

## Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Doğrusal Olmayan Statik ve Dinamik Analiz ile Elde Edilen Maksimum Deplasman Taleplerinin Karşılaştırılması

A.H. Kayhan<sup>1</sup> ve A. Demir<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doçent, İnşaat Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli

<sup>2</sup> Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli  
Email: hkayhan@pau.edu.tr

### ÖZET:

Performansa dayalı tasarım yaklaşımında mevcut yapıların değerlendirilmesi ya da yeni bir yapının tasarımı için dikkate alınan önemli parametrelerden birisi de maksimum ötelenme talebidir. Deprem Yönetmeliği'ne göre, maksimum ötelenme talebinin hesabı için doğrusal olmayan statik veya dinamik analiz yöntemi kullanılabilir. Bu çalışmada, Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemleri kullanılarak tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler için elde edilen maksimum ötelenme talepleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, farklı titreşim periyodu ve yatay dayanım oranına sahip TSD sistemlerin doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizler için Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminlere ait ivme spektrumları ile uyumlu gerçek ivme kaydı setleri kullanılmıştır. Analiz sonuçları, düşük periyot ve yatay dayanım oranına sahip TSD sistemler için dinamik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme taleplerinin statik analiz ile elde edilenlere göre belirgin olarak yüksek olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, ayrıca periyodun ve/veya yatay dayanım oranının artması ile statik ve dinamik analiz sonuçlarının arasındaki farkın azaldığını ve hatta statik analiz sonuçlarının daha yüksek olduğu durumların da gözlemlenebileceğini göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Maksimum Ötelenme Talebi, Doğrusal Olmayan Analiz, Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

### Comparison of Maximum Displacement Demands of SDOF Systems Obtained by Nonlinear Static and Dynamic Analysis

#### ABSTRACT:

One of the most important parameters taken into account for the assessment of existing structures or design of new structure in the performance-based approach is the maximum displacement demand. According to Turkish Earthquake Code (TEC-2007), nonlinear static or dynamic analysis can be used for calculation of the maximum displacement demand of the structures. In this study, maximum displacement demands of single degree of freedom (SDOF) systems obtained by nonlinear static and dynamic analysis methods defined in TEC-2007 were compared. For this purpose, nonlinear analysis of SDOF systems with various vibration periods and strength ratios were performed. Real ground motion records sets compatible with TEC-2007 criteria were used for the analyses. Analysis results showed that, dynamic analysis results are considerably higher than static analysis results for SDOF systems with low period and strength ratio. Results also showed that the difference between dynamic and static analysis results decreases if the period and/or strength ratio of SDOF systems are increase.

**KEY WORDS:** Maximum Displacement Demand, Nonlinear Analysis, Single Degree of Freedom Systems

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda performans esaslı analiz yöntemleri, yapıların depreme dayanıklı tasarımı ya da deprem sırasındaki davranışlarının değerlendirilmesinde ön plana çıkmıştır. Bunun bir sonucu olarak, doğrusal olmayan statik ve/veya dinamik analiz yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri temel olarak, yapının yatay deprem yükleri altındaki yatay kuvvet-kritik yer deformasyonu ilişkisinin, malzeme ve geometri deformasyonu bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elde edilmesine ve bunun çeşitli parametrelerle değerlendirilmesine dayanmaktadır (ATC-40, 1996; FEMA-356, 2000). Doğrusal olmayan statik analizler, değerlendirme ve/veya tasarım kriterleri farklı olsa da genel olarak tek serbestlik dereceli (TSD) sistemlerin çözümlenmesi prensibine dayanmaktadır (Krawinkler ve Seneviratna, 1998; Fajfar, 2002; Aydınolu, 2003; Montes vd., 2004; Goel ve Chopra, 2004). Yapının doğrusal ötesi davranışını en gerçekçi biçimde yansıtan, en karmaşık ve gelişmiş analiz yöntemi ise doğrusal olmayan dinamik analiz (zaman tanım alanında analiz) yöntemidir. TSD sistemlerin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri ile maksimum ötelenme talebinin elde edildiği ve talebin farklı yapısal parametrelerle ilişkisinin araştırıldığı bir çok çalışmada bulunmaktadır (Mollaioli ve Bruno, 2008; D'Ambrisi ve Mezzi, 2005; Bazzurro ve Luco, 2005; Riddell vd., 2002).

Bu çalışmada, TSD sistemlerin Deprem Yönetmeliği (2007) ile uyumlu doğrusal olmayan statik ve dinamik analizleri ile elde edilen maksimum ötelenme taleplerinin karşılanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı periyot (0.4s, 0.5s, 0.6s, 0.7s, 0.8s, 0.9s, 1.0s) ve yatay dayanım oranlarına (0.1, 0.2, 0.3, 0.4) sahip 28 TSD sistemin doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. TSD sistemlerin doğrusal olmayan davranışını için Elastik Mükemmel Plastik çevrimsel davranış modeli kullanılmıştır. Deprem etkisinin dikkate alınmasında TSD sistemlerin birinci derece deprem bölgesinde ve sırası ile Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminlerde yer aldığı kabul edilmiştir. Dinamik analizlerde her bir zemin sınıfı için Deprem Yönetmeliği ile uyumlu ve her birinde yedi ivme kaydı bulunan üç ayrı ivme seti kullanılmıştır.

## 2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLER

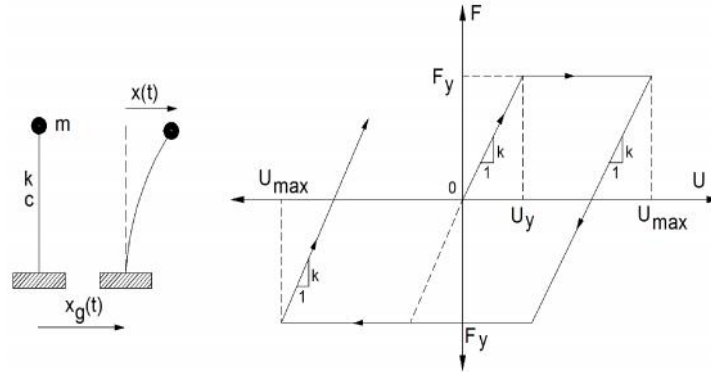
Serbestlik derecesi, yapının titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan parametre sayısıdır. Eğer bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum tek bir parametrenin verilmesi ile belirlenebiliyorsa bu tür sistemlere tek serbestlik dereceli (TSD) sistemler denilmektedir. TSD sistemlerin davranışını mesnet artları ve hareket denkleminin bağımlı artları dikkate alınarak elde edilen çözümü belirler. Etilerinde TSD sistemin titreşiminin matematiksel modeli verilmiştir. Etilerde,  $x$  yapının zamana bağlı deplasmanını ifade etmektedir. TSD sistemlerin titreşiminde temel bileşenler rijitlik ( $k$ ), kütle ( $m$ ), sönüm katsayısı ( $c$ ) ve dış kuvvettir (yer hareketi,  $x_g(t)$ ). Burada sönüm enerji tüketim mekanizmasını, dış kuvvet ise hareketin kaynağını temsil etmektedir. TSD sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi için bu sistemin hareket denklemine ihtiyaç vardır. Yer hareketi etkisindeki TSD sistemin dinamik davranışını Denklem 1 ile verilmiştir. Denklem 1'deki  $m\ddot{x}_g(t)$  terimi, yapının kütesine etkileyerek titreşime sebep olan dış kuvveti temsil etmektedir.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Bu çalışmada, TSD sistemlerin doğrusal olmayan davranışının temsil edilmesi için kullanılan Elastik Mükemmel Plastik (EMP) çevrimsel davranış modeli, genellikle referans davranış modeli olarak kullanılmaktadır. Etilerinde EMP modele ait çevrimsel davranış için yük-deplasman ilişkisi ( $F-U$ ) görülmektedir. Elastik davranışın sonunda akma dayanımına ( $F_y$ ) ulaşılmakta ve akma noktasından sonra dayanımda bir artış olmaksızın elastik deplasmanlar yanında plastik deplasmanlar da meydana gelmektedir. Yük boşalması esnasında ise, elastik etkilere geri dönmeler geri dönmeler geri dönmeyerek kalmaktadır. Yükleme ve yük boşalması esnasında rijitlikte ( $k$ ) bir değişim oluşmaktadır (Celep, 2008).

Sönümsüz titreşim yapan TSD sistemin doğal titreşim periyodu ve tek serbestlik dereceli sistemin ağırlığı Denklem 2 ile gösterilmiştir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad W = mg \quad (2)$$



Şekil 1. Tek serbestlik dereceli sistem ve çevrimsel davranış modeli

Bu çalışmada, titreşim periyodu 0.4s ile 1.0s arasında (0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0) de bulunan TSD sistemler dikkate alınmıştır. TSD sistemlerin yatay yük kapasitelerinin ( $F_y$ ), deprem hesabına esas ağırlığına ( $W$ ) oranı, yatay dayanım oranı ( $F_y/W$ ) olarak tanımlanmaktadır. Her bir doğal titreşim periyodu için 0.1 ile 0.4 arasında bulunan (0.1, 0.2, 0.3, 0.4) yatay dayanım oranına sahip TSD sistemler dikkate alınmıştır.

### 3. DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK ANALİZ

Bu çalışmada, dinamik analiz ile kastedilen zaman tanım alanında analizdir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminde, yapıya etkiyen zamana bağlı yükler altında, taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan davranışını da göz önüne alınarak sistemin hareket denklemi adım adım çözülmektedir. Analiz sırasında her bir adımda sistemde meydana gelen yer deplasman, plastik eğilme ve iç kuvvetler hesaplanmaktadır. Deprem Yönetmeliği'nde zaman tanım alanında analiz ile ilgili olarak yapılan tanımlamalar aşağıda kısaca belirtilmiştir.

#### 3.1. Deprem Yönetmeliği Zaman Tanım Alanında Analiz Koşulları

Zaman tanım alanında yapılacak deprem hesabı için kaydedilmiş depremler veya kaynak ve dalga yayılımı özellikleri fiziksel olarak benzetilmiş yer hareketleri kullanılabilir. Bu tür yer hareketleri üretilirken yerel zemin koşulları da uygun biçimde göz önüne alınmalıdır. Analiz için en az üç ivme kaydının kullanılması ve seçilecek ivme kayıtlarının aşağıda verilen koşulları sağlaması gerekir:

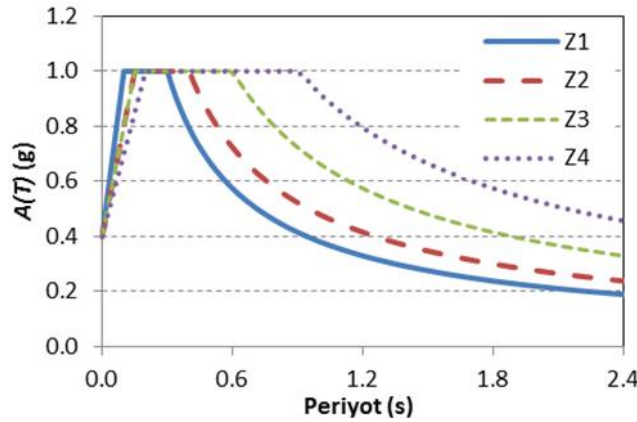
- Kuvvetli yer hareketinin süresi, binanın dikkate alınan doğrultudaki birinci doğal titreşim periyodunun 5 katından ve 15 saniyeden daha kısa olmayacaktır.
- Kullanılacak olan deprem yer hareketlerinin sıfır periyoda karşı gelen spektral ivme değerlerinin ortalaması  $A_{0g}$ 'den daha küçük olmayacaktır.
- Kullanılacak her bir ivme kaydına göre %5 sönüm oranı için bulunacak spektral ivme değerlerinin ortalaması, binanın göz önüne alınan deprem doğrultusundaki birinci periyodu  $T$ 'ye göre  $0.2T$  ile  $2.0T$  aralığında, Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanmış olan elastik spektral ivmelerinin %90'ından daha az olmayacaktır.

- d) Zaman tanım alanında do rusal elastik analiz yapılması durumunda, azaltılmış deprem yer hareketinin elde edilmesi için deprem yükü azaltma katsayısı kullanılarak hesaplanmış spektral ivme değerleri dikkate alınacaktır.
- e) Do rusal veya do rusal olmayan hesapta, üç yer hareketi kullanılması durumunda analiz sonuçlarının maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise analiz sonuçlarının ortalaması tasarım için esas alınacaktır.

Anlatıldığı üzere, Deprem Yönetmeliği, zemin sınıfları için tanımlanan elastik tasarım spektrumları ile analizde kullanılacak ivme kayıtlarına ait ortalama spektrum arasında belirli bir uyum olmasını istemektedir. Deprem bölgelerinde ve herhangi bir zemin üzerinde yapılacak yeni binalar için tasarım depreminin, bina önem katsayısı  $I=1$  olan binalar için 50 yıllık bir süre içerisinde oluşma olasılığı %10'dur. Deprem yüklerinin belirlenmesi için esas alınacak olan Spektral İvme Katsayısı,  $A(T)$ , Denklem 3 ile verilmiştir. Denklem 3'te yer alan  $A_0$  etkin yer ivme katsayısıdır ve birinci derece deprem bölgesi için  $A_0=0.40$  alınmaktadır. Bina önem katsayısı  $I$ , binanın kullanım amacı veya türüne göre 1.00-1.50 arasında değişmektedir. Yerel zemin sınıflarına bağlı olarak tanımlanmış olan %5 sönüm oranına sahip spektrum katsayısı  $S(T)$ , yerel zemin sınıflarına ait spektrum karakteristik periyotları ( $T_A$  ve  $T_B$ ) ve bina doğal titreşim periyodu  $T$ 'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$A(T) = A_0 I S(T) \quad (3)$$

Şekil 2'de, birinci derece deprem bölgesinde yer alan ve bina önem katsayısı  $I=1$  olan bir bina için kullanılacak elastik spektral ivme katsayısı  $A(T)$ 'nin, yerel zemin sınıflarına bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 2. Yerel zemin sınıfları için elastik spektral ivme

Bilindiği gibi, gerçek depremlere ait kayıtların bulunduğu sayısal veri tabanlarında elde edilen gerçek ivme kayıtlarının özelliklerinden, deprem büyüklüğü, fay tipi, deprem kaynağına olan mesafeleri gibi özellikler de dikkate alınmaktadır. Öncelikle, Avrupa Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı'ndan (Ambraseys vd., 2004) aşağıda belirtilen ilave koşullar da dikkate alınarak toplam 542 ivme kaydı belirlenmiştir.

- ivme kayıtlarının kaydedildiği depremlerin büyüklüğü  $M \geq 5.5$  alınmıştır.
- Depremin kaydedildiği istasyonların fayya olan mesafeleri 10-50 km arasındadır.
- ivme kaydının maksimum yer ivmesi en az  $0.1g$  kabul edilmiştir.

Katalog incelendiğinde, Eurocode-8'e (2004) göre A zemin sınıfı için 95 yer hareketi kaydına ait 190, B zemin sınıfı için 118 yer hareketi kaydına ait 236 ve C zemin sınıfı için 58 yer hareketi kaydına ait 116 yatay bileşen seçildiği görülmüştür. D ve E sınıfı zeminlerde kaydedilen ve yukarıda verilen koşulları sağlayan yeterli sayıda

ivme kaydı bulunmadığı için katalog oluşturulurken bu zeminlerde kaydedilen kayıtlar dikkate alınmamıştır. Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminler, sırasıyla, Eurocode-8’de tanımlanan A, B ve C sınıfı zeminlerle uyum göstermektedir. Herhangi bir zemin sınıfı için, o zemin sınıfı ile uyumlu zeminde yer alan kayıt istasyonlarında kaydedilen ivme kayıtları arasından seçim yapılmıştır.

Deprem Yönetmeliğine göre hedef spektrum ile ivme setine ait ortalama spektrum oranının alt sınırı 0.90 olarak tanımlanmıştır, ancak bir üst sınır tanımlanmamıştır. Bu çalışmada, hedef spektrum ile ivme setine ait ortalama spektrum arasındaki oranın 0.90-1.10 arasında olması ve böylece hedef spektrumla daha fazla uyum elde edilmesi sağlanmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan TSD sistemlerin periyotları 0.40s-1.00s arasında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan TSD sistemlerin periyotları 0.40s-1.00s arasında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan TSD sistemlerin periyotları 0.40s-1.00s arasında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan TSD sistemlerin periyotları 0.40s-1.00s arasında değerlendirilmiştir.

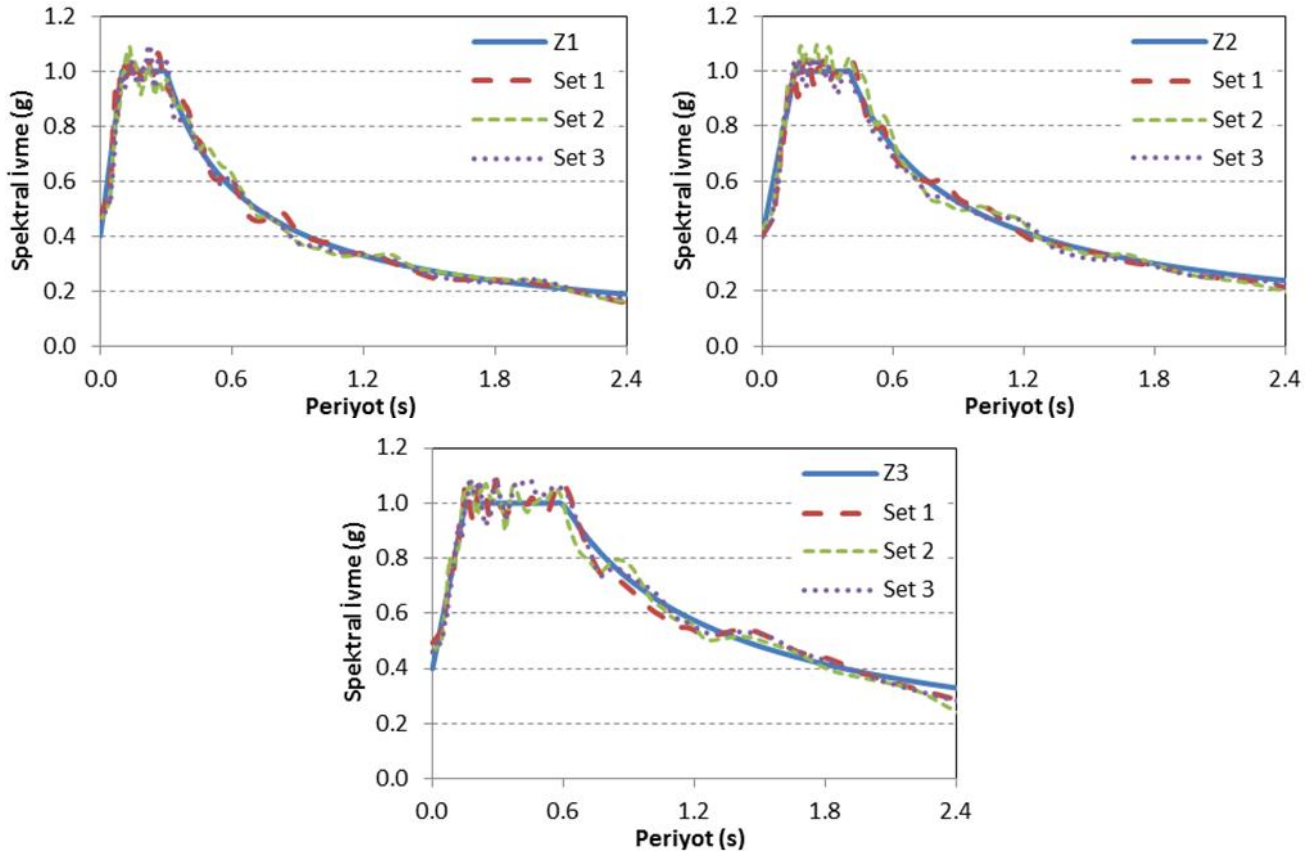
### 3.2. ivme Kaydı Setleri

Dikkate alınan her bir yerel zemin sınıfı için Deprem Yönetmeliği ile uyumlu olacak şekilde 3 farklı ivme kaydı seti, toplamda 9 farklı ivme seti elde edilmiştir (Demir, 2015). Her bir ivme setinde 7 ivme kaydı bulunmaktadır. Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminler için elde edilen ivme kaydı setlerine ait bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de, set içinde yer alan ivme kayıtlarının kodu ve yatay bileşeni ile ölçeklendirme katsayıları yer almaktadır. ivme kayıtlarına ait detaylı bilgiler EK-A’da verilmiştir.

Tablo 1. Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminler için elde edilen ivme kaydı setleri

Zemin sınıfı	1.SET		2.SET		3.SET	
	Kayıt	Ölçek	Kayıt	Ölçek	Kayıt	Ölçek
Z1	5270-Y	1.014	646-Y	0.816	5272-Y	1.440
	410-X	1.782	383-Y	1.449	6331-X	1.132
	292-X	1.344	362-X	1.475	382-X	1.448
	362-X	1.554	292-X	0.971	5655-X	0.787
	7158-X	0.632	1243-X	0.789	6270-Y	0.894
	6272-Y	1.224	5272-Y	1.664	292-X	0.818
	6327-Y	0.519	6331-X	1.166	362-Y	0.972
Z2	645-Y	1.394	1859-X	0.992	6496-Y	1.721
	352-Y	1.275	946-Y	1.786	1735-X	0.835
	548-X	0.711	6496-Y	1.803	532-Y	1.061
	6422-X	1.600	645-Y	1.182	595-X	0.910
	946-Y	0.903	1720-Y	0.636	760-X	0.870
	760-Y	1.467	595-X	0.819	142-Y	1.523
	572-Y	1.747	142-Y	1.501	352-Y	0.982
Z3	360-X	0.704	601-Y	1.008	141-X	1.988
	374-Y	0.672	648-Y	0.743	151-X	0.923
	602-X	0.999	360-X	0.831	7010-X	1.378
	6962-Y	1.355	6606-Y	1.105	1230-X	0.540
	6978-Y	0.622	1230-X	0.548	6606-Y	1.301
	6606-Y	0.582	6975-Y	1.096	6978-Y	0.819
	1230-X	0.788	375-Y	0.600	6962-Y	1.984

Her bir zemin sınıfına ait hedef spektrum ve hedef spektrumla uyumlu olarak elde edilen üç farklı ivme setine ait ortalama spektrumlar ekil 3’te verilmiştir.



ekil 3. Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminler için elde edilen ivme setlerine ait ortalama spektrumlar

#### 4. DO RUSAL OLMAYAN STATİK ANALİZ

Deprem Yönetmeliğine göre, do rusal olmayan spektral yerdeğiştirme ( $S_{dil}$ ), itme analizinin ilk adımında birinci moda ait do rusal elastik spektral yerdeğiştirme ( $S_{del}$ ) birinci moda ait spektral yerdeğiştirme oranı ( $C_{R1}$ ) ile çarpılması ile elde edilmektedir.  $S_{del}$ , Denklem 4 ile hesaplanmaktadır. Denklem 4'te,  $S_{ael}$  itme analizinin ilk adımında birinci moda ait elastik spektral ivme ve  $\ddot{S}_1^{(1)}$  ba langıçtaki itme adımında hesap yapılan do rultudaki birinci titreşim moduna ait do al açısal frekanstır.  $S_{dil}$  ise Denklem 5 ile hesaplanmaktadır.

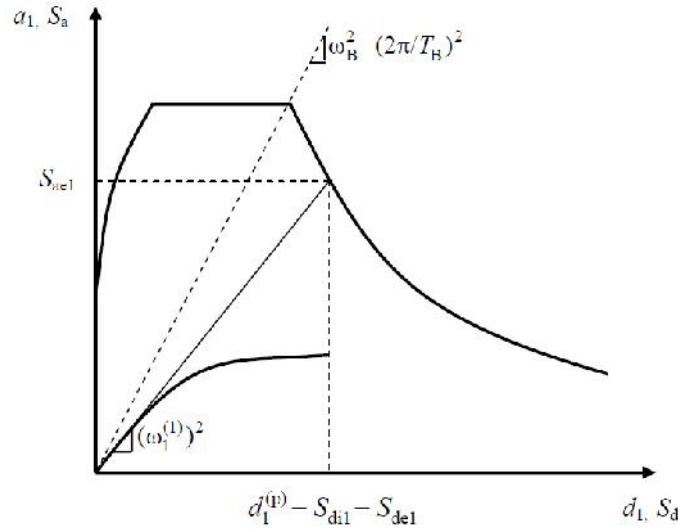
$$S_{del} = \frac{S_{ael}}{(\ddot{S}_1^{(1)})^2} \quad (4)$$

$$S_{dil} = C_{R1} S_{del} \quad (5)$$

Denklem 5'te yer alan  $C_{R1}$ , ba langıç periyodu  $T_1^{(1)}$ 'in de erine ba lı olarak belirlenmektedir. Ba langıç periyodunun, dikkate alınan ivme spektrumundaki karakteristik periyot  $T_B$ 'ye e it veya daha uzun olması durumunda ( $T_1^{(1)} > T_B$ ),  $S_{dil}$ , e it yerdeğiştirme kuralı uyarınca do al periyodu yine  $T_1^{(1)}$  olan e lenik do rusal elastik sisteme ait do rusal elastik spektral yerdeğiştirme  $S_{del}$ 'e e it alınacaktır.

ekil 4 ve ekil 5'de birinci titreşim moduna ait ve koordinatları ( $d_1, a_1$ ) olan modal kapasite diyagramı ile koordinatları "spektral yerdeğiştirme ( $S_d$ ) – spektral ivme ( $S_a$ )" olan davranış spektrumu bir arada çizilmiştir.



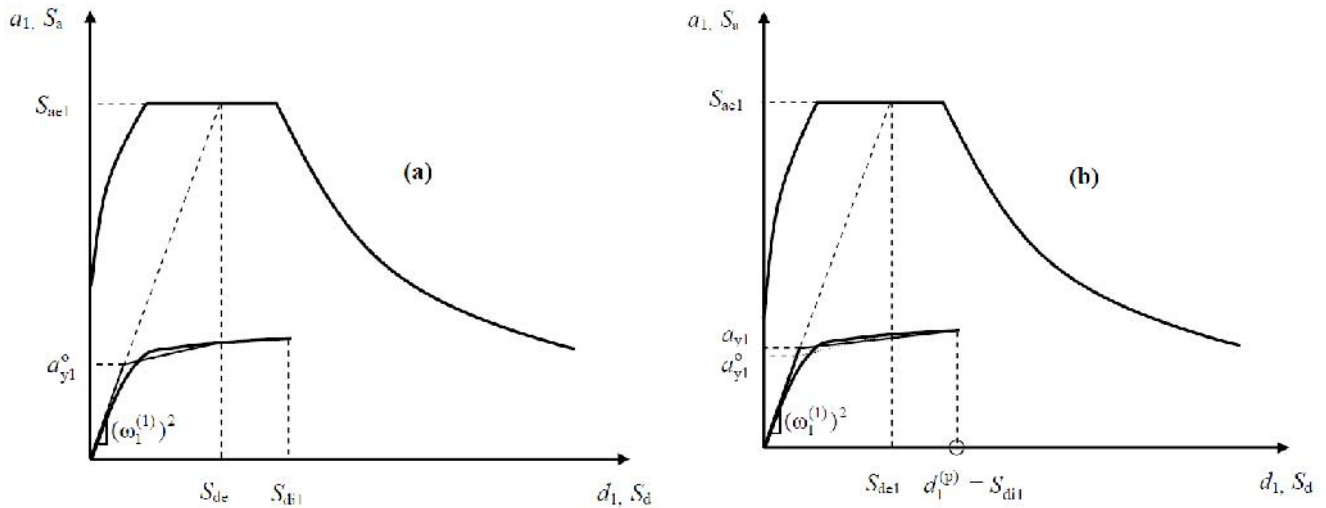


ekil 4. Do rusal olmayan spektral yerde i tirme talebi tahmini ( $T_1^{(1)} < T_B$ )

Ba langıç periyodunun, karakteristik periyot  $T_B$ 'den daha kısa olması durumunda ( $T_1^{(1)} < T_B$ ) ise, Denklem 5'teki spektral yerde i tirme oranı  $C_{R1}$ , ardı ık yakla ımıla a a ıdaki ekilde hesaplanmaktadır:

- 1) tme analizi sonucunda elde edilen modal kapasite diyagramı, ekil 5a'da gösterildi i gibi, yakla ık olarak iki do rulu bir diyagrama dönü türülür. Bu diyagramın ba langıç do rusunun e imi, itme analizinin ilk adımındaki ( $i=1$ ) do runun e imi olan birinci moda ait öz de ere,  $(\omega_1^{(1)})^2$ , e it alınır.
- 2) Ardı ık yakla ımın ilk adımında  $C_{R1}=1$  kabulü yapılarak, e de er akma noktası'nın koordinatları e it alanlar kuralı ile belirlenir. ekil 5a'da görülen  $a_{y1}^0$  esas alınarak,  $C_{R1}$  Denklem 6'deki gibi tanımlanır:

$$C_{R1} = \frac{1 + (R_{y1} - 1)T_B / T_1^{(1)}}{R_{y1}} \geq 1 \quad (6)$$



ekil 5. Do rusal olmayan spektral yerde i tirme talebi tahmini ( $T_1^{(1)} < T_B$ )

Denklem 6'da,  $R_{y1}$  birinci moda ait dayanım azaltma katsayısıdır ve Denklem 7 ile hesaplanmaktadır.

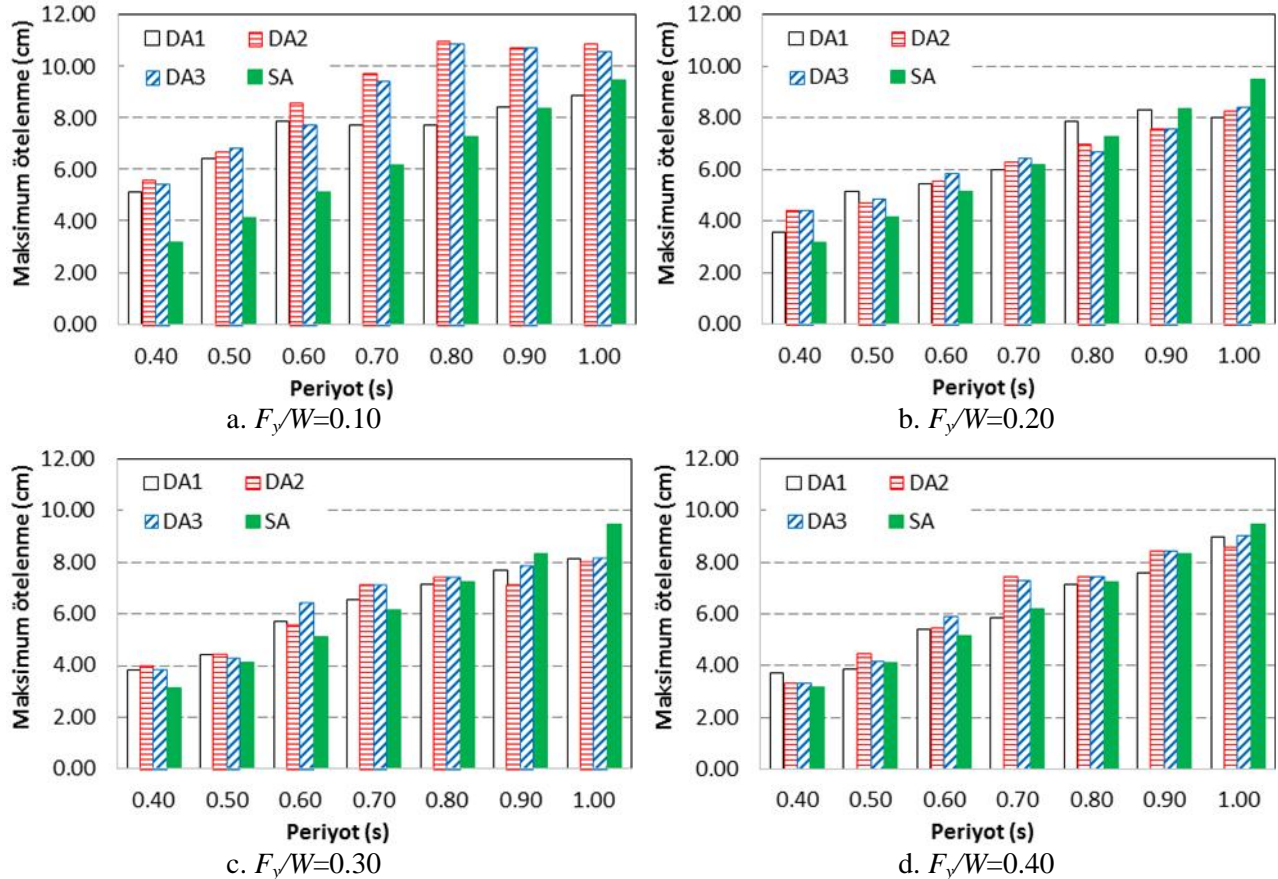
$$R_{y1} = \frac{S_{ae1}}{a_{y1}} \quad (7)$$

- 3) Denklem 6'dan  $C_{R1}$  kullanılarak Denklem 5 ile hesaplanan  $S_{d1}$  esas alınarak e de er akma noktası'nın koordinatları, ekil 5b'de gösterildi i üzere, e it alanlar kuralı ile yeniden belirlenir ve bunlara göre  $a_{y1}$ ,  $R_{y1}$  ve  $C_{R1}$  tekrar hesaplanır. Ardı ık iki adımda elde edilen sonuçların kabul edilebilir ölçüde birbirlerine yakla tıkları adımda ardı ık yakla ıma son verilir.

## 5. ANAL Z SONUÇLARININ KAR İLA TIRILMASI

TSD sistemlerin do rusal olmayan analizleri gerçekte tirilmi ve maksimum ötelenme talepleri elde edilmi tir. Deprem Yönetmeli i'ne göre zaman tanım alanında analiz için en az yedi ivme kaydı kullanılırsa, yapısal tepkilerin ortalaması dikkate alınmaktadır. Bu sebeple, bir ivme setinde yer alan kayıtlardan elde edilen yedi adet maksimum ötelenme talebinin ortalaması, o set için dinamik analizle elde edilen maksimum ötelenme de eri olarak kabul edilmi tir. Statik analizde ise, do rusal elastik olmayan spektral yer de i tirme ( $S_{d1}$ ) de eri, maksimum ötelenme de eri olarak dikkate alınmı tir. Çalı mada dikkate alınan tüm TSD sistemler için, do rusal olmayan statik ve dinamik analiz sonucu hesaplanan maksimum ötelenme de erleri EK-B'de verilmi tir.

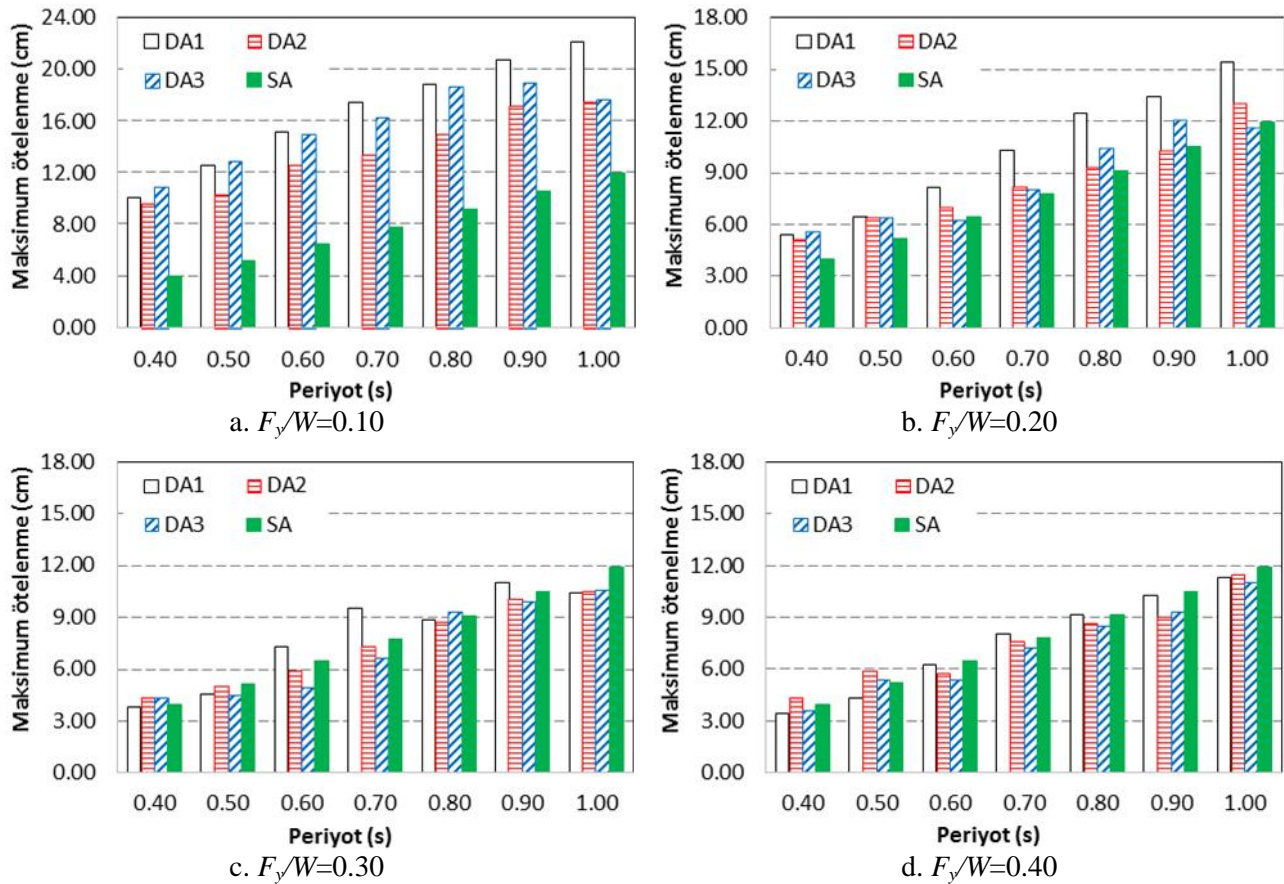
ekil 6'da, dört farklı yatay dayanım oranına sahip TSD sistemler için, Z1 sınıfı zemin dikkate alınarak üç ivme seti için elde edilen dinamik analiz sonuçları ve statik analiz sonuçları verilmi tir.



ekil 6. Z1 zemin sınıfı için do rusal olmayan dinamik analiz ve statik analiz sonuçları

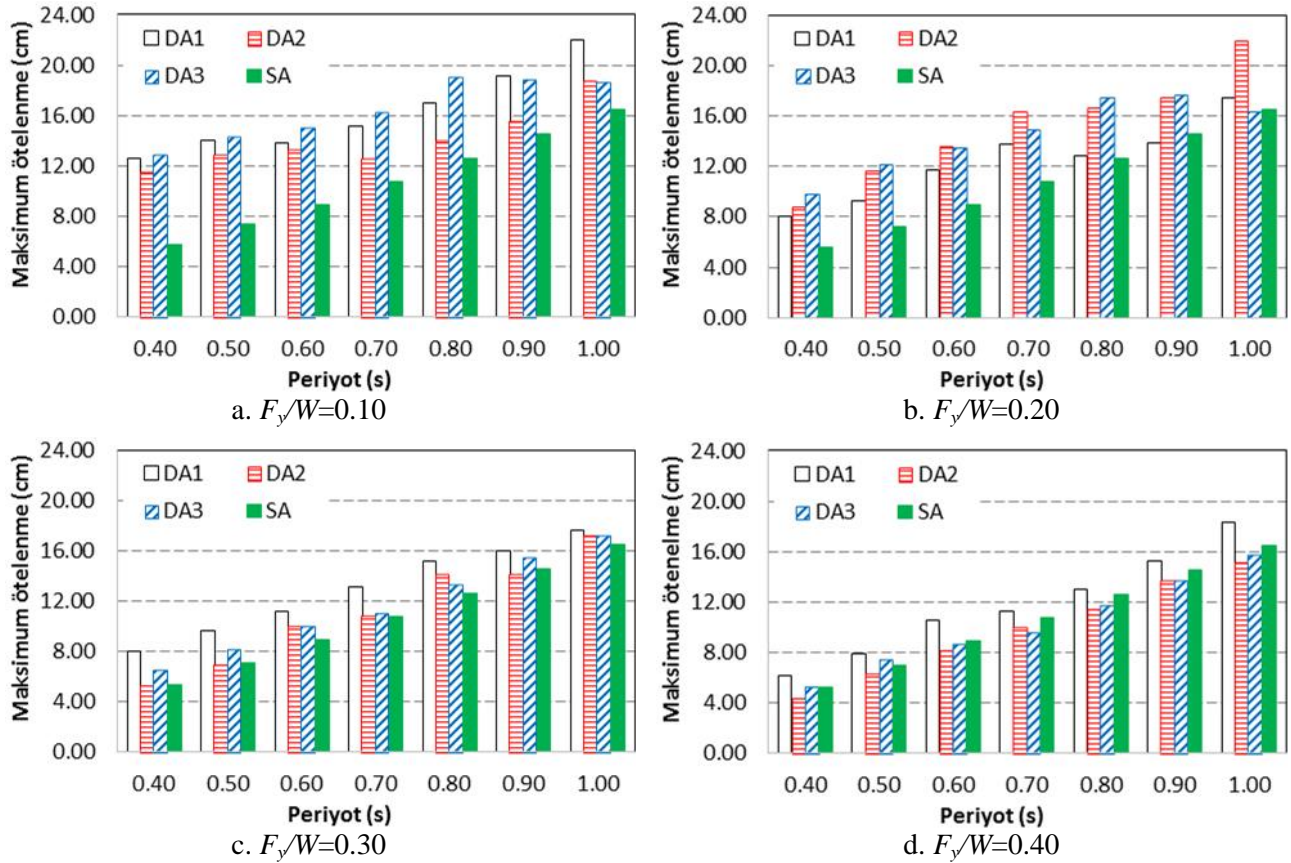


Çalışmada dikkate alınan TSD sistemlerin periyodu, Z1 sınıfı zemine ait  $T_B$  de erinden daha büyüktür. Bu sebeple, e deplasman prensibi geçerli oldu undan statik analiz sonuçları üzerinde yatay dayanım oranının etkisi olmamaktadır. Dinamik analiz sonuçları, herhangi TSD sistem için, farklı ivme setleri kullanıldı nda birbirine yakın mertebede olmakla birlikte farklı ötelenme taleplerinin elde edilebilece ini göstermektedir. Periyodun düşük de erleri için dinamik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talepleri, statik analiz ile elde edilenlere göre çok daha büyüktür. Ancak, aradaki farkın periyodun artması ile beraber azaldı ı ve hatta periyodun 0.8s-1.0s aralı nda, statik analiz ile bulunan maksimum ötelenme taleplerinin dinamik analiz ile bulunanlara göre daha büyük oldu u durumların ortaya çıkt ı görülmektedir. Örne in ekil 6a'da  $T=1.0s$  için statik analiz ile DA1 ile ifade edilen ilk ivme setine ait maksimum ötelenme talebinden daha büyük ötelenme talebi elde edilmektedir. Benzer ekilde ekil 6b'de periyodun 0.9s ve 1.0s de erleri için statik analiz ile elde edilen talep, üç ivme seti için elde edilen taleplerin tümünden daha yüksektir.



ekil 7. Z2 zemin sınıfı için do rusal olmayan dinamik analiz ve statik analiz sonuçları

ekil 7'de, TSD sistemlerde, Z2 sınıfı zemin için dinamik ve statik analiz sonuçları verilmi tir. TSD sistemlerin periyodu, Z2 sınıfı zemine ait  $T_B$  de erine e it ya da daha büyük oldu undan e deplasman prensibi bu zemin sınıfı için de tüm TSD sistemlerde geçerlidir.  $F_y/W=0.10$  oldu unda dinamik analiz ile statik analize göre daha büyük ötelenme talepleri elde edilmektedir.  $F_y/W=0.20$  için de, dinamik analiz ile elde edilen ötelenme taleplerinin daha büyük oldu u söylenebilir. Ancak di er  $F_y/W$  de erleri için, periyot arttıkça statik analiz sonuçlarının, dinamik analiz sonuçlarına göre daha büyük olma e ilimi gözlenmektedir.  $F_y/W$  de erinin esas olarak dinamik analiz sonuçlarını etkiledi i söylenebilir. Yani herhangi bir TSD sistem için,  $F_y/W$  de eri arttı nda dinamik analiz sonucu elde edilen maksimum ötelenme talepleri azalmaktadır.



ekil 8. Z3 zemin sınıfı için do rusal olmayan dinamik analiz ve statik analiz sonuçları

ekil 8'de, Z3 sınıfı zeminle uyumlu üç ivme seti ile elde edilen dinamik analiz sonuçları ve statik analiz sonuçları verilmiştir. Z3 sınıfı zemine ait  $T_B=0.60s$  de erine e it ya da daha büyük periyoda sahip TSD sistemler için de e deplasman prensibi geçerli olduğundan, bu TSD sistemler için statik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talepleri üzerinde  $F_y/W$  oranının bir etkisi olmamıştır. ekil 8a ve ekil 8b'de görüldü ü gibi  $F_y/W=0.10$  ve  $0.20$  olan TSD sistemler için dinamik analiz ile statik analize göre daha büyük ötelenme talepleri elde edilmektedir. Bu durumun istisnası  $F_y/W=0.20$  oldu unda  $T=1.0s$  için 3 nolu set ve  $T=0.9s$  için 1 nolu set ile elde edilen dinamik analiz sonucudur. TSD sistemin periyodu arttıkça dinamik analiz ve statik analiz sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.  $F_y/W=0.30$  olan TSD sistemler için de dinamik analiz sonuçlarının daha büyük oldu u söylenebilir ( ekil 8c).  $F_y/W=0.40$  oldu unda ise, herhangi bir periyod de eri için, statik analiz sonucu elde edilen maksimum ötelenme talebinin üç sete ait maksimum ötelenme talebinin en az birinden daha büyük oldu u görülmektedir ( ekil 8d).

Bilindi i gibi, depremin rastgele do ası yapısal tepkilerde gözlenen belirsizli in sebeplerindedir. Bu çalı mada da, aynı hedef spektrumla uyumlu olacak ekilde elde edilen farklı ivme setleri için dinamik analiz sonucu farklı ötelenme taleplerinin elde edildi i gözlenmiştir. Bu farklılık, statik analiz sonucuna göre bazen daha dü ük bazen de daha yüksek sonuçların gözlenmesi sonucunu da do urmaktadır. Daha fazla ivme seti kullanıldı nda da her bir set için farklı ötelenme talepleri elde edilece i açıktır. Ancak sonuçta farklı setler için elde edilen bu ötelenme taleplerinin de etrafında yı ıldı ı bir ortalama de er olacaktır. Bu çalı mada, her bir zemin sınıfı ve TSD sistem için üç ivme setinden elde edilen sonuçların ortalaması ile statik analiz sonuçları karşı lı tırılmış ve bu ekilde statik ve dinamik analiz sonuçlarının birbirine göre durumu de erlendirilmiştir. Tablo 2'de, Z1, Z2 ve

Z3 sınıfı zeminler için statik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talebinin, dinamik analiz sonucu üç set için elde edilen ve EK-B’de verilen maksimum ötelenme taleplerinin ortalamasına oranı görülmektedir.

Tablo 2. Statik ve dinamik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme taleplerinin oranı

Zemin sınıfı	$F_y/W$	Periyot (s)							
		0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	
Z1	0.10	0.59	0.62	0.64	0.69	0.74	0.84	0.94	
	0.20	0.76	0.84	0.91	0.99	1.01	1.07	1.15	
	0.30	0.81	0.94	0.87	0.89	0.99	1.10	1.17	
	0.40	0.92	1.00	0.92	0.90	0.99	1.03	1.07	
Z2	0.10	0.39	0.44	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62	
	0.20	0.74	0.81	0.90	0.88	0.85	0.88	0.89	
	0.30	0.96	1.11	1.08	1.00	1.02	1.02	1.14	
	0.40	1.06	1.01	1.12	1.03	1.05	1.10	1.06	
Z3	0.10	0.47	0.53	0.64	0.73	0.76	0.81	0.84	
	0.20	0.63	0.65	0.69	0.72	0.81	0.89	0.89	
	0.30	0.81	0.86	0.86	0.92	0.89	0.96	0.95	
	0.40	0.98	0.97	0.98	1.05	1.05	1.02	1.01	

Tablo 2’de Z1 için verilen sonuçlara göre, statik analiz ile elde edilen ötelenme talebinin dinamik analiz ile elde edilen talebe oranı periyot arttıkça ve  $F_y/W$  de eri arttıkça artmaktadır. Örne in  $T=0.40s$  olan TSD için  $F_y/W=0.10$  oldu unda 0.59 olan oran  $F_y/W=0.40$  oldu unda 0.92’ye yükselmektedir. Periyot açısından bakılırsa, örne in  $F_y/W=0.20$  için  $T=0.40s$  oldu unda 0.76 olan oran  $T=1.00s$  oldu unda 1.15’e yükselmektedir. Özetle, Z1 sınıfı zeminler için periyodun 0.40s-0.80s ve  $F_y/W$  nin 0.10-0.40 aralı nda dinamik analiz sonuçlarının daha yüksek oldu unu söylemek mümkündür. Ancak hem periyot hem de  $F_y/W$  nin artması, aradaki farkın azalmasına sebep olmaktadır. Z2 ve Z3 sınıfı zeminler için de periyodun ve  $F_y/W$  nin daha dü ük de erleri için dinamik analiz sonuçları statik analiz sonuçlarına göre çok daha yüksek iken, Z1 sınıfı zeminlerde de gözlendi i gibi periyodun ve  $F_y/W$  nin artması ile statik analiz sonuçları dinamik analiz sonuçlarına yakla maktadır. Z2 sınıfı zeminlerde  $F_y/W=0.10$  ve 0.20 olan tüm TSD sistemlerde dinamik analiz sonuçlarının daha yüksek oldu u, di er  $F_y/W$  de erleri için statik analiz sonuçlarının daha yüksek oldu u söylenebilir. Z3 sınıfı zeminlerde ise sadece  $F_y/W=0.40$  ve periyodu 0.70s-1.00s aralı nda olan TSD sistemlerde statik ve dinamik analiz sonuçlarının hemen hemen e it oldu u, di er TSD sistemler için dinamik analiz sonuçlarının daha yüksek oldu u görülmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalı mada, farklı periyot ( $T$ ) ve yatay dayanım oranına ( $F_y/W$ ) sahip TSD sistemlerin do rusal olmayan dinamik ve statik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talepleri kar ıla tırılmış tır. Dinamik analizler için Deprem Yönetmeli i’nde tanımlanan Z1, Z2 ve Z3 sınıfı zeminlere ait ivme spektrumları ile uyumlu gerçek ivme kaydı setleri kullanılmış tır. TSD sistemlerin do rusal olmayan davranı ı için Elastik Mükemmel Plastik (EMP) çevrimsel davranı modeli dikkate alınmış tır.

Analiz sonuçlarına göre, herhangi bir TSD sistem için, aynı hedef spektrumla uyumlu olacak eilde elde edilen farklı ivme kaydı setleri kullanıldı nda, farklı maksimum ötelenme talepleri elde edilmektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan TSD sistemler için periyot ve  $F_y/W$  de eri dü ük oldu unda dinamik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme taleplerinin, statik analiz ile elde edilenlere göre daha yüksek oldu u görülmü tür. Bu durum tüm zemin sınıfları için geçerlidir.  $F_y/W$  ve periyot de erlerinin artması ile dinamik ve statik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talepleri arasındaki fark azalmakta ve hatta statik analiz ile elde edilen taleplerin daha büyük oldu u durumlarla karşılaşılmaktadır.

Z1 sınıfı zeminler için,  $F_y/W=0.10$  olması ya da periyodun 0.40s-0.70s arasında olması durumunda, dinamik analiz sonuçları, statik analiz sonuçlarına göre daha yüksektir. Bu koşulları sağlayan TSD sistemler için statik analiz sonuçları, dinamik analiz sonuçlarının %59'u ile %99'u arasında değişmektedir. Z2 sınıfı zeminler için  $F_y/W$  de erinin 0.10 ya da 0.20 olması durumunda, dikkate alınan tüm periyot de erleri için dinamik analiz sonuçları daha yüksektir ve periyot de erlerine bağlı olarak statik analiz sonuçları, dinamik analiz sonuçlarının %39'u ile %90'ı arasında değişmektedir. Z3 sınıfı zeminler için  $F_y/W$ 'nin 0.10, 0.20 ve 0.30 de erleri için periyodun 0.40s-1.00s aralığında dinamik analiz sonuçları, statik analiz sonuçlarına göre daha yüksektir.

Çalışma kapsamında seçilen TSD sistemler, çevrimsel davranış modeli ve ivme setleri için geçerli olmak üzere, dinamik analiz sonuçlarının statik analiz sonuçlarına göre daha güvenli yönde kalan sonuçlar verdiğini söylenebilir. Farklı ivme setleri, çevrimsel davranış modeli ve TSD sistemler için benzer çalışmalar yapılarak bu çalışmada elde edilen sonuçların geliştirilebileceğini söylemek gerekir.

## KAYNAKLAR

- ATC-40. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California.
- Ambraseys, N.N., Douglas, J., Rinaldis, D., Berge, T.C., Suhadolc, P., Costa, G., Sigbjornsson, R. ve Smit, P. (2004). Dissemination of european strong-motion data. vol. 2, Cd-Rom collection. UK: Engineering and Physical Sciences Research Council.
- Aydıno lu, N.M. (2003). An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral deformation for multi-mode seismic performance evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering* **1(1)**, 3-36.
- Bazzurro, P., Luco, N. (2005). Accounting for uncertainty and correlation in earthquake loss estimation. Proceedings of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Italy.
- Celep, Z. (2008). Betonarme Ta rıyıcı Sistemlerde Do rusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Beta Da rıtım, İstanbul.
- D'Ambrisi, A., Mezzi, M. (2005). A probabilistic approach for estimating the seismic response of EP SDOF systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **34**, 1737-1753.
- Deprem Yönetmeli i, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve Şkân Bakanlığı, Ankara.
- Demir, A. (2015). Deprem Yönetmeli i ile Uyumlu vme Kaydı Setleri Kullanılarak Do rusal Olmayan Dinamik Ötelenme Taleplerinin istatistiksel Olarak De erlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. ABD, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Eurocode-8. (2004). Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. EN1998-1-2004, European Committee for Standardization, Brussels.
- FEMA-356. (2000). Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington.



Fajfar, P. (2002). Structural analysis in earthquake engineering – a breakthrough of simplified nonlinear methods. 12th European Conference on Earthquake Eng., London.

Goel, R.K., Chopra, A.K. (2004). Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC buildings. *Earthquake Spectra* **20(1)**, 225-254.

Krawinkler, H., Seneviratna G.D.P.K. (1998). Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures* **20(4-6)**, 452-464.

Montes, E.H., Kwon, O.S., Aschheim, M.A. (2004). An energy-based formulation for first-and multiple-mode nonlinear static (pushover) analyses. *Journal of Earthquake Engineering* **8(1)**, 69-88.

Mollaioli, F., Bruno, S. (2008). Influence of site effects on inelastic displacement ratios for SDOF and MDOF systems. *Computers and Mathematics with Applications* **55**, 184–207.

Riddell, R., Garcia, J.E. ve Garces, E. (2002). Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **31**, 515-538.

**EK-A: Zaman Tanım Alanında Analiz için Kullanılan Deprem Kayıtlarına Ait Bilgiler**

Kayıt	Deprem ismi	Tarihi	stasyon kodu	Kayıt	Deprem ismi	Tarihi	stasyon kodu
141-X	Friuli	15.09.1976	ST12	760-Y	Umbria Marche	26.09.1997	ST265
142-Y	Friuli	15.09.1976	ST14	946-Y	Potenza	05.05.1990	ST103
151-X	Friuli	15.09.1976	ST33	1230-X	zmit	17.08.1999	ST576
292-X	Campano Lucano	23.11.1980	ST98	1243-X	zmit	13.09.1999	ST561
352-Y	Biga	05.07.1983	ST131	1720-Y	Dinar	01.10.1995	ST543
360-X	Umbria	29.04.1984	ST41	1735-X	Adana	27.06.1998	ST581
362-X	Umbria	29.04.1984	ST137	1859-X	NW Kefallinia Island	27.02.1987	ST1303
362-Y	Umbria	29.04.1984	ST137	5270-Y	Mt. Vatnafjoll	25.05.1987	ST2486
374-Y	Lazio Abruzzo	07.05.1984	ST148	5272-Y	Mt. Vatnafjoll	25.05.1987	ST2487
375-Y	Lazio Abruzzo	07.05.1984	ST149	5655-X	NE of Banja Luka	13.08.1981	ST2950
382-X	Lazio Abruzzo	11.05.1984	ST153	6270-Y	South Iceland	17.06.2000	ST2568
383-Y	Lazio Abruzzo	11.05.1984	ST153	6272-Y	South Iceland	17.06.2000	ST2568
410-X	Gölbaşı	05.05.1986	ST161	6327-Y	South Iceland	21.06.2000	ST2552
532-Y	Racha	15.06.1991	ST202	6331-X	South Iceland	21.06.2000	ST2486
548-X	zmir	06.11.1992	ST43	6422-X	zmit	13.09.1999	ST3135
572-Y	Patras	14.07.1993	ST178	6496-Y	Düzce	12.11.1999	ST3135
595-X	Umbria Marche	26.09.1997	ST83	6606-Y	zmit	11.11.1999	ST2571
601-Y	Umbria Marche	26.09.1997	ST224	6962-Y	zmir	13.09.1999	ST3271
602-X	Umbria Marche	26.09.1997	ST224	6975-Y	zmit	13.09.1999	ST3272
645-Y	Umbria Marche	14.10.1997	ST83	6978-Y	zmir	13.09.1999	ST3273
646-Y	Umbria Marche	14.10.1997	ST234	7010-X	zmit	11.11.1999	ST772
648-Y	Umbria Marche	14.10.1997	ST332	7158-X	Firuzabad	20.06.1994	ST3293
760-X	Umbria Marche	26.09.1997	ST265				



**EK-B:** Doğrusal olmayan dinamik ve statik analiz ile elde edilen maksimum ötelenme talepleri (cm)

Zemin	T	F <sub>v</sub> /W	DA1	DA2	DA3	SA
Z1	0.40	0.10	5.14	5.57	5.43	3.16
Z1	0.50	0.10	6.43	6.71	6.86	4.13
Z1	0.60	0.10	7.86	8.57	7.71	5.13
Z1	0.70	0.10	7.71	9.71	9.43	6.18
Z1	0.80	0.10	7.71	11.00	10.86	7.25
Z1	0.90	0.10	8.43	10.71	10.71	8.35
Z1	1.00	0.10	8.86	10.86	10.57	9.48
Z1	0.40	0.20	3.57	4.43	4.43	3.16
Z1	0.50	0.20	5.14	4.71	4.86	4.13
Z1	0.60	0.20	5.43	5.57	5.86	5.13
Z1	0.70	0.20	6.00	6.29	6.43	6.18
Z1	0.80	0.20	7.86	7.00	6.71	7.25
Z1	0.90	0.20	8.29	7.57	7.57	8.35
Z1	1.00	0.20	8.00	8.29	8.43	9.48
Z1	0.40	0.30	3.86	4.00	3.86	3.16
Z1	0.50	0.30	4.43	4.43	4.29	4.13
Z1	0.60	0.30	5.71	5.57	6.43	5.13
Z1	0.70	0.30	6.57	7.14	7.14	6.18
Z1	0.80	0.30	7.14	7.43	7.43	7.25
Z1	0.90	0.30	7.71	7.14	7.86	8.35
Z1	1.00	0.30	8.14	8.00	8.14	9.48
Z1	0.40	0.40	3.71	3.29	3.29	3.16
Z1	0.50	0.40	3.86	4.43	4.14	4.13
Z1	0.60	0.40	5.43	5.43	5.86	5.13
Z1	0.70	0.40	5.86	7.43	7.29	6.18
Z1	0.80	0.40	7.14	7.43	7.43	7.25
Z1	0.90	0.40	7.57	8.43	8.43	8.35
Z1	1.00	0.40	9.00	8.57	9.00	9.48
Z2	0.40	0.10	10.00	9.57	10.86	3.97
Z2	0.50	0.10	12.57	10.29	12.86	5.19
Z2	0.60	0.10	15.14	12.57	15.00	6.46
Z2	0.70	0.10	17.43	13.43	16.29	7.78
Z2	0.80	0.10	18.86	15.00	18.71	9.13
Z2	0.90	0.10	20.71	17.14	19.00	10.51
Z2	1.00	0.10	22.14	17.43	17.71	11.93
Z2	0.40	0.20	5.43	5.14	5.57	3.97
Z2	0.50	0.20	6.43	6.43	6.43	5.19
Z2	0.60	0.20	8.14	7.00	6.29	6.46
Z2	0.70	0.20	10.29	8.14	8.00	7.78
Z2	0.80	0.20	12.43	9.29	10.43	9.13
Z2	0.90	0.20	13.43	10.29	12.00	10.51
Z2	1.00	0.20	15.43	13.00	11.57	11.93

Zemin	T	F <sub>v</sub> /W	DA1	DA2	DA3	SA
Z2	0.40	0.30	3.86	4.29	4.29	3.97
Z2	0.50	0.30	4.57	5.00	4.43	5.19
Z2	0.60	0.30	7.29	5.86	4.86	6.46
Z2	0.70	0.30	9.57	7.29	6.57	7.78
Z2	0.80	0.30	8.86	8.71	9.29	9.13
Z2	0.90	0.30	11.00	10.00	9.86	10.51
Z2	1.00	0.30	10.43	10.43	10.57	11.93
Z2	0.40	0.40	3.43	4.29	3.57	3.97
Z2	0.50	0.40	4.29	5.86	5.29	5.19
Z2	0.60	0.40	6.29	5.71	5.29	6.46
Z2	0.70	0.40	8.00	7.57	7.14	7.78
Z2	0.80	0.40	9.14	8.57	8.43	9.13
Z2	0.90	0.40	10.29	9.00	9.29	10.51
Z2	1.00	0.40	11.29	11.43	11.00	11.93
Z3	0.40	0.10	12.57	11.57	12.86	5.76
Z3	0.50	0.10	14.00	12.86	14.29	7.33
Z3	0.60	0.10	13.86	13.29	15.00	8.94
Z3	0.70	0.10	15.14	12.57	16.29	10.76
Z3	0.80	0.10	17.00	14.00	19.00	12.63
Z3	0.90	0.10	19.14	15.57	18.86	14.54
Z3	1.00	0.10	22.00	18.71	18.57	16.50
Z3	0.40	0.20	8.00	8.71	9.71	5.56
Z3	0.50	0.20	9.29	11.57	12.14	7.20
Z3	0.60	0.20	11.71	13.57	13.43	8.94
Z3	0.70	0.20	13.71	16.29	14.86	10.76
Z3	0.80	0.20	12.86	16.57	17.43	12.63
Z3	0.90	0.20	13.86	17.43	17.57	14.54
Z3	1.00	0.20	17.43	21.86	16.29	16.50
Z3	0.40	0.30	8.00	5.29	6.57	5.36
Z3	0.50	0.30	9.57	7.00	8.14	7.08
Z3	0.60	0.30	11.14	10.00	10.00	8.94
Z3	0.70	0.30	13.14	10.86	11.00	10.76
Z3	0.80	0.30	15.14	14.14	13.29	12.63
Z3	0.90	0.30	16.00	14.14	15.43	14.54
Z3	1.00	0.30	17.57	17.14	17.14	16.50
Z3	0.40	0.40	6.14	4.43	5.29	5.17
Z3	0.50	0.40	7.86	6.29	7.43	6.95
Z3	0.60	0.40	10.57	8.14	8.71	8.94
Z3	0.70	0.40	11.29	10.00	9.57	10.76
Z3	0.80	0.40	13.00	11.43	11.71	12.63
Z3	0.90	0.40	15.29	13.71	13.71	14.54
Z3	1.00	0.40	18.29	15.14	15.71	16.50