profilleri

Jeoloji-tabanlı
1 zemin
özellikleri

- **Toro (1995) hız randomizasyonu** modeli latin hypercube örnekleme yöntemi kullanılarak güncellenmiştir.
- **Zemin derinlikleri**, tam sayı değerleri yerine üniform olasılıksal dağılıma bağlı değerler olarak hesaba katılmıştır.
- **Farklı ayrıışmış kaya modelleri** eklenmiştir.



Güncellenmiş 1D Simülasyonların YPB Yardımıyla Yürütülmesi

- Bir önceki parametrik çalışmaya (Harmon et al., 2019) Ilhan (2020) tarafından yapılan güncellemeler, **3,656,835 zemin tepki analizinin** (**1,218,945 NL, EL, L**) gerçekleştirilmesini gerektirmiştir.
- Tüm bu zemin tepki analizleri, TACC’ deki (Texas Advanced Computing Center) yüksek performanslı bilgisayarları (YPB) kullanarak DEEPSOIL V7.0 yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



DEEPSOIL V 7.0

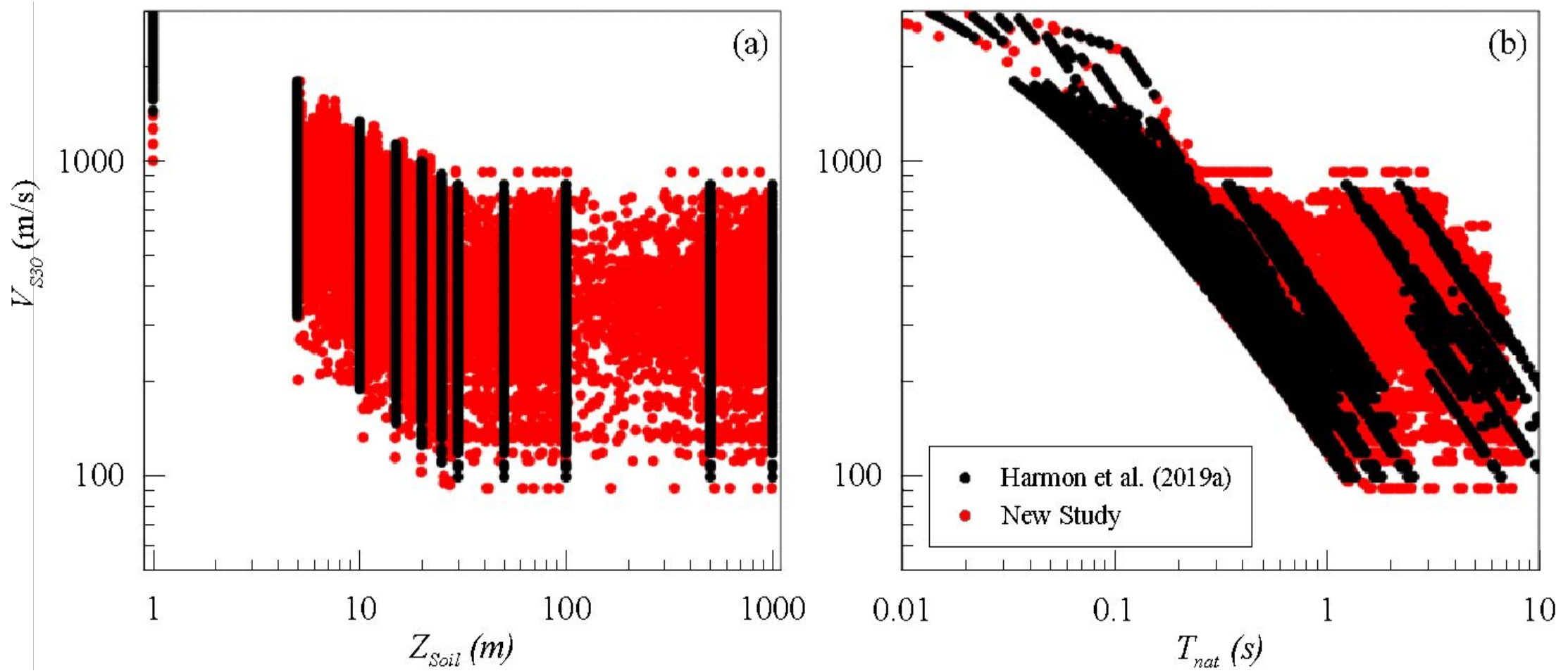
Çalışma

Çekirdek Sayısı

Çalışma Süresi (Wall Time)

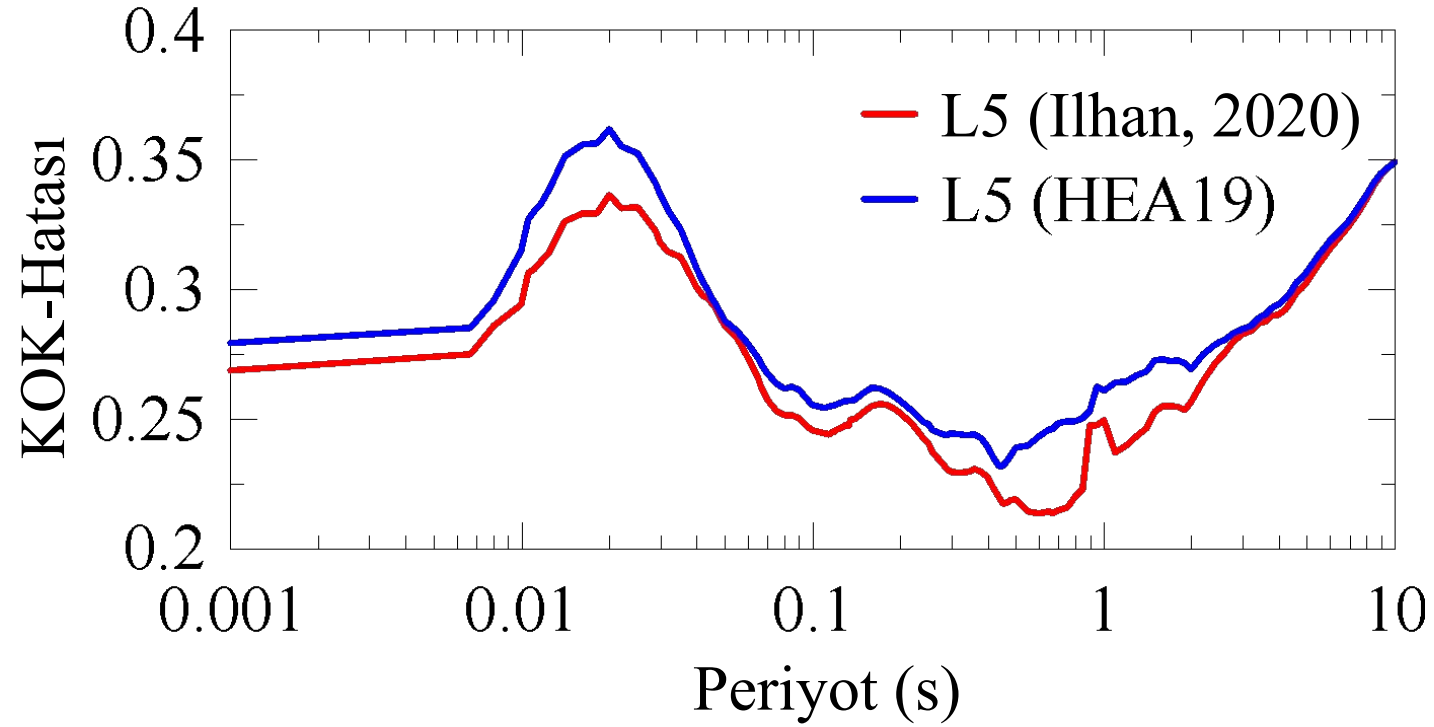
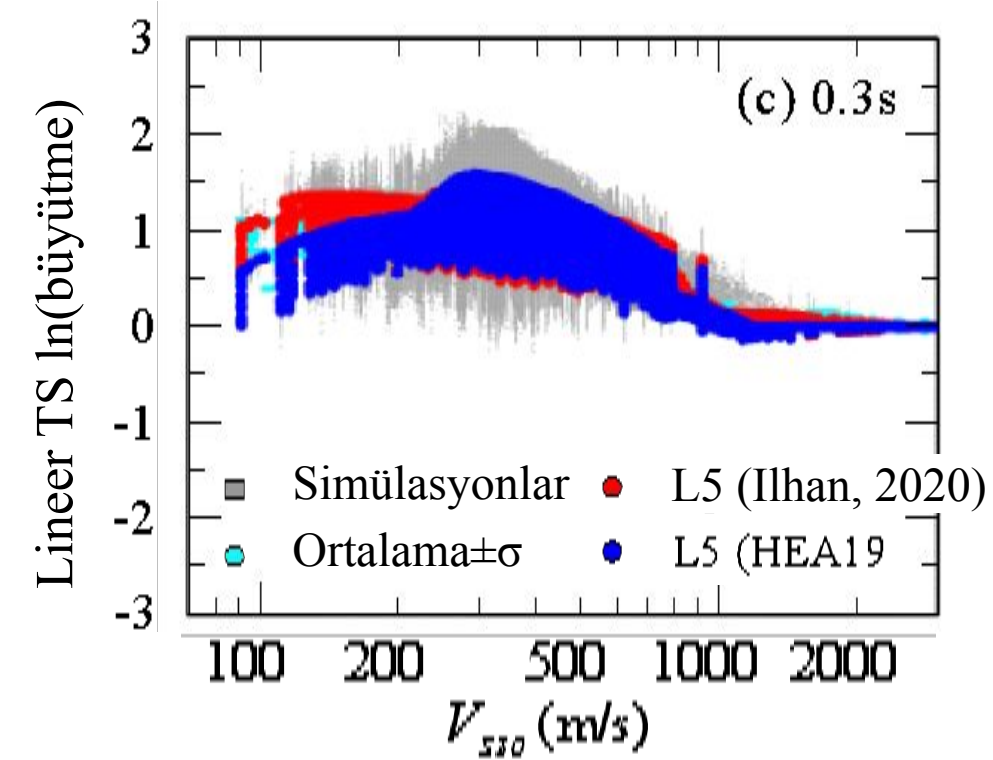
Ilhan (2020)	YPB’ den 2000 çekirdek ile	~ 8 gün
Harmon et al. (2019)	96 çekirdeğe sahip iş sunucuları ile	~ 18-22 gün

Güncellenmiş ve Genişletilmiş Jenerik Saha Profili Veritabanı



- Gösterilen: **Harmon et al. (2019a)** ve **Ilhan (2020)**' den elde edilen jenerik V_S profillerin, (i) V_{S30} ve zemin yüzeyinden taban kayasına olan derinlik (Z_{Soil}) ve (ii) V_{S30} ve doğal saha periyodu (T_{nat}) alanlarında karşılaştırılması.
- **Ilhan (2020)**, **Harmon et al. (2019a)**' a göre her iki alanı da daha iyi temsil etmektedir.

İyileştirilmiş Konvansiyonel Zemin Büyütme Modelleri: **L5**

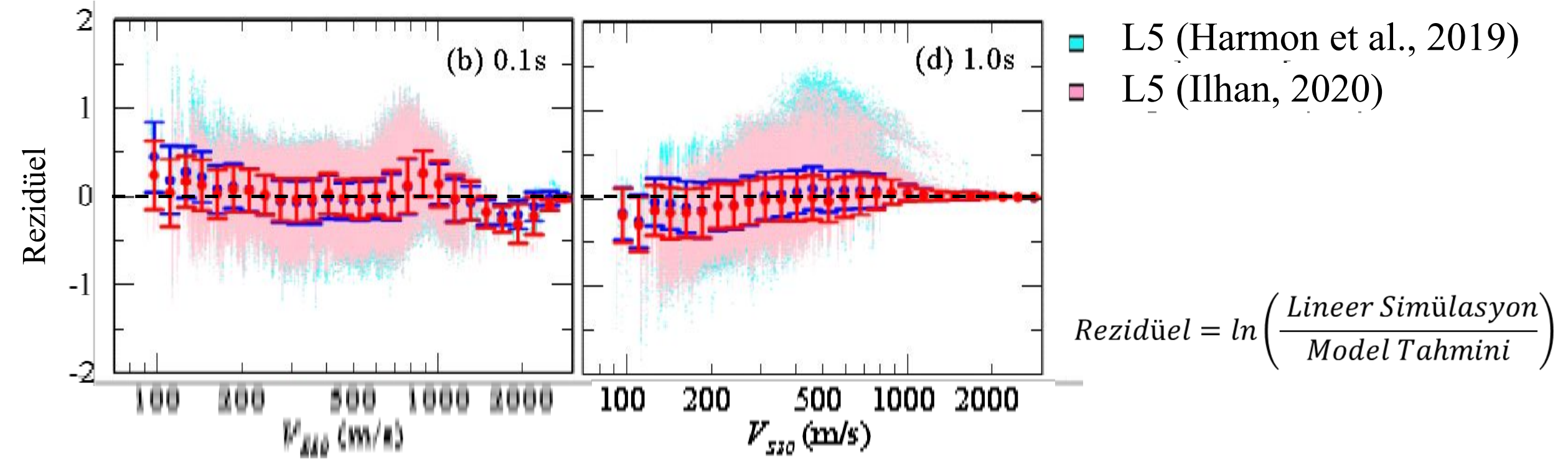


- **L5 (Ilhan, 2020)**, **L5 (Harmon et al., 2019)** modeline göre daha düşük KOK-hatası üretmektedir.
- Bu durum da **L5 (Ilhan, 2020)**, **L5 (HEA19)**' a göre daha güvenilir zemin büyütme tahmini sağlamaktadır.

Yapay Sinir Ağları (YSA)-Tabanlı Zemin Büyütme Modelleri-İçerik

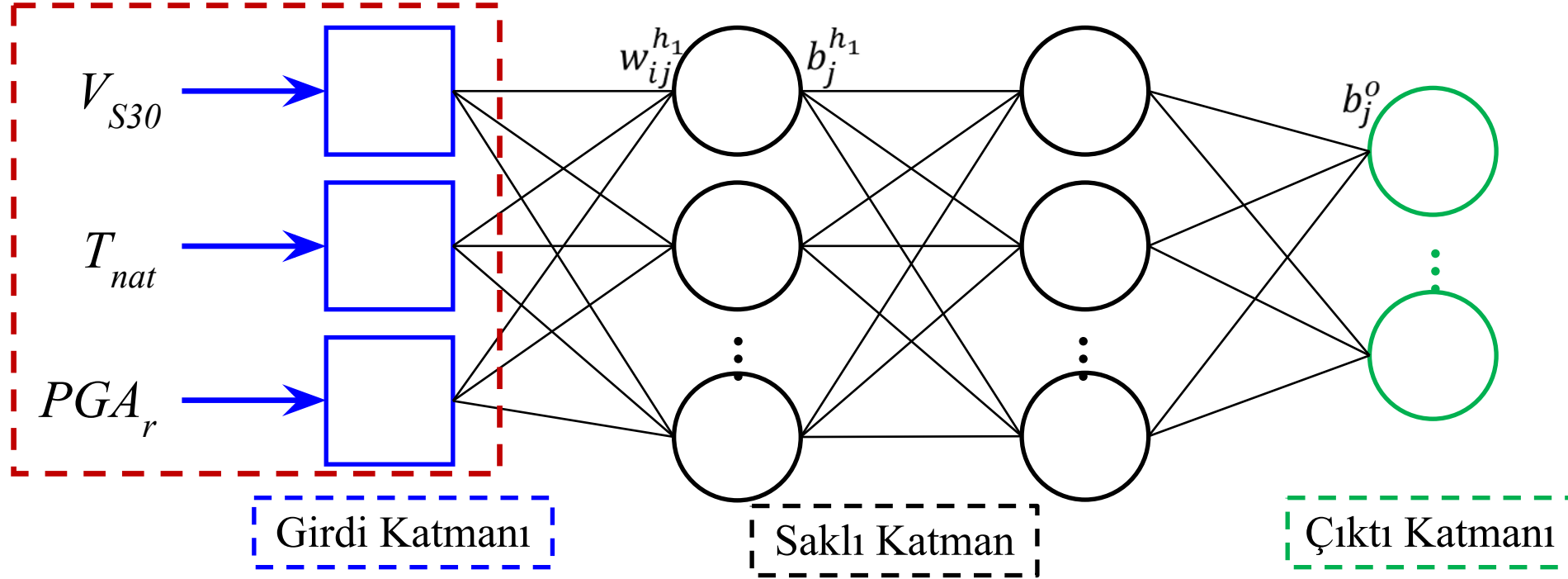
- Yapay Sinir Ağları (YSA) yönteminin zemin büyütmesi modellemesinde kullanılmasıındaki etkenler
- YSA-tabanlı zemin büyütme modelinin yapısı
- YSA-tabanlı modellerin performans değerlendirmesi:
 - YSA ve konvansiyonel zemin büyütme model tahminlerinin karşılaştırılması
 - Modellerin KOK-hata değerlendirmesi

Yapay Sinir Ağları (YSA)-Tabanlı Modeller: *Motivasyon*



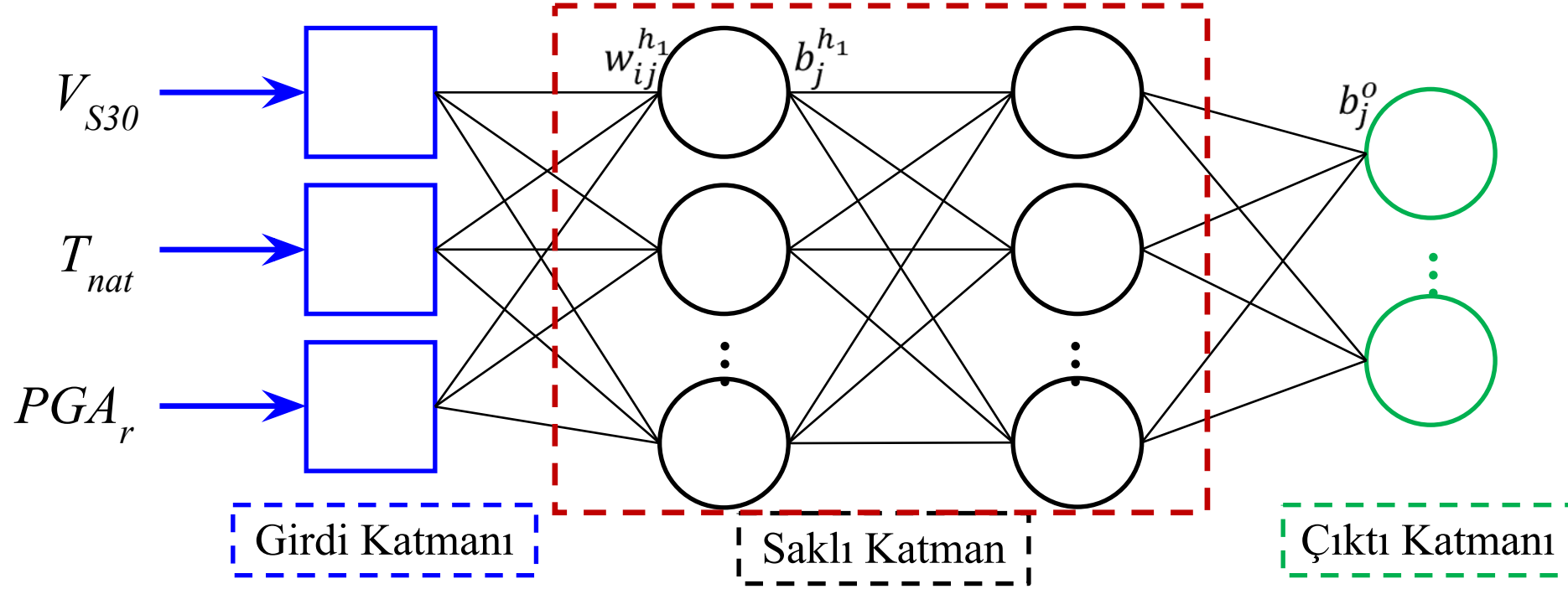
- **L5 (Ilhan, 2020)** model tahmini üzerindeki iyileştirmelerine rağmen, rezidüeller hata ciddi derecede saçılım içermektedir.
- Bu sebeple Ilhan (2020), zemin büyütmenin hassas bir şekilde modellenebilmesi için veriyi bir fonksiyon formuna uymaya zorlayan konvansiyonel yöntem yerine, direk veriden öğrenen YSA metodunu benimsemiştir.

Yapay Sinir Ağları (YSA)-Tabanlı Modeller: *Model Yapısı*



- YSA' lar, her biri farklı ağırlık ($w_{ij}^{h_1}$) ve bias ($b_j^{h_1}$) içeren birbirine bağlı düğüm noktalarından oluşur.
- Bu düğümlerde yapılan hesaplamalar ile her bir ağırlık ve bias iteratif olarak güncellenerek model tahmini, girdi olarak sağlanan zemin büyütme verisine yakınsatılmaya ve model tahmini hatası düşürülmeye çalışılır.
- **Girdi katmanına, herhangi bir fonksiyon formu dikkate alınmaksızın** ilgili olduğu düşünülen her girdi parametresi (V_{S30} , T_{nat} , etc.) sağlanabilir.
- Aynı model yapısı, hem TS hem de Fourier GS için kullanılmıştır.
- Tüm simülasyon verisinin %90' ı model eğitimi, geri kalan %10' u ise YSA' nın tahmin yeteneğini test etmek için kullanılmıştır.

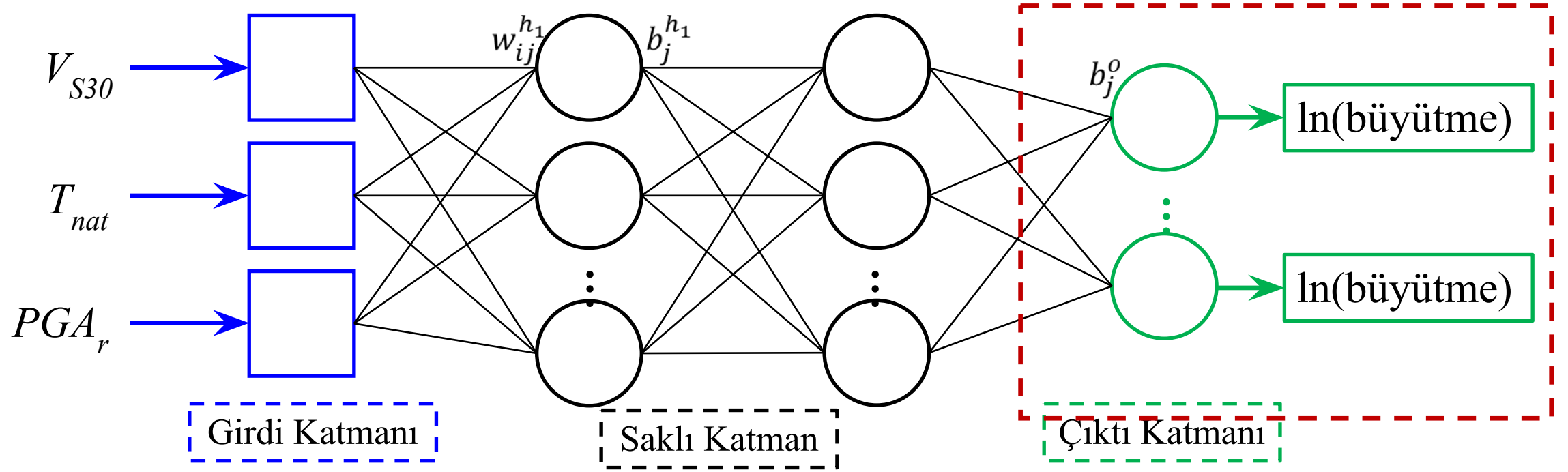
Yapay Sinir Ağları (YSA)-Tabanlı Modeller: *Model Yapısı*



- Her birinde 200 düğüm olan ve YSA hesaplamalarının yapıldığı 2 saklı katman seçilmiştir.
- YSA hesaplamaları, Python ortamında Google Brain Team tarafından geliştirilen TensorFlow yardımıyla yapılmıştır.



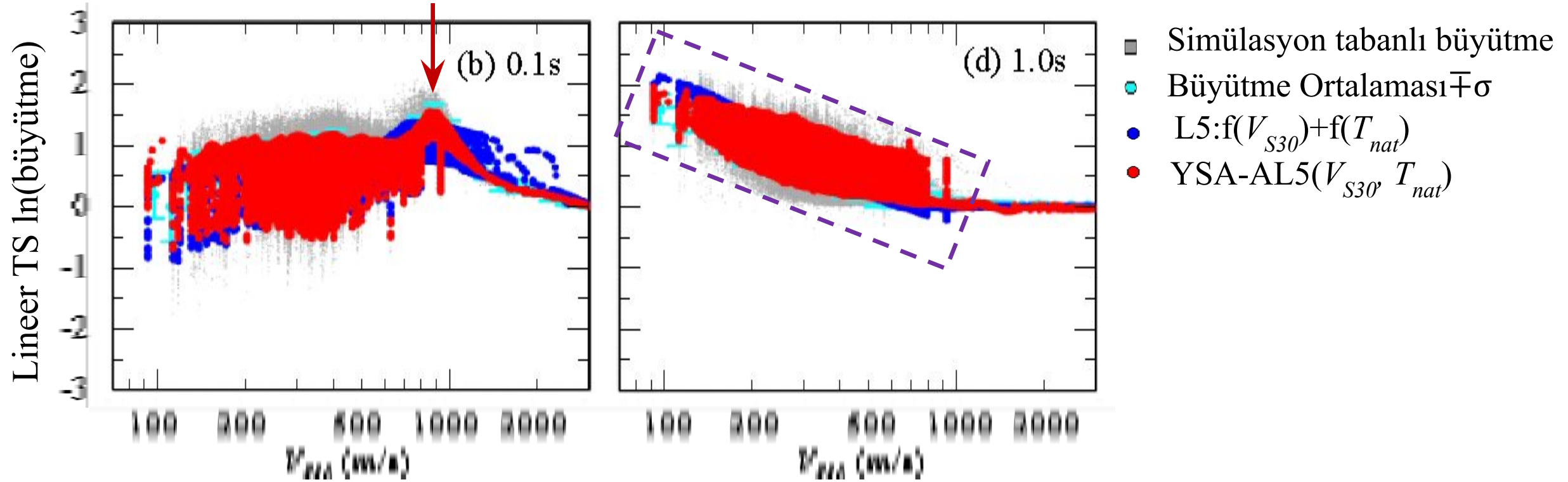
Yapay Sinir Ağları (YSA)-Tabanlı Modeller: *Model Yapısı*



YSA-tabanlı zemin büyütmeye modellerinin çıktısı:

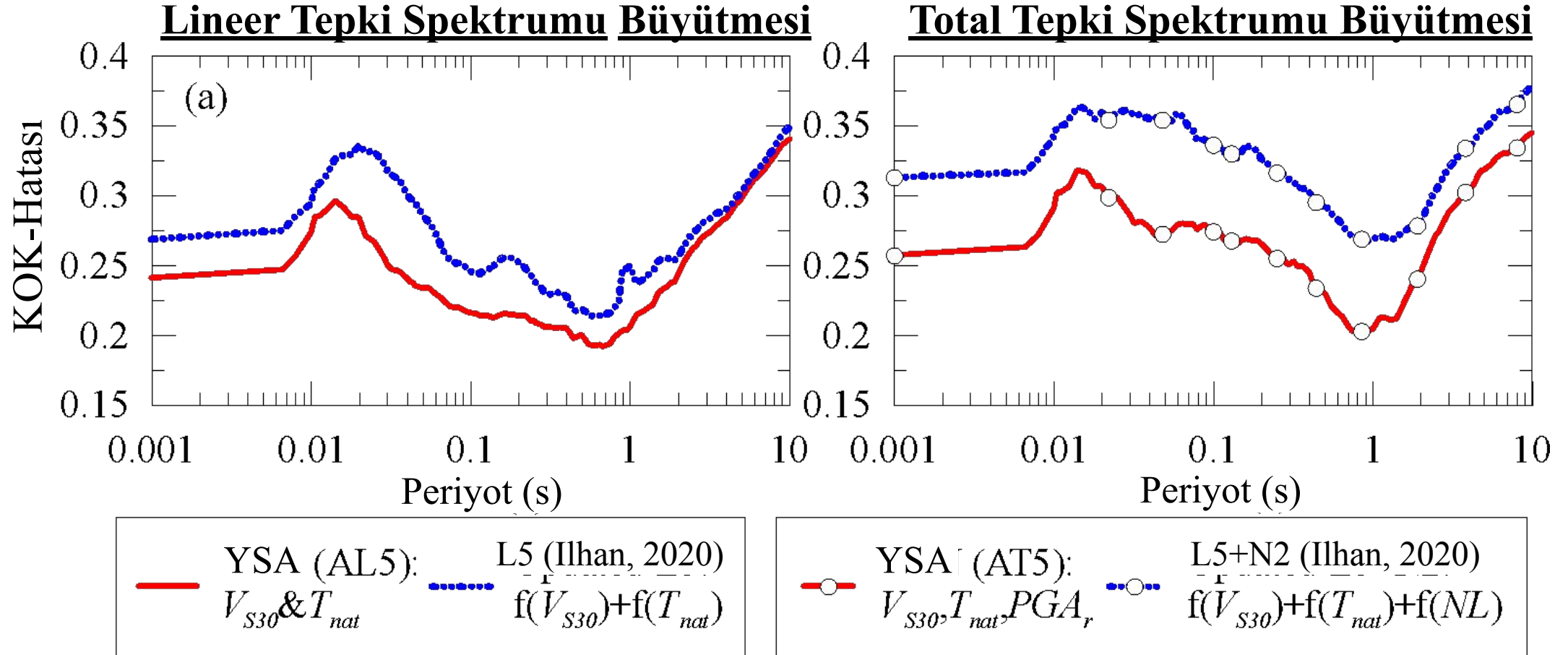
- Tepki Spektrumu: 0.001-10.0s arasındaki 125 periyotta zemin büyütmesi
- Fourier Genlik Spektrumu: 0.1-33 Hz arasındaki 110 frekansta zemin büyütmesi

YSA-Tabanlı ve Konvansiyonel Modellerin Karşılaştırılması



- **YSA**, pik büyütme değerinin yerini ve genliğini konvansiyonel modele göre gözle görülür ölçüde daha doğru tahmin etmektedir.
- **YSA** tarafından sağlanan büyütme tahminleri, simülasyon tabanlı büyütmenin V_{S30} ortamındaki saçılımını daha iyi temsil etmektedir.

YSA-Tabanlı ve Konvansiyonel Modellerin Karşılaştırılması



YSA’ların kullanımından sonra, **konvansiyonel modellere** göre lineer ve total zemin büyütmesi tahminlerinin KOK-Hatası’nda, sırasıyla, **%21 ve %27 oranında düşüşe imkan tanımıştır.**

- **OKDA** için Geliştirilmiş ve genişletilmiş 1D zemin tepki analizi veritabanı (3.6 milyonun üzerinde L+EL+NL analiz)
- İyileştirilmiş modüler zemin büyütme fonksiyonları
- Derin öğrenme yönteminin Yapay Sinir Ağları (YSA) yardımıyla zemin büyütmesinin modellenmesinde kullanılması:
 - Farklı zemin büyütme tipleri için farklı model formlarının kullanılması ihtiyacını ortadan kaldıracağı düşünülmektedir.
 - Simülasyon-tabanlı zemin büyütmesinin özelliklerinin (ör., pik zemin büyütmesinin lokasyonunuda) tahmini konvansiyonel modellere göre çok daha doğru biçimde yapılmıştır.
 - Zemin büyütmesinin tahmininin KOK-hatasında **ciddi bir düşüş elde edilmiştir.**

SCI-E İndeksli Dergiler

- Aaqib, M., Park, D., Adeel, M. B., Hashash, Y. M., and Ilhan, O. Simulation-based site amplification model for shallow bedrock sites in Korea. *Earthquake Spectra*, 8755293020981984.
- Harmon, J., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., Xu, B., Musgrove, M., and Ilhan, O. (2019). Site Amplification Functions for Central and Eastern North America–Part I: Simulation Data Set Development. *Earthquake Spectra*, 35(2), 787-814.
- Harmon, J., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., and Ilhan, O. (2019). Site amplification functions for central and eastern North America–Part II: Modular simulation-based models. *Earthquake Spectra*, 35(2), 815-847.
- Hashash, Y. M., Ilhan, O., Harmon, J. A., Parker, G. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., and Silva, W. J. (2020). Nonlinear site amplification model for ergodic seismic hazard analysis in central and eastern North America. *Earthquake Spectra*, 36(1), 69-86.
- Hashash, Y. M., Ilhan, O., Hassani, B., Atkinson, G. M., Harmon, J., and Shao, H. (2020). Significance of site natural period effects for linear site amplification in central and eastern North America: Empirical and simulation-based models. *Earthquake Spectra*, 36(1), 87-110.
- Hashash, Y. M. A., Ilhan, O., Uysal, H., Stewart, J. P., Nikolaou, S., Rathje, E. M., Campbell, K. W., and Silva, W. J. (2021). Application of empirical and simulation-based site amplification models for Central and Eastern North America to selected sites. *Earthquake Spectra* (Submitted).

Konferans Bildirileri

- Ahdi, S. K., Sadiq, S., Ilhan, O., Bozorgnia, Y., Hashash Y. M. A., Kwak, D. Y., Park, D., Yong, A., Stewart J. P. (2018), Development of a United States Community Shear Wave Velocity Profile Database, 11th National Conference on Earthquake Engineering
- Hashash, Y. M., Harmon, J., Ilhan, O., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., and Goulet, C. A. (2018). Modelling of site amplification via large scale nonlinear simulations with applications to North America. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Seismic Hazard Analysis, Earthquake Ground Motions, and Regional-Scale Assessment* (pp. 523-537). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Ilhan, O., Harmon, J. A., Numanoglu, O. A., and Hashash, Y. M. (2019). Deep learning-based site amplification models for central and eastern north america. In *7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, ICEGE 2019* (pp. 2980-2987). CRC Press/Balkema.
- Ilhan, O., Hashash, Y. M. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., Nikolaou, S. (2021). Deep learning-based site amplification models for central and eastern North America. *The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion* (Submitted)
- Sadiq, S., Ilhan, O., Ahdi, S. K., Bozorgnia, Y., Hashash, Y. M., Kwak, D. Y., Park, D., Yong, A., and Stewart, J. P. (2018). A proposed seismic velocity profile database model, 11th National Conference on Earthquake Engineering.

Tezler ve Raporlar

- Ilhan, O. (2020). Conventional and deep learning-based site amplification models for Central and Eastern North America. Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign. (Thesis advisor: Prof. Youssef M. A. Hashash)
- Hashash, Y. M. A., Harmon, J. A., Ilhan, O., Parker, G. A., and Stewart, J. P. (2017). Recommendations for ergodic nonlinear site amplification in central and eastern North America. Peer Rept.

Çalışma ve Araştırma Konuları

- İzmir ve Kocaeli için Simülasyon-Tabanlı ve Ampirik Zemin Büyütme Modelleri
- Kayma Dalgası Hız Profilineki Belirsizlik ve Değişkenliğin Tayini için Olasılıksal Model Geliştirilmesi (Kocaeli)
- Orta ve Kuzey Doğu Amerika için Yeni Nesil Zemin Büyütme Modelleri
- Batı Amerika için Yer Hareketi Modeli uyumlu Nonlinear Zemin Büyütme Modelleri
- Dalga Yayılımı ve Kalıcı Deformasyon Etkileri altında Boru Hattı-Zemin Etkileşimi Davranışı (İstanbul ve Kocaeli)

...

İLGİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER 😊

SORULARINIZ?