

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEPREM YER HAREKETİ ETKİSİ ALTINDAKİ TEK
SERBESTLİK DERECELİ DİNAMİK SİSTEMLERİN
SÜNEKLİK TALEBİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Orhan Uğur MÜFTÜOĞLU**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2004

**DEPREM YER HAREKETİ ETKİSİ ALTINDAKİ TEK
SERBESTLİK DERECELİ DİNAMİK SİSTEMLERİN
SÜNEKLİK TALEBİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Orhan Uğur MÜFTÜOĞLU
(501011040)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Doç.Dr. A.Necmettin GÜNDÜZ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zekai CELEP (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Zekeriya POLAT (Y.T.Ü.)

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Son yıllarda, deprem mühendisliğinin önemi ülkemizde yaşanan ve büyük hasarlara yol açan depremlerden sonra artmıştır. Bu çalışmada deprem mühendisliğinin önemli konularından yer hareketinin talep ettiği süneklik konusu incelenmiştir. Yer hareketinin önlenebilen bir doğal afet olduğu bilinci ile kutsal mesleğimizin önemini belirtmek isterim ki, bu konuda yapılacak çalışmalarla depreme dayanıklı yapı tasarımı artsın ve insanlarımız için alın yazısı olmaktan çıksın.

Lisans ve Yüksek Lisans öğrenimim boyunca çalışmalarımda maddi manevi her türlü desteğini esirgemeyen, fikirlerine her zaman ihtiyaç duyacağım Sayın Hocam Doç. Dr A. Necmettin GÜNDÜZ'e üzerimdeki emeklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca destekleri ile hep yanımda olan, varlıklarıyla bana daima güç veren sevgili ailem Nebiye-Metin MÜFTÜOĞLU'na; yaşadığı sürece yüreği benim için çarpan rahmetli dedem Orhanbey MÜFTÜOĞLU'na; eğitim ve öğretim hayatım boyunca beni hep destekleyen, bugünlere gelmemi sağlayan halam Ayten KELEŞ'e; meslek seçimimde bana ışık tutan amcam Çetin MÜFTÜOĞLU'na; sevgisine çok değer verdiğim Ursula HAFNER'a bu vesile ile teşekkürlerimi sunmaktan kıvanç duyarım.

NİSAN 2004

Orhan Uğur MÜFTÜOĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİNEER SİSTEMLER İÇİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ	2
2.1. Zaman Tanım Alanında Adım Adım İntegrasyon Yöntemleri	2
2.2. İnterpolasyona Dayalı Yöntemler	4
2.3. Merkezi Farklar Yöntemi	6
2.4. Newmark'ın Yöntemi	9
3. LİNEER OLMAYAN SİSTEMLER İÇİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ	14
3.1. Merkezi Farklar Yöntemi	14
3.2. Newmark'ın Yöntemi	14
3.3. Lineer Olmayan Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkileri	16
3.3.1. İdeal elastoplastik kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi	16
3.3.2. Bilineer kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi	17
3.4. Yük Azaltım ve Süneklik Katsayıları	18
4. TEK SERBESTLİK DERECELİ BİR SİSTEMİN LİNEER VE LİNEER OLMAYAN ANALİZİ	21
4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin El-Centro Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Analizi	22
4.1.1. İnterpolasyona dayalı yöntemle çözüm	22
4.1.2. Merkezi farka dayalı yöntemle çözüm	23
4.1.3. Newmark'ın yöntemleri ile çözüm	24
4.1.3.1. Sabit ortalama ivme yöntemi ile çözüm	24
4.1.3.2. Doğrusal ivme değişimi yöntemi ile çözüm	25
4.2. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin El-Centro Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Olmayan Analizi	27
4.2.1. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için çözüm	27
4.2.2. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için çözüm	29
4.2.3. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için çözüm	31
4.2.4. Bilineer sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için çözüm	32

4.2.5. Bilineer sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için çözüm	33
4.2.6. Bilineer sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için çözüm	35
4.3. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Erzincan Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Analizi	36
4.3.1. Sabit ortalama ivme yöntemi ile çözüm	37
4.4. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Erzincan Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Olmayan Analizi	38
4.4.1. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için çözüm	38
4.4.2. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için çözüm	40
4.4.3. İdeal elastoplastik sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için çözüm	42
5.SONUÇLAR	44
KAYNAKLAR	46
EKLER	47
ÖZGEÇMİŞ	52

KISALTMALAR

İY	: İnterpolasyon Yöntemi
MFY	: Merkezi Fark Yöntemi
SOİY	: Sabit Ortalama İvme Yöntemi
DİDY	: Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi
İEP	: İdeal Elastoplastik
BL	: Bilineer

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Rekürans formüllerinde kullanılan katsayılar ($\xi < 1$).....	6
Tablo 2.2 t_i ve t_{i+1} zamanındaki yer değiştirme, hız, ivme yanıtları arasındaki ilişki.....	10
Tablo 5.1 Sistemin El Centro (doğu-batı) deprem yer hareketi etkisi altında lineer çözüm teknikleri ile elde edilmiş en büyük ve en küçük yer değiştirme değerleri.....	44
Tablo 5.2 Sistemin El Centro (doğu-batı) ve Erzincan (doğu-batı) deprem yer hareketleri etkileri altında ideal elastoplastik kuvvet-yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak süneklik taleplerinin karşılaştırılması.....	44
Tablo 5.3 İdeal elastoplastik ve bilineer kuvvet-yer değiştirme ilişkilerinin El Centro (doğu-batı) deprem yer hareketi etkisi altında sonuçlarının karşılaştırılması.....	45

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Zaman tanım alanında adım adım integrasyon için $p(t_i)$ grafiği...	3
Şekil 2.2 : Zaman tanım alanında adım adım integrasyon için $u(t_i)$ grafiği....	3
Şekil 2.3 : Yükün doğrusal interpolasyon'unun gösterilmesi.....	4
Şekil 2.4 : Sabit Ortalama İvme ve Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi	9
Şekil 3.1 : Kuvvet-Yer değiştirme İlişkisi, Gerçek ve İdeal Elastoplastik.....	16
Şekil 3.2 : İdeal Elastoplastik Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkisi.....	17
Şekil 3.3 : Bilineer Kuvvet Yer değiştirme İlişkisi	18
Şekil 3.4 : İdeal Elastoplastik Sistem ve Elastik Sistem.....	19
Şekil 4.1 : Tek Serbestlik Dereceli Sistem.....	21
Şekil 4.2 : El-Centro 1940 (Doğu-Batı) için İvme-Zaman Grafiği.....	22
Şekil 4.3 : İnterpolasyona Dayalı Yöntemle Yer Değiştirme-Zaman Grafiği...	23
Şekil 4.4 : Merkezi Farka Dayalı Yöntemle Yer Değiştirme-Zaman Grafiği...	23
Şekil 4.5 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği..	24
Şekil 4.6 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.	24
Şekil 4.7 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Zaman Grafiği.....	25
Şekil 4.8 : DİDY ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	25
Şekil 4.9 : DİDY ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	26
Şekil 4.10 : DİDY ile Kuvvet-Zaman Grafiği.....	26
Şekil 4.11 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	27
Şekil 4.12 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	28
Şekil 4.13 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	28
Şekil 4.14 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Yer Değiştirme Zaman Grafiği.....	29
Şekil 4.15 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	30
Şekil 4.16 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	30
Şekil 4.17 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	31
Şekil 4.18 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	31
Şekil 4.19 : İEP Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	32
Şekil 4.20 : Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	32
Şekil 4.21 : Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	33
Şekil 4.22 : Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği..	34
Şekil 4.23 : Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği...	34

Şekil 4.24 : Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.	35
Şekil 4.25 : Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Kuvvet-Yer değiştirme Grafiği.	36
Şekil 4.26 : Erzincan 1992 (Doğu-Batı) için İvme-Zaman Grafiği.....	36
Şekil 4.27 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği...	37
Şekil 4.28 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği..	37
Şekil 4.29 : Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Zaman Grafiği.....	38
Şekil 4.30 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	39
Şekil 4.31 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	39
Şekil 4.32 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	40
Şekil 4.33 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	40
Şekil 4.34 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği.....	41
Şekil 4.35 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	41
Şekil 4.36 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği.....	42
Şekil 4.37 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme Zaman Grafiği.....	43
Şekil 4.38 : İEP Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Kuvvet-Zaman Grafiği.....	43

SEMBOL LİSTESİ

m	: Rijit Kütle
c	: Sönüm
$f_s(u, \ddot{u})$	: Elastik Olmayan Yay Kuvveti
Δt_i	: Zaman Aralığı
u_i	: Yer değiştirme Yanıtı
$\dot{u}_i$	: Hız Yanıtı
$\ddot{u}_i$	: İvme Yanıtı
$(f_s)_i$	: Elastik Yay Katsayısı
$p(t)$	: Dış Yük
k	: Rijitlik
$\hat{k}$	: Etkili Rijitlik
$\hat{p}$	: Etkili Yük
Δu_i	: Artımsal Yer Değiştirme Yanıtı
$\Delta \dot{u}_i$	: Artımsal Hız Yanıtı
$\Delta \ddot{u}_i$	: Artımsal İvme Yanıtı
γ, β	: Newmark'ın Yönteminde Kullanılan Katsayılar
$\Delta \hat{p}_i$	: Artımsal Etkili Yük
$(k_i)_{kiriş}$	: Kiriş Rijitliği
$(k_i)_t$	: Teğet Rijitliği
u_m	: En Büyük Yer Değiştirme
f_y	: Sistemin Akma Yüğü
u_y	: Akma Yer Değiştirmesi
f_0	: Elastik En Büyük Kuvvet
u_0	: Elastik En Büyük Yer Değiştirme
$\bar{f}_y$	: Normalize Edilmiş Yük Dayanımı
R_y	: Yük Azaltım Katsayısı
μ	: Süneklik Katsayısı
ξ	: Sönüm Oranı
ω_n	: Sönümsüz Sistemin Serbest Titreşim Frekansı
ω_d	: Sönümlü Sistemin Serbest Titreşim Frekansı
T	: Sönümsüz Sistemin Titreşim Periyodu
T_d	: Sönümlü Sistemin Titreşim Periyodu

DEPREM YER HAREKETİ ETKİSİ ALTINDAKİ TEK SERBESTLİK DERECELİ DİNAMİK SİSTEMLERİN SÜNEKLİK TALEBİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, tek serbestlik dereceli lineer ve lineer olmayan sistemlerin deprem yer hareketi etkisi altında vereceği yanıtın belirlenmesinde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri incelenmiştir. Dinamik analizde kullanılan bir çok yöntem olmasına rağmen, temel sayılabilecek hesap yöntemleri bu çalışmada incelenmiştir. Sayısal çözüm yöntemlerinin amacı, yapı sistemlerinin yer değiştirme, hız, ivme yanıtlarının belirlenmesidir. Bu yöntemler sayesinde deprem yer hareketi etkisi altında sistemlere ait elastik ve elastik olmayan yer değiştirme, hız ve ivme spektrum eğrileri elde edilir. Ayrıca sistemlerin deprem yer hareketini hasar görmeden, güvenli bir şekilde, atlatabilmesi için gerekli olan süneklilik katsayısı ve yük azaltım katsayısının belirlenmesi açısından da sayısal çözüm yöntemleri önemlidir.

Tez çalışmasında tek serbestlik dereceli sistemlerin interpolasyon, merkezi farklar, sabit ortalama ivme ve doğrusal ivme değişimi yöntemleri ile lineer çözümü yapılmış, Newmark'ın geliştirdiği lineer olmayan sabit ortalama ivme ve doğrusal ivme değişimi yöntemleri ile ideal elastoplastik ve bilineer kuvvet-yer değiştirme ilişkisi göz önünde tutularak 18 Mayıs 1940'ta meydana gelen El-Centro (doğu-batı) deprem kaydı için FORTRAN 90'da hazırlanan bilgisayar programında lineer olmayan çözüm yapılmıştır. İdeal elastoplastik kuvvet-yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak 18 Mayıs 1940'ta meydana gelen El-Centro (doğu-batı) ve 13 Mart 1992'de meydana gelen Erzincan (doğu-batı) deprem kayıtlarının çözümü yapılan sistemden talep ettikleri süneklilik değerleri karşılaştırılmıştır.

EVALUATION OF DUCTILITY DEMAND OF SINGLE DEGREE OF FREEDOM DYNAMIC SYSTEMS SUBJECTED TO EARTHQUAKE GROUND MOTION

SUMMARY

In this study, numerical solution methods of linear and nonlinear single degree of freedom systems used to determine the response of earthquake ground motion are examined. Although there are many methods used in dynamic analysis, the basic solution methods are examined in this work. The aim of numerical solution methods is to evaluate the response of structural systems' including displacement, velocity and acceleration. By these methods systems that are under the effect of earthquake ground motion, elastic and inelastic displacement, velocity and acceleration spectrum curves are obtained. To determine the ductility factor and yield strength reduction factor, for the systems' under earthquake ground motion the numerical solution methods are important.

In this thesis, numerical solutions of linear single degree of freedom systems are studied by virtue of interpolation of excitation methods, central difference methods, average acceleration and linear acceleration methods. For nonlinear single degree of freedom systems, with nonlinear average acceleration and nonlinear linear acceleration methods developed by Newmark, where elastoplastic and bilinear force-deformation relation is considered, by considering for El-Centro (east-west) earthquake record which occurred in 18 May 1940. Ductility demands are obtained and compared both for 18 May 1940 El-Centro (east-west) and 13 March 1992 Erzincan (east-west) earthquake records considering elastoplastic force-deformation relation of the system considered.

1. GİRİŞ

Son yıllarda meydana gelen büyük hasarlı depremlerden sonra, sismik tasarım prosedürlerindeki değişiklik yapı sistemlerinin tahmin edilebilen sismik performanslarına izin vermesi açısından gereklidir. Performansa dayalı sismik tasarım için analiz, tasarım ve seçilen performans amaçlarının karşılandığına dair güvenilir yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu amaçla, ileri teknikler gelecekteki tasarım prosedürlerinde yerini alacaktır. Yapı sistemlerinin üç boyutlu lineer olmayan sismik analizi bilgisayar programları yardımıyla yapılabilmektedir. Lineer olmayan analizin zorluğu, yapının elastik olmayan özellikleri tam olarak bilinmediği için yapı elemanlarının, özellikle de değişik formlardaki betonarme yapı elemanlarının, matematiksel modellenmesinde karşılaşılan zorluktur. Kuvvet yer değiştirme ilişkisinin modellenmesi yanı sıra, limit veya göçme sınır durumlarının da belirlenmesi gerekir. Ayrıca, gerçek bir lineer olmayan yapı modeli zemin özelliklerini de içermelidir[1-3].

Basitleştirilmiş bir lineer olmayan analiz de statik-itme yöntemidir. Bu yöntemde yapı sistemi monolitik olarak artan yatay yük etkisi altındadır. Yapı elemanları limit veya göçme sınır durumlarına erişinceye kadar ardışık olarak plastikleşir. Artımsal statik analiz yapının taban kesme kuvveti ve en üst katın dönmesi cinsinden global kuvvet yer değiştirme ilişkisi veya kapasite eğrisinin belirlenmesine yarar. Bu yöntemin yetersizliği, sabit yatay yük modelinin sadece yapının bir modu ile ilişkilendirilmesidir [4] .

Bu nedenle kapasite eğrisi, kapasite diyagramına dönüştürülür veya çok serbestlik dereceli bir sistemin kuvvet yer değiştirme ilişkisi basitleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistem olarak ele alınır. ATC-40 teknik şartnamesi, tek serbestlik dereceli sistemlerin lineer olmayan analizini belirlemek için sönümlü lineer sistemlerin yanıtlarına denk yaklaşık yöntemler içerir. Chopra ve Goel [5], ATC-40 yönetmeliğinin bu konudaki çeşitli eksikliklerini belirledi. Bunlar sonuçların yakınsamaması ve yer değiştirmelerin beklenenden önemli ölçüde düşük çıktığıdır.

2. LİNEER SİSTEMLER İÇİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Tek serbestlik dereceli bir sistem için sistemin lineer olmaması veya yer hareketi etkisi altında kalması durumunda hareket denkleminin analitik çözümü elverişli değildir. Bu durumda hareket denkleminin sayısal çözümü önem taşır.

2.1. Zaman Tanım Alanında Adım Adım İntegrasyon Yöntemleri

Başlangıç koşullarına bağlı lineer olmayan sistemler için sayısal olarak çözülecek hareket denklemi,

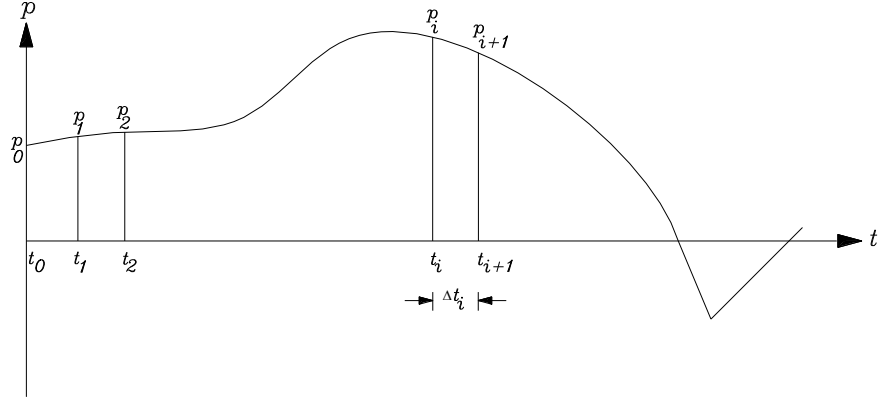
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = p(t) \quad (2.1)$$

Başlangıç koşulları; $u = u(0)$ ve $\dot{u} = \dot{u}(0)$, sisteme etkiyen $p(t)$ kuvveti Şekil 2.1’de görüldüğü üzere her bir Δt_i zaman aralığında verilen $p_i = p(t_i)$, ($i = 0, \dots, N$) kuvvetinden oluşmaktadır. Denklem (2.1)’de m rijit kütle, c sönüm ve $f_s(u, \dot{u})$ elastik olmayan yay kuvvetidir. Zaman aralığı $\Delta t_i = (t_{i+1} - t_i)$ gerekli olmamasına rağmen sabit olarak alınır. Tek serbestlik dereceli sistemin yer değiştirme, hız ve ivme yanıtları t_i zamanındaki u_i , $\dot{u}_i$, $\ddot{u}_i$ olarak elde edilir. Denklem (2.1)’i sağlayan t_i anındaki değerlerin bilindiği farz edilirse,

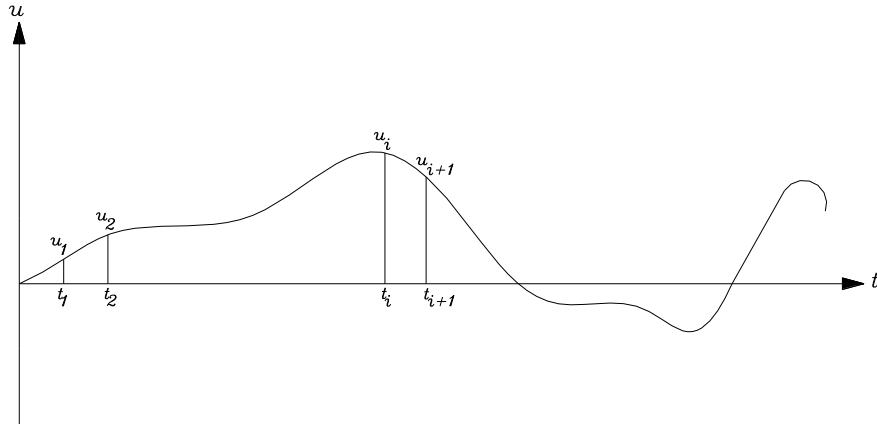
$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + (f_s)_i = p_i \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)’de $(f_s)_i$, t_i zamanındaki elastik yay kuvvetidir. Lineer elastik sistem için $(f_s)_i = ku_i$ dir. Eğer sistem lineer olmasaydı; $(f_s)_i$ yer değiştirme ve hızın önceki değerlerine bağlı olacaktı. t_{i+1} zamanında Denklem (2.1)’i sağlayan sistemin yer değiştirme, hız ve ivme yanıtları u_{i+1} , $\dot{u}_{i+1}$, $\ddot{u}_{i+1}$ elde edilir.

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + (f_s)_{i+1} = p_{i+1} \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 Zaman tanım alanında adım adım integrasyon için örnek $p(t_i)$ grafiği



Şekil 2.2 Zaman tanım alanında adım adım integrasyonla elde edilen $u(t_i)$ grafiği

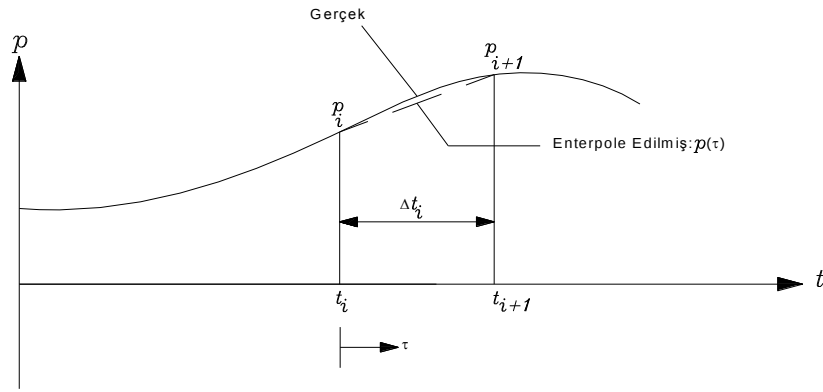
Her bir zamandaki adımlama kesin sonucu vermez. Yöntemlerin sağlaması gereken üç önemli koşul vardır. Bunlar (1) yakınsaklık, zaman aralığı küçüldükçe sayısal çözümün gerçek çözüme yaklaşması, (2) stabilite, sayısal çözümün yuvarlama hatalarına karşı duyarlı olması, (3) kesinlik, sayısal işlemler gerçek çözüme yakın sonuçlar vermelidir [2].

Zaman tanım alanında adım adım integrasyon yöntemlerinden temel sayılabilecek üç önemli yöntem: (1) interpolasyona dayalı metotlar, (2) hız ve ivmenin sonlu farkına dayalı metotlar, (3) ivmenin değişimine dayalı metotlar [2].

2.2. İnterpolasyona Dayalı Yöntemler

Lineer sistemler için geçerli olan bir yöntemdir. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere, her bir Δt_i zaman adımındaki $p(t_i)$ kuvvetinin interpolasyonuna dayanan ve kısa zaman aralıklarında iyi sonuçlar veren bir yöntemdir. Uygulanan kuvvet fonksiyonu $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ zaman aralığında

$$p(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (2.4)$$



Şekil 2.3 Yükün doğrusal interpolasyonunun gösterilmesi

Burada $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ dir. Zaman değişkeni τ sıfırdan Δt_i 'ye kadar değişmektedir.

Çözümü yapılacak denklem,

$$m\ddot{u} + ku = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (2.5)$$

Sistem Denklem (2.5)'de görüldüğü gibi sönümsüz olarak ele alınmıştır. $0 \leq \tau \leq \Delta t_i$ aralığında $u(\tau)$ denklemin çözümü üç kısımdan oluşmaktadır. 1) $\tau = 0$ 'da başlangıç yer değiştirmesi u_i ve hızı $\dot{u}_i$ 'den dolayı serbest titreşim, 2) Sıfır başlangıç koşuluyla

p_i kuvvetinin etkisi, 3) Sıfır başlangıç koşuluyla $\left(\frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \right) \tau$ doğrusal kuvveti etkisi. Bu üç koşul uygulanırsa;

$$u(\tau) = u_i \cos \omega_n \tau + \frac{p_i}{k} (1 - \cos \omega_n \tau) + \frac{\Delta p_i}{k} \left(\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\sin \omega_n \tau}{\omega_n \Delta t_i} \right) \quad (2.6)$$

ve

$$\frac{\dot{u}(\tau)}{\omega_n} = -u_i \sin \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos \omega_n \tau + \frac{p_i}{k} \sin \omega_n \tau + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} (1 - \cos \omega_n \tau) \quad (2.7)$$

Bu denklemler $\tau = \Delta t_i$ 'de hesaplanırsa t_{i+1} zamanındaki yer değiştirme u_{i+1} ve hız $\dot{u}_{i+1}$ yanıtları hesaplanır.

$$u_{i+1} = u_i \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} [\omega_n \Delta t_i - \sin(\omega_n \Delta t_i)] \quad (2.8)$$

$$\frac{\dot{u}_{i+1}}{\omega_n} = -u_i \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos(\omega_n \Delta t_i) + \frac{p_i}{k} \sin(\omega_n \Delta t_i) + \frac{\Delta p_i}{k} \frac{1}{\omega_n \Delta t_i} [1 - \cos(\omega_n \Delta t_i)] \quad (2.9)$$

Denklem (2.8) ve Denklem (2.9)'da $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ ifadesi yerine yazılır ve Denklem (2.8) ve Denklem (2.9) yeniden düzenlenirse rekürans formülleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \quad (2.10)$$

$$\dot{u}_{i+1} = A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \quad (2.11)$$

Bu formüller ayrıca sönümlü sistemlere de uygulanabilir. Kritik altı sönümlü sistemler için A, B, C, D, A', B', C', D' katsayıları hesaplanır. Bu katsayılar sistem dinamik parametrelerine (ω_n, k, ξ) ve zaman aralığı $\Delta t \equiv \Delta t_i$ 'na bağlıdır.

Rekürans formülleri hareket denkleminin kesin çözümünden elde edildiği için kesin çözüme yaklaşık sonuç vermesi Δt 'ye bağlıdır. Bu sayısal yöntem her bir Δt_i zaman

aralığında değer veren fonksiyonlar örneğin, yer hareketi fonksiyonu için iyi sonuçlar vermektedir.

Tablo 2.1 Rekürans Formüllerinde Kullanılan Katsayılar ($\xi < 1$)

$A = e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d \Delta t + \cos \omega_d \Delta t \right)$
$B = e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left(\frac{1}{\omega_d} \sin \omega_d \Delta t \right)$
$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} + e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left[\left(\frac{1-2\xi^2}{\omega_d \Delta t} - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) \sin \omega_d \Delta t - \left(1 + \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} \right) \cos \omega_d \Delta t \right] \right\}$
$D = \frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} + e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left(\frac{2\xi^2-1}{\omega_d \Delta t} \sin \omega_d \Delta t + \frac{2\xi}{\omega_n \Delta t} \cos \omega_d \Delta t \right) \right]$
$A' = -e^{\omega_n \Delta t \xi} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d \Delta t \right)$
$B' = e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left(\cos \omega_d \Delta t - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d \Delta t \right)$
$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} + \frac{\xi}{\Delta t \sqrt{1-\xi^2}} \right) \sin \omega_d \Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos \omega_d \Delta t \right] \right\}$
$D' = \frac{1}{k \Delta t} \left[1 - e^{-\omega_n \Delta t \xi} \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \omega_d \Delta t + \cos \omega_d \Delta t \right) \right]$

2.3. Merkezi Farklar Yöntemi

Bu metot hız ve ivmenin sonlu farklar yaklaşımına dayanmaktadır. Zaman aralığı sabit seçilirse, $\Delta t_i = \Delta t$, t_i zamanındaki hız ve ivme yanıtları;

$$\dot{u}_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad \text{ve} \quad \ddot{u}_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (2.12)$$

Bu ifadeler hareket denklemi Denklem (2.1)'de yerlerine yazılırsa;

$$m \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} + c \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} + ku_i = p_i \quad (2.13)$$

Bu denklemde u_i ve u_{i-1} bilindiğine göre, bunları denklemin sağ tarafına koyarsak;

$$\left[\frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i+1} = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (2.14)$$

veya Denklem (2.14) genel formunda yazılırsa;

$$\hat{k} u_{i+1} = \hat{p}_i \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)'de $\hat{k}$ etkili rijitlik ve $\hat{p}$ etkili yük artırımıdır. Denklem (2.14)'e bakıldığında,

$$\hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t}, \quad \hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (2.16)$$

Bilinmeyen u_{i+1} büyüklüğü ise $u_{i+1} = \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}}$ ile hesaplanır.

t_{i+1} zamanındaki u_{i+1} , hareket denkleminin t_i zamanındaki çözümünden elde edilmiştir. t_{i+1} zamanındaki hareket denklemi kullanılmamıştır. Özellikle, elastik ve sönüm kuvvetleri bilinen yer değiştirmeler u_i , u_{i-1} ve hızlar $\dot{u}_i$, $\dot{u}_{i-1}$ kullanılarak hesaplanmıştır. u_1 'in belirlenebilmesi için u_0 ve u_{-1} değerleri gereklidir. Başlangıç yer değiştirmesi u_0 bilinmektedir. u_{-1} yer değiştirmesinin belirlenebilmesi için Denklem (2.12) 'de $i = 0$ için u_{-1} ;

$$\dot{u}_0 = \frac{u_1 - u_{-1}}{2\Delta t} \quad \text{ve} \quad \ddot{u}_0 = \frac{u_1 - 2u_0 + u_{-1}}{(\Delta t)^2} \quad (2.17)$$

u_1 ilk denklemde çözölüp ikinci denklemde yerine yazılırsa ;

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t(u_0') + \frac{(\Delta t)^2}{2}a_0 \quad (2.18)$$

Başlangıç yer değıştirmesi u_0 ve başlangıç hızı u_0' verilmiştir. Hareket denklemi $mu_0'' + cu_0' + ku_0 = p_0$ yardımıyla $t = (t_0 = 0)$ anında başlangıç ivmesi $a_0 = \frac{p_0 - cu_0' - ku_0}{m}$ elde edilir.

Merkezi Farklar Yönteminde zaman aralığı Δt yeterince küçük seçilmediği zaman anlamsız sonuçlar vermektedir. Stabilite koşulu için gerekli şart; $\frac{\Delta t}{T_n} < \frac{1}{\pi}$ dır.

Merkezi Farklar Yöntemi Hesap Algoritması;

1.0 Başlangıç Koşulları

$$1.1 \quad a_0 = \frac{p_0 - cu_0' - ku_0}{m}.$$

$$1.2 \quad u_{-1} = u_0 - \Delta t(u_0') + \frac{(\Delta t)^2}{2}a_0.$$

$$1.3 \quad \hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t}.$$

$$1.4 \quad a = \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t}.$$

$$1.5 \quad b = k - \frac{2m}{(\Delta t)^2}.$$

2.0 t_i zamanında yapılacak hesaplamalar

$$2.1 \quad \hat{p}_i = p_i - au_{i-1} - bu_i.$$

$$2.2 \quad u_{i+1} = \frac{\hat{p}_i}{\hat{k}}.$$

$$2.3 \quad u_i' = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t}, \quad a_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2}.$$

3.0 Bir sonraki zaman adımında yapılacak hesaplamalar

i yerine $i + 1$ yazılarak 2.1, 2.2, 2.3 adımları için hesaplar tekrarlanır. Deprem yer hareketi için p_i yerine $-m \ddot{g}_i$ yazılarak hesaplar yapılır.

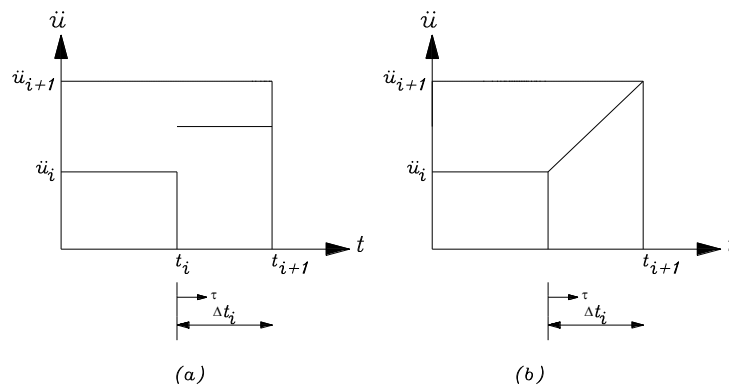
2.4. Newmark'ın Yöntemi

1959 yılında Newmark aşağıdaki denklemlere dayalı bir zaman artım yöntemi geliştirdi. $i + 1$ zamanındaki yer değiştirme ve hız yanıtları için;

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma) \Delta t] \ddot{u}_i + (\Delta t \gamma) \ddot{u}_{i+1} \quad (2.19)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + \left[(0.5 - \beta) (\Delta t)^2 \right] \ddot{u}_i + \left[\beta (\Delta t)^2 \right] \ddot{u}_{i+1} \quad (2.20)$$

β ve γ parametreleri ivmenin zamanla değişimini ifade etmekte ve çözüm metodunun stabilite ve kesinlik koşullarını sağlamaktadır. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ çözüm metodunun sağlaması gereken koşulları yerine getirmesi açısından yeterlidir. Denklem (2.19) ve (2.20) yardımıyla t_i zamanındaki bilinen yer değiştirme u_i , hız $\dot{u}_i$, ivme $\ddot{u}_i$ değerlerinden yararlanılarak t_{i+1} zamanındaki yer değiştirme u_{i+1} , hız $\dot{u}_{i+1}$, ivme $\ddot{u}_{i+1}$ değerleri hesaplanır.



Şekil 2.4 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ve Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi

Tablo 2.2 t_i ve t_{i+1} zamanındaki yer değiştirme, hız, ivme yanıtları arasındaki ilişki

$\ddot{x}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i)$	$\dot{x}(\tau) = \dot{x}_i + \frac{\tau}{\Delta t}(\ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i)$	(2.21)
$x(\tau) = x_i + \frac{\tau}{2}(\dot{x}_{i+1} + \dot{x}_i)$	$x(\tau) = x_i + \dot{x}_i\tau + \frac{\tau^2}{2\Delta t}(\ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i)$	(2.22)
$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i)$	$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i)$	(2.23)
$u(\tau) = u_i + \dot{x}_i\tau + \frac{\tau^2}{4}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i)$	$u(\tau) = u_i + \dot{x}_i\tau + \ddot{x}_i\frac{\tau^2}{2} + \frac{\tau^3}{6\Delta t}(\ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i)$	(2.24)
$u_{i+1} = u_i + \dot{x}_i\Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{4}(\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i)$	$u_{i+1} = u_i + \dot{x}_i\Delta t + (\Delta t)^2\left(\frac{1}{6}\ddot{x}_{i+1} + \frac{1}{3}\ddot{x}_i\right)$	(2.25)

Sabit Ortalama İvme ve Doğrusal İvme Değişimi Yöntemleri için t_{i+1} zamanındaki yer değiştirme u_{i+1} , hız $\dot{x}_{i+1}$ ve ivme $\ddot{x}_{i+1}$ yanıtları ile t_i zamanındaki yer değiştirme u_i , hız $\dot{x}_i$ ve ivme $\ddot{x}_i$ büyüklükleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Denklem (2.21)'de Şekil 2.4 (a) ivmenin zaman aralığındaki değişiminin sabit olması kabulü Sabit Ortalama İvme olarak, Şekil 2.4 (b) ivmenin zaman aralığındaki değişiminin lineer olması kabulü Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi olarak adlandırılır. $\ddot{x}(\tau)$ 'nün integrali ile Denklem (2.22)'de hızın $\dot{x}(\tau)$ 'nün Δt zaman aralığındaki değişimi elde edilmiştir. $\tau = \Delta t$ ifadesi Denklem (2.21)'de yerine yazılırsa t_{i+1} zamanındaki hız $\dot{x}_{i+1}$ Denklem (2.22)'de elde edilmiştir. $\dot{x}(\tau)$ 'nün integrali ile $u(\tau)$ 'nün zaman aralığındaki değişimi Denklem (2.24)'de elde edilmiştir. $\tau = \Delta t$ ifadesi Denklem (2.24)'de yerine yazılırsa t_{i+1} zamanındaki yer değiştirmeyi ifade eden Denklem (2.25) elde edilir. Denklem (2.25) ve Denklem (2.25) karşılaştırılırsa Newmark'ın çözüm yöntemindeki $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ katsayılarının sabit ivme değişimi kabulü ile

elde edilen katsayılarla aynı olduğu görülür. Aynı şekilde $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ katsayılarının ivmenin lineer olarak değişmesi durumunda elde edilen katsayılarla aynı olduğu görülür.

Artımsal yer değiştirme, hız ve ivme yanıtları kullanılarak, $\Delta u_i \equiv u_{i+1} - u_i$, $\Delta \dot{u}_i \equiv \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i$, $\Delta \ddot{u}_i \equiv \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i$, $\Delta p_i \equiv p_{i+1} - p_i$ elde edilir. Artımsal yanıtlar Denklem (2.19)' da yerlerine yazılırsa;

$$\Delta \dot{u}_i = (\Delta t) \ddot{u}_i + (\Delta t \gamma) \Delta \ddot{u}_i \text{ ve } \Delta u_i = (\Delta t) \dot{u}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_i + \beta (\Delta t)^2 \Delta \ddot{u}_i \quad (2.26)$$

İkinci denklem tekrar düzenlenirse;

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{\gamma}{(\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (2.27)$$

Denklem (2.27)' de bulunan $\Delta \ddot{u}_i$ değeri $\Delta \dot{u}_i$ 'de yerine yazılırsa;

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{(\Delta t) \beta} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (2.28)$$

Denklem (2.27) ve Denklem (2.28) kullanılarak artımsal hareket denklemi yazılırsa;

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + k \Delta u_i = \Delta p_i \quad (2.29)$$

Denklem (2.29) genel formunda yazılırsa;

$$\hat{k} \Delta u_i = \Delta \hat{p}_i \quad (2.30)$$

Bu denklemde etkili rijitlik $\hat{k}$;

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \quad (2.31)$$

ve etkili yük artırımını $\hat{p}_i$;

$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + \left(\frac{1}{\beta (\Delta t)} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right) u_i + \left[\frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (2.32)$$

$\hat{k}$ ve $\Delta \hat{p}_i$ sistem parametrelerinden m, k, c elde edildiğinden, γ ve β bilindiğinden, başlangıç hız ve ivme değerleri verildiğinden, artımsal yer değiştirme;

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}} \quad (2.33)$$

Newmark'ın Yöntemi (Lineer Sistemler İçin) Hesap Algoritması;

(1) Sabit Ortalama İvme Yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$)

(2) Lineer İvme Değişimi Yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{6}$)

1.0 Başlangıç koşulları

$$1.1 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c \dot{u}_0 - k u_0}{m}.$$

1.2 Δt 'nin seçilmesi.

$$1.3 \quad \hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m.$$

$$1.4 \quad a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c \text{ ve } b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c.$$

2.0 t_i zamanında yapılacak hesaplamalar

$$2.1 \quad \Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a u_i + b \ddot{u}_i$$

$$2.2 \quad \Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}}.$$

$$2.3 \quad \Delta u_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} u_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$$

$$2.4 \quad \Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \ddot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i$$

$$2.5 \quad u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \quad \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i, \quad \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i.$$

3.0 Bir sonraki zaman adımında yapılacak hesaplamalar

i yerine $i + 1$ yazılarak 2.1, 2.2, 2.3 adımları için hesapların tekrarlanır. Deprem yer hareketi için p_i yerine $-m \ddot{x}_{gi}$ yazılarak hesaplar yapılır.

Newmark'ın yönteminde stabilite koşulu;

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \quad (2.34)$$

$\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ için bu koşul; $\frac{\Delta t}{T_n} < \infty$ olmaktadır. Bu nedenle Sabit Ortalama İvme

Yöntemi her Δt için stabildir. Doğrusal İvme Değişimi Yönteminde ise bu koşul;

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq 0.551 \text{ olmaktadır [2].}$$

3. LİNEER OLMAYAN SİSTEMLER İÇİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Lineer elastik sınırın ötesinde bir sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi analitik çözüm yolları ile pek uygun değildir. Bu nedenle sayısal çözüm yöntemleri lineer olmayan sistemler için önemlidir.

3.1. Merkezi Farklar Yöntemi

Lineer hesap kısmında açıklanan Merkezi Farklar Yöntemi kolaylıkla lineer olmayan sistemlere de uygulanabilir. Etkili rijitlik $\hat{k}$ ve etkili yük $\hat{p}_i$;

$$\hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \text{ ve } \hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - \left[k - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] u_i \quad (3.1)$$

Lineer olmayan çözüm yönteminde ise etkili rijitlik değişmemekte fakat etkili yük artırımı;

$$\hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} - (f_s)_i + \frac{2m}{(\Delta t)^2} u_i \quad (3.2)$$

$(f_s)_i$, t_i zamanındaki sistem yanıtlarına bağlı olduğu için ve t_{i+1} zamanındaki yanıtlardan bağımsız olduğu için bu yöntem en kolay uygulanabilen yöntemdir. Bu yöntemden daha etkili yöntemler olduğundan uygulama da pek kullanılmaz.

3.2. Newmark'ın Yöntemi

Newmark'ın lineer sistemler için geliştirdiği çözüm yöntemi lineer olmayan sistemlere de genişletilebilir. Her ne kadar Merkezi Farklar Yöntemi kadar kolay bir şekilde genişletilemese de Newmark'ın lineer olmayan sistemler için geliştirdiği yöntem kesinliği açısından çok önemlidir. Artımsal denge denklemi;

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + (f_s)_i = \Delta p_i \quad (3.3)$$

Artımsal yay kuvveti ise; $(\Delta f_s)_i \approx (k_i)_{kiriş} \Delta u_i$ dır. Burada $(k_i)_{kiriş}$ giriş rijitliğidir. u_{i+1} bilinmediğinden dolayı $(k_i)_{kiriş}$ belirlenemez. Bu yüzden küçük bir Δt zaman aralığında $(k_i)_{kiriş}$ ' in $(k_i)_t$ ' ye yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilirse;

$$(\Delta f_s)_i \approx (k_i)_t \Delta u_i \quad (3.4)$$

Burada $(k_i)_t$ teğet rijitliğidir. Alt indis t düşürülür ve Denklem (3.4), Denklem (3.3)' de yerine yazılırsa;

$$m \Delta \ddot{u}_i + c \Delta \dot{u}_i + k_i \Delta u_i = \Delta p_i \quad (3.5)$$

Bu denklemle, Newmark'ın lineer sistemlerde kullandığı denklem aynıdır. Bu nedenle Newmark'ın daha önceden lineer sistemler için kullandığı yöntem lineer olmayan sistemler içinde kullanılabilir. Her zaman adımı t_i 'nin başlangıcında hesaplanacak k_i 'nin lineer sistemlerde k yerine yazılması yeterli olacaktır.

Newmark'ın Yöntemi (Lineer Olmayan Sistemler için) Hesap Algoritması;

$$(1) \text{ Sabit Ortalama İvme Yöntemi } (\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4})$$

$$(2) \text{ Lineer İvme Değişimi Yöntemi } (\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6})$$

1.0 Başlangıç koşulları

$$1.1 \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c \dot{u}_0 - (f_s)_0}{m}.$$

1.2 Δt 'nin seçilmesi.

$$1.3 a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c; \text{ ve } b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c.$$

2.0 t_i zamanında yapılacak hesaplamalar

$$2.1 \Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a \ddot{u}_i + b \dot{\ddot{u}}_i$$

2.2 Teğet rijitliğinin belirlenmesi k_i .

$$2.3 \quad \hat{k}_i = k_i + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} m.$$

2.4 Δu_i 'nin hesaplanması.

$$2.5 \quad \Delta u_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} u_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$$

$$2.6 \quad \Delta u_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} u_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i$$

$$2.7 \quad u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \quad \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i, \quad \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i$$

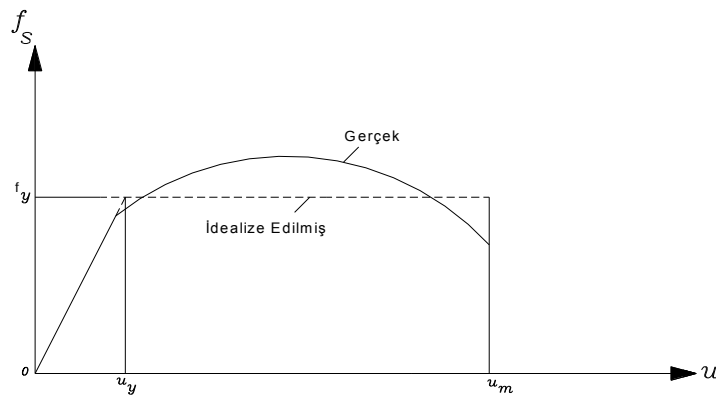
3.0 Bir sonraki zaman adımında yapılacak hesaplamalar

i yerine $i + 1$ yazılarak 2.1, 2.2, 2.3 adımları için hesapların tekrarlanır. Deprem yer hareketi için p_i yerine $-m \ddot{u}_{g_i}$ yazılarak hesaplar yapılır.

3.3. Lineer Olmayan Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkileri

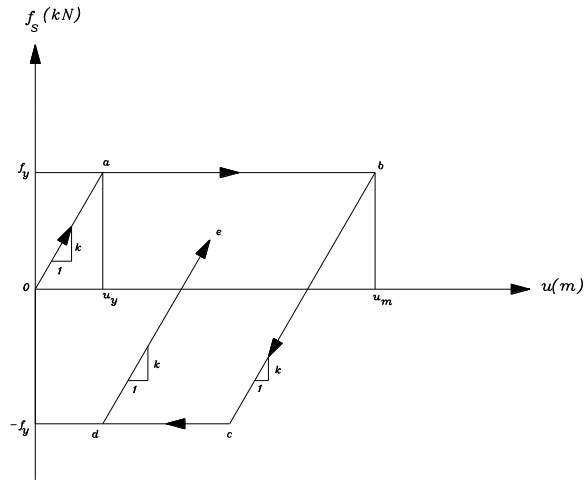
3.3.1. İdeal Elastoplastik Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkisi

Kuvvet yer değiştirme ilişkisinin başlangıç yüklemesi boyunca Şekil 3.1'deki gibi olduğu düşünülürse bu eğri ideal elastoplastik kuvvet yer değiştirme eğrisi olarak idealleştirilebilir [2,6].



Şekil 3.1 Kuvvet-Yer değiştirme İlişkisi, Gerçek ve İdeal Elastoplastik

Gerçek ve ideal elastoplastik kuvvet yer değiştirme eğrileri altında kalan alanın seçilen en büyük yer değiştirme u_m 'de eşit olduğu görülür. İdeal elastoplastik kuvvet yer değiştirme ilişkisi için başlangıç yüklemesinde sistem kuvvet f_y 'yi aşmadığı sürece k rijitliği ile lineer elastiktir. Kuvvet f_y değerine ulaştınca sistem akmaya başlar. Burada f_y akma kuvvetidir. Kuvvetin akmaya başladığı noktadaki yer değiştirme ise u_y dir. Burada u_y akma yer değiştirmesidir. İdeal elastoplastik sistemler için akma sabit f_y kuvvetinde başlar.



Şekil 3.2 İdeal Elastoplastik Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkisi

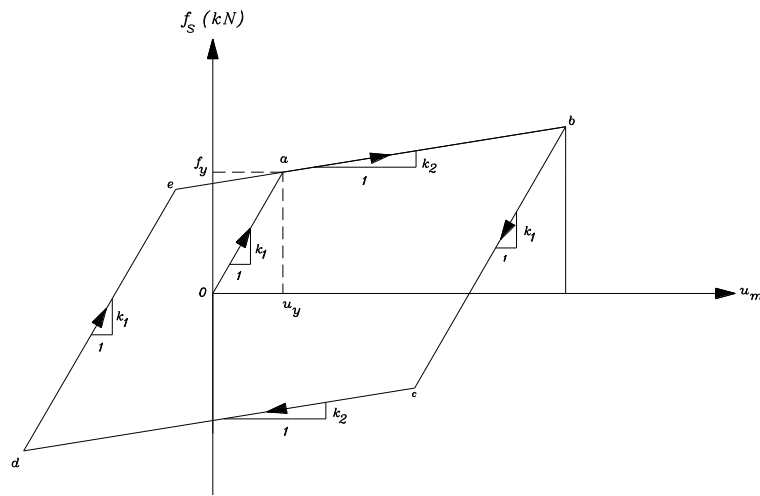
Şekil 3.2.'de ideal elastoplastik bir sistem için yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme devirleri görülmektedir. Akma kuvveti her iki yöndeki yer değiştirme için aynıdır. Boşaltma devri u_m en büyük yer değiştirmesinden (b) noktasından, başlangıçtaki elastik kısma paralel olarak gerçekleşir. Benzer olarak, yeniden yükleme devri de elastik kısma paralel olarak (d) noktasından gerçekleşir. İdeal elastoplastik kuvvet yer değiştirme ilişkisi için Şekil 3.2'de görülen (b) ve (d) noktaları sistemin hareketinin hızına $\dot{u}$ 'ye bağlıdır. Hızın sıfırdan küçük olduğu ($\dot{u} < 0$) (b) noktası boşaltma ve sıfırdan büyük olduğu ($\dot{u} > 0$) (d) noktası yeniden yükleme noktasıdır [2,6].

3.3.2. Bilineer Kuvvet Yerdeğiştirme İlişkisi

Bilineer kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi için Şekil 3.3'te sistemin döngüsü gösterilmiştir. İdeal elastoplastik kuvvet yerdeğiştirme ilişkisinden farklı olarak

sistemin akmaya ulaştığı f_y kuvvetinden sonra sistem rijitliği sıfır olmayıp ($k \neq 0$), $k_2 = \alpha k_1$ gibi bir rijitlikle sistem yükleme devam eder.

Şekil 3.3.'de bilineer bir sistem için yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme devirleri görülmektedir. Akma kuvveti her iki yöndeki yer değiştirme için aynı olmayıp, sistem farklı yerdeğiştirme noktalarından akar. Sistem k_1 rijitliği ile elastik olarak yüklemeye başlayıp, kuvvet akma kuvveti f_y 'ye ulaştıktan sonra k_2 rijitliği ile yüklemeye devam eder.



Şekil 3.3 Bilineer Kuvvet Yer değiştirme İlişkisi

Boşaltma devri u_m en büyük yer değiştirmesinden (b) noktasından, başlangıçtaki elastik kısma paralel olarak gerçekleşir. Benzer olarak, negatif yönde yeniden yükleme devri de a-b kısma paralel olarak (c) noktasından gerçekleşir. Negatif yönde boşaltma devri ise (d) noktasından başlangıçtaki elastik kısma paralel olarak gerçekleşir. Bilineer kuvvet yer değiştirme ilişkisi için, ideal elastoplastik kuvvet yer değiştirme ilişkisinde olduğu gibi, Şekil 2.3'de görülen (b) ve (d) noktaları sistemin hareketinin hızına $\dot{u}$ 'ye bağlıdır. Hızın sıfırdan küçük olduğu ($\dot{u} < 0$) (b) noktası ve sıfırdan büyük olduğu ($\dot{u} > 0$) (d) noktası hareketin yönünün değiştiği noktalardır.

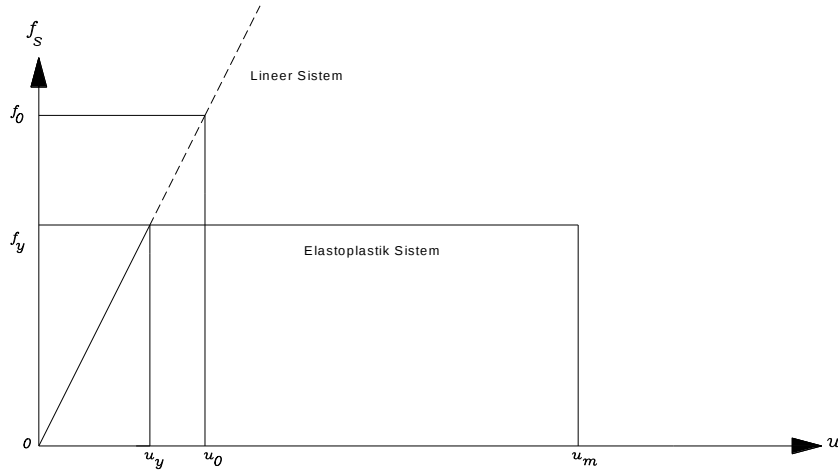
3.4. Yük Azaltım ve Süneklik Katsayıları

İdeal elastoplastik sistemin deprem yer hareketi etkisi altında vereceği en büyük yerdeğiştirmenin, sistemin elastik olması durumunda vereceği en büyük yerdeğiştirme

ile karşılaştırılması istenir. Her iki durumda da sistem aynı kütle m ve sönüm oranına ξ sahiptir. Başlangıç yüklemesi için elastik ve ideal elastoplastik sistemlerin rijitliği aynıdır.

Şekil 3.4'te görülen f_0 ve u_0 elastik sisteme ait en büyük kuvvet ve yer değiştirmedir. İdeal elastoplastik sisteme ait normalize edilmiş yük dayanımı;

$$\bar{f}_y = \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} \quad (3.6)$$



Şekil 3.4 İdeal Elastoplastik Sistem ve Elastik Sistem

Eğer $\bar{f}_y = 1$ ise sistem elastiktir. $\bar{f}_y < 1$ ise, sistem elastik sınırın ötesinde elastik olmayan bölgede yer değiştirme yapacaktır. f_y ile f_0 arasındaki ilişki yük azaltım katsayısı R_y ile ilişkilendirilir.

$$R_y = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad (3.7)$$

Açıkça, R_y $\bar{f}_y$ 'in tersidir. Elastik sistemler için $R_y = 1$ dir. Elastik olmayan sistemler için $R_y > 1$ dir. Deprem yer hareketi etkisi altında, ideal elastoplastik sistemin en büyük yerdeğiştirmesi u_m dir. u_m akma yerdeğiştirmesi u_y 'ye göre normalize edilirse;

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (3.8)$$

Bu oran süneklik katsayısı olarak isimlendirilir. Elastik olmayan sistemler için bu katsayı $\mu > 1$ dir. Elastik ve elastik olmayan sistemlerin en büyük yer değiştirmeleri u_m ve u_0 arasındaki bağıntı;

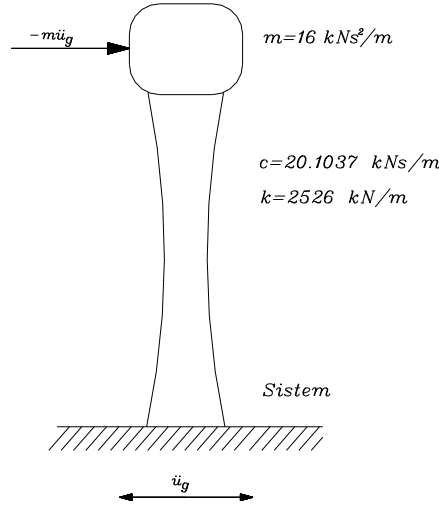
$$\frac{u_m}{u_0} = \mu \bar{f}_y = \frac{\mu}{R_y} \quad (3.9)$$

4. TEK SERBESTLİK DERECELİ BİR SİSTEMİN LİNEER VE LİNEER OLMAYAN ANALİZİ

Şekil 4.1’de görülen tek serbestlik dereceli sistemin El-Centro (doğu-batı) 18 Mayıs 1940 deprem yer hareketi etkisi altında sayısal çözüm yöntemleri yardımıyla lineer ve lineer olmayan analizleri yapılmıştır.

Sisteme ait parametreler; $m = 16 \left(\frac{\text{kNs}^2}{\text{m}} \right)$, $k = 2526 \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right)$, $\xi = 0.05$,

$T = 0.5 \text{ (s)}$, $\omega_n = 12.5664, \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$, $c = 20.1037 \left(\frac{\text{kNs}}{\text{m}} \right)$ $\omega_d = 12.5507 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$ dır.



Şekil 4.1 Tek Serbestlik Dereceli Sistem

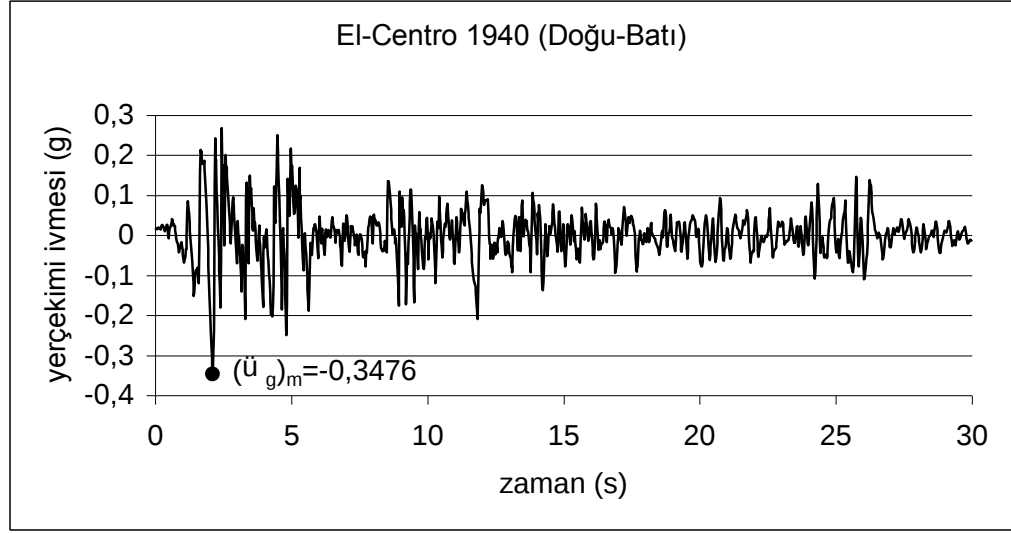
Burada;

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T}, \quad c = 2\xi m \omega_n, \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.1)$$

$\xi = \frac{c}{c_{cr}}$, sönüm oranı, c sönüm, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ sönümsüz sistemin serbest titreşim

frekansı, ω_d sönümlü sistemin serbest titreşim frekansı, T sönümsüz sistemin titreşim periyodu, $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$ ise sönümlü sistemin titreşim periyodudur [8].

18 Mayıs 1940'ta meydana gelen El-Centro (doğu-batı) deprem kaydı için ivme izi grafiğinde en büyük ivme $t = 2.12s$ 'de meydana gelmektedir.



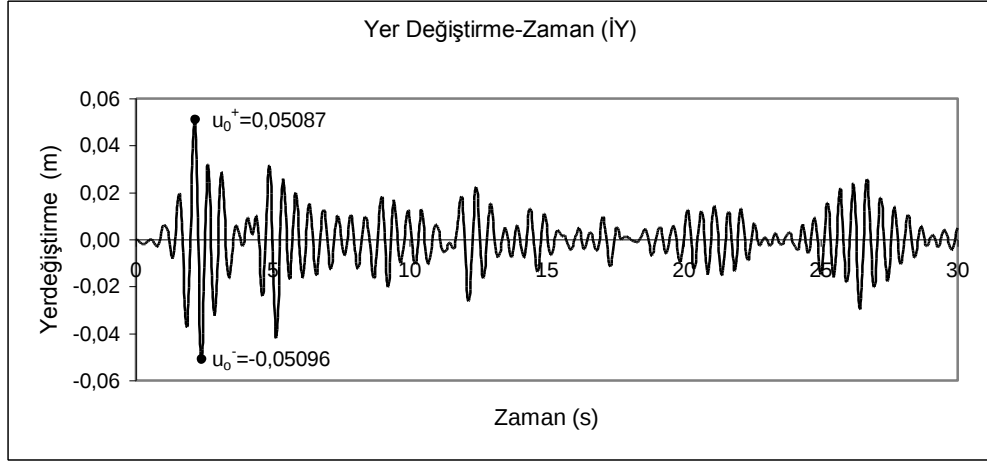
Şekil 4.2 El-Centro 1940 (Doğu-Batı) için İvme-Zaman Grafiği

4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin El-Centro Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Analizi

Şekil 4.1'de verilen sistemin interpolasyon, merkezi farklar ve Newmark'ın lineer sistemler için geliştirdiği Sabit Ortalama İvme, Doğrusal İvme Değişimi Yöntemleri ile çözümleri Fortran 90'da hazırlanan programlar yardımıyla yapılmıştır.

4.1.1. İnterpolasyona Dayalı Yöntemle Çözüm

Rekürans formüllerinde kullanılan katsayılar Tablo 2.1 yardımıyla; $A = 0.96884444$, $A' = -3.08618504$, $B = 0.01954350$, $B' = 0.94428536$, $C = 0.00000821$, $C' = 0.00060507$, $D = 0.00000413$, $D' = 0.00061670$ olarak elde edilmiştir. Buna göre yer değiştirme zaman grafiği;

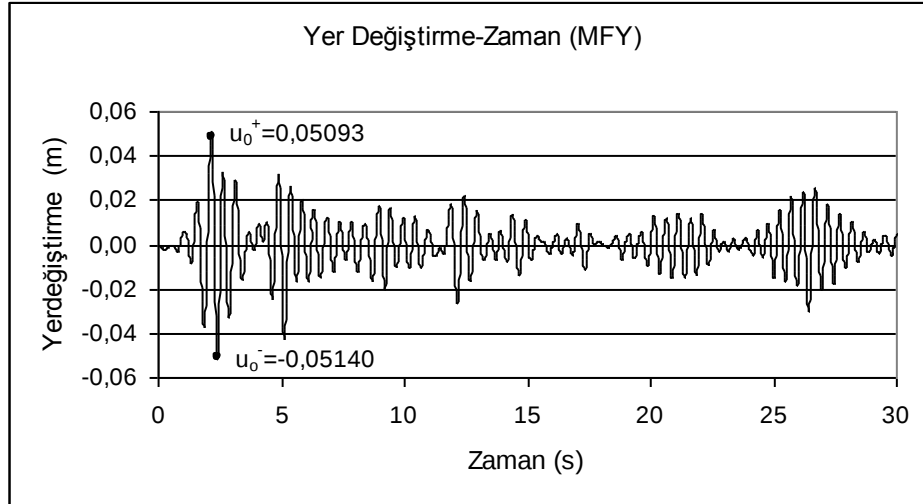


Şekil 4.3 İnterpolasyona Dayalı Yöntemle Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.3'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.16s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.40s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_0^+ = 0.05087m$, negatif yönde $u_0^- = -0.05096m$ dır.

4.1.2. Merkezi Farka Dayalı Yöntemle Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistemin Merkezi Farka Dayalı Yöntem ile lineer hesabı yapılmıştır. Buna göre yer değiştirme zaman grafiği;



Şekil 4.4 Merkezi Farka Dayalı Yöntemle Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

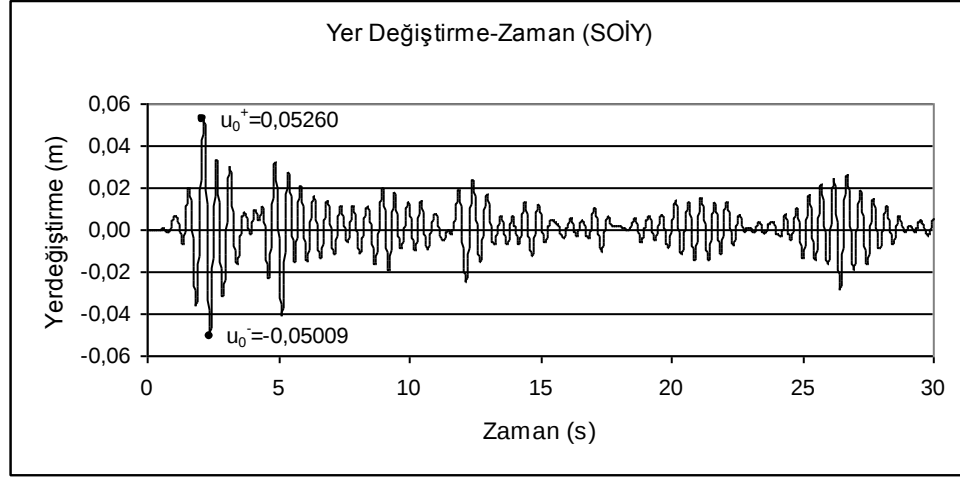
Şekil 4.4'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.16s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.40s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_0^+ = 0.05093m$, negatif yönde $u_0^- = -0.05140m$ dır.

4.1.3. Newmark'ın Yöntemleri İle Çözüm

4.1.3.1.Sabit Ortalama İvme Yöntemi İle Çözüm

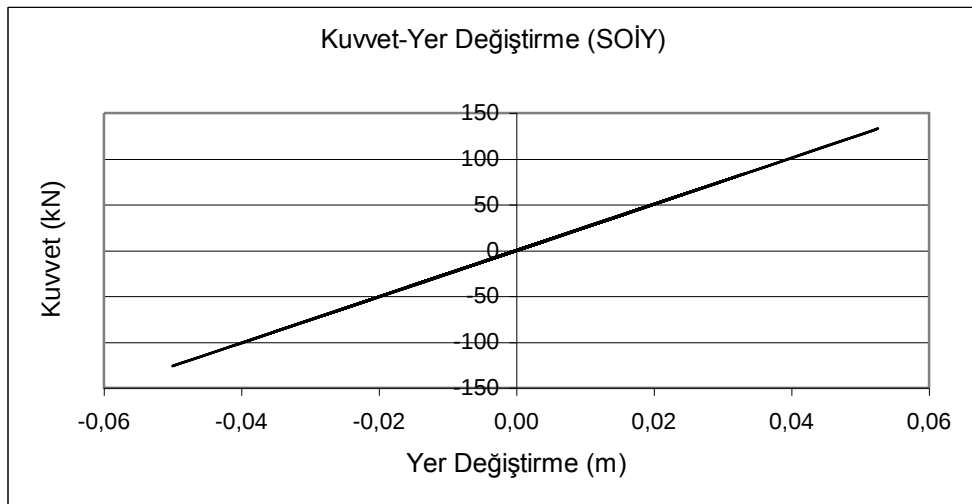
Verilen tek serbestlik dereceli sistem Sabit Ortalama İvme Yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$)

ile çözülmüştür. Buna göre yer değiştirme zaman grafiği;



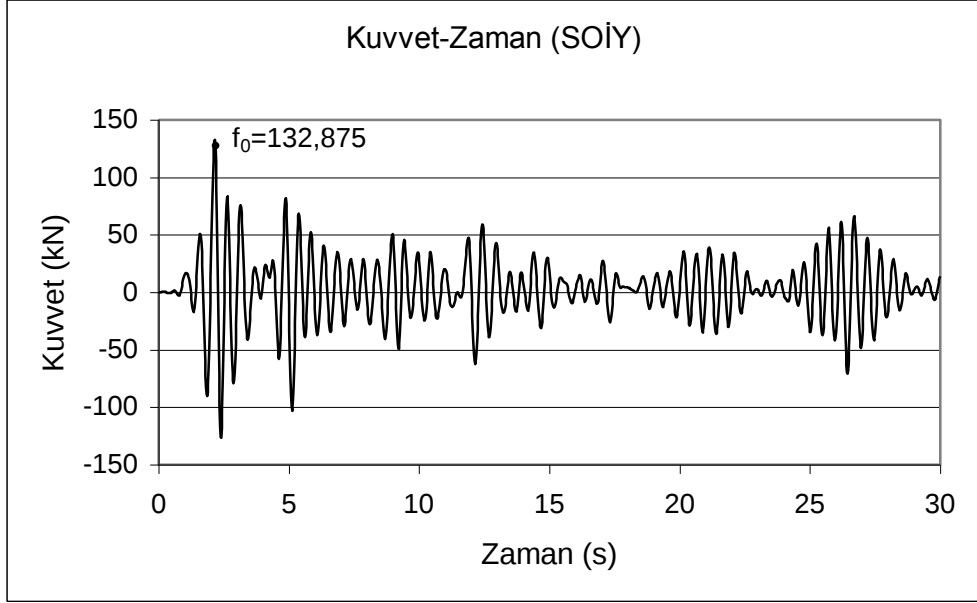
Şekil 4.5 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.5'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.16s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.40s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_0^+ = 0.05260m$, negatif yönde $u_0^- = -0.05009m$ dır.



Şekil 4.6 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Şekil 4.7'e göre elastik en büyük kuvvet $f_0 = ku_0$ dır ve en büyük değeri $t = 2.16s$ 'de $f_0 = 132.875kN$ dır.

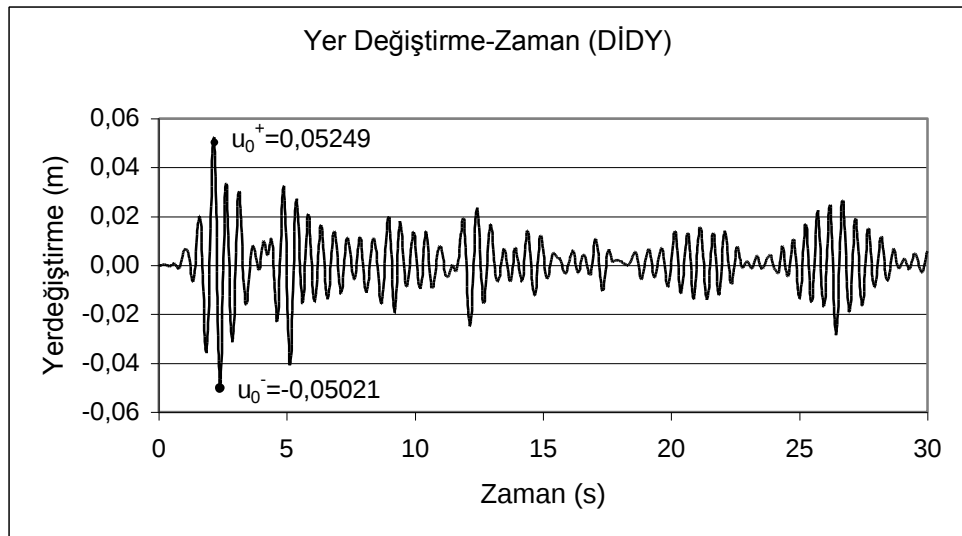


Şekil 4.7 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Zaman Grafiği

4.1.3.2.Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi İle Çözüm

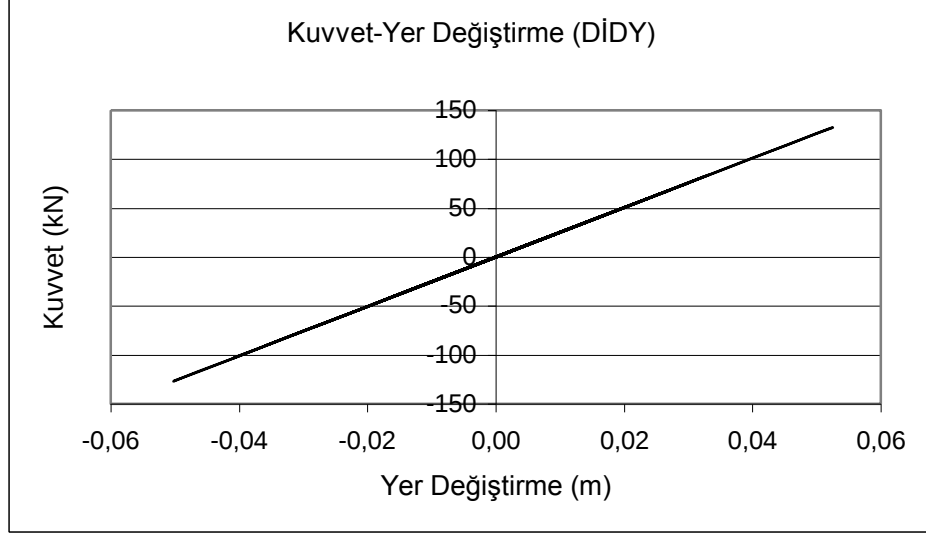
Verilen tek serbestlik dereceli sistem Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi

$(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6})$ ile çözülmüştür.

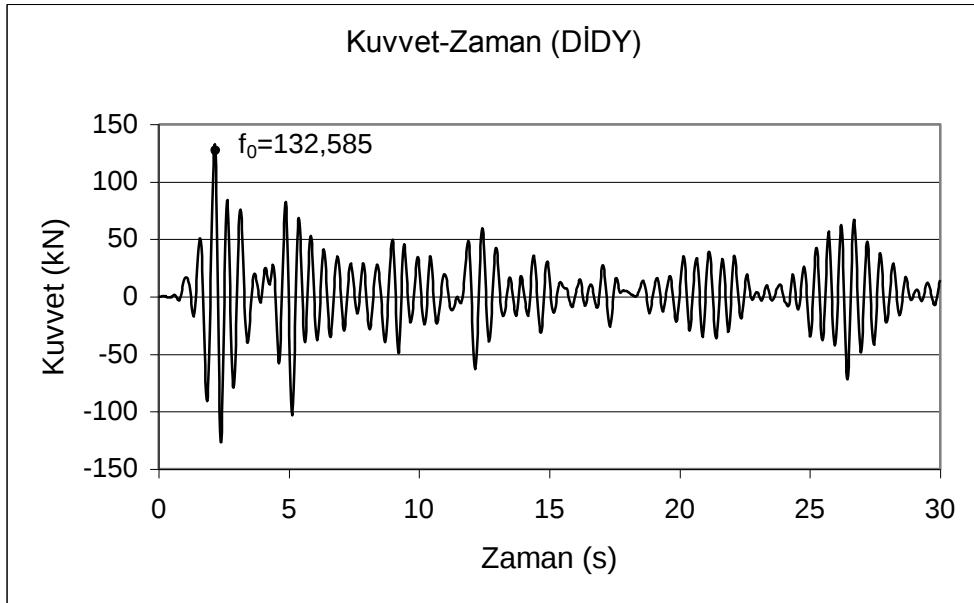


Şekil 4.8 Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.8'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.16s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.40s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_0^+ = 0.05249m$, negatif yönde $u_0^- = -0.05021m$ dır.



Şekil 4.9 Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği



Şekil 4.10 Doğrusal İvme Değişimi Yöntemi ile Kuvvet-Zaman Grafiği

Şekil 4.10'a göre elastik en büyük kuvvet $f_0 = ku_0$ dır ve en büyük değeri $t = 2.16s$ 'de $f_0 = 132.585kN$ dır.

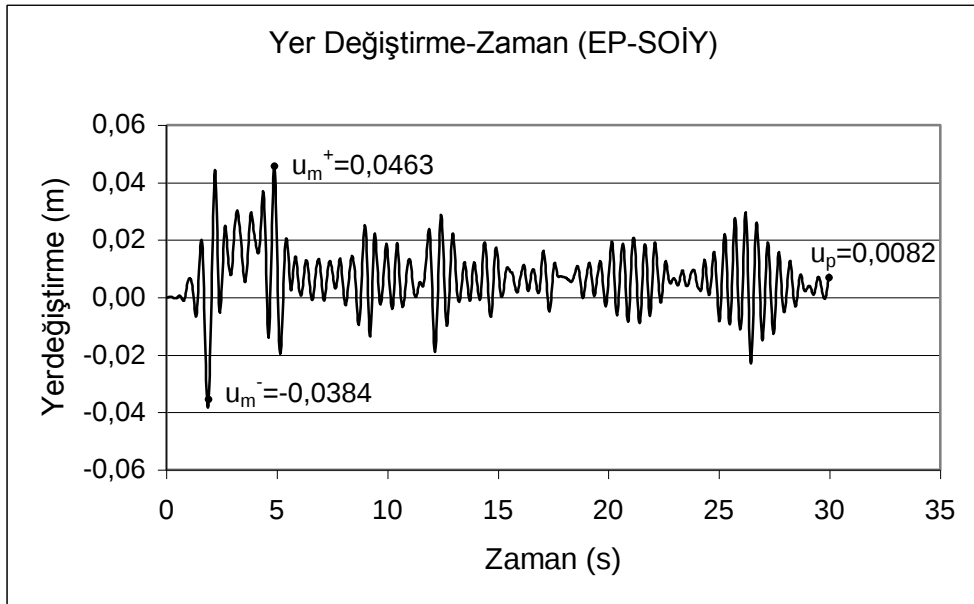
4.2. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin El-Centro Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Olmayan Analizi

Verilen tek serbestlik dereceli sistem sabit ortalama ivme yöntemiyle ideal elastoplastik ve bilinear kuvvet yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak Fortran 90'da hazırlanan program yardımıyla çözülmüştür.

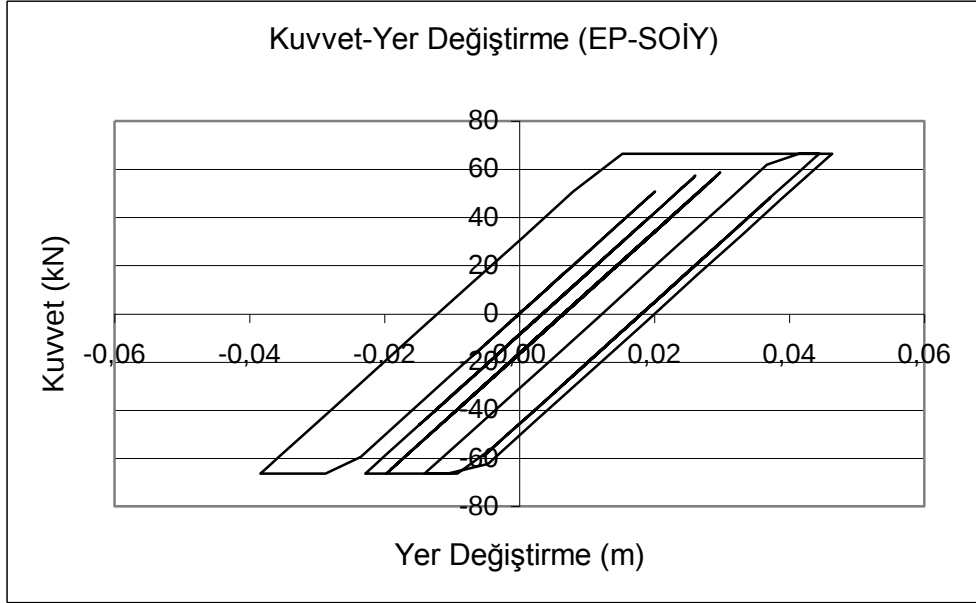
4.2.1. İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 66.438kN$ dır.

Şekil 4.11'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 4.88s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.88s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0463m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0384m$ dır. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0082m$ dır.



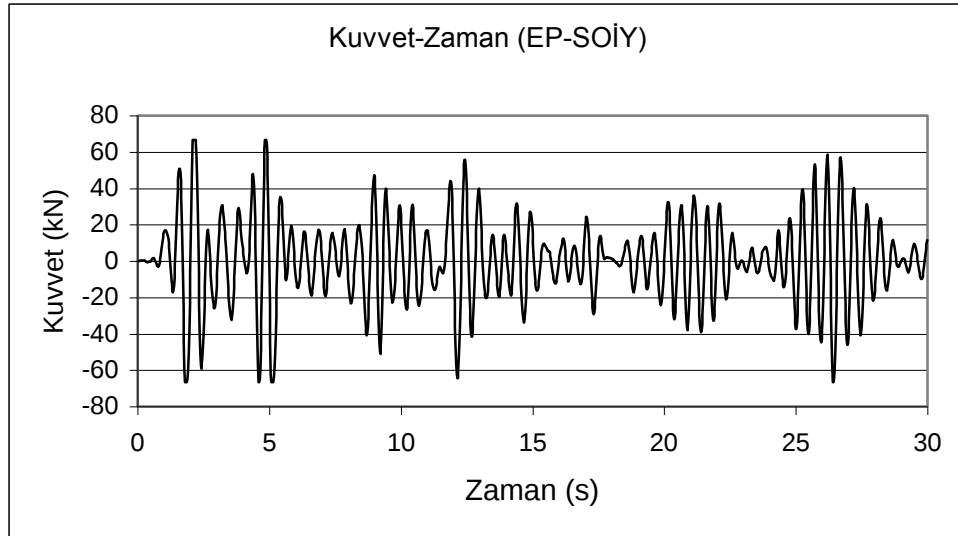
Şekil 4.11 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



Şekil 4.12 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değişirmesi u_y ,

$$u_y = \frac{f_y}{k} = .0263 m \text{ dır. Süneklik Katsayısı } \mu ; \mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0463}{0.0263} = 1.76 \text{ dır.}$$

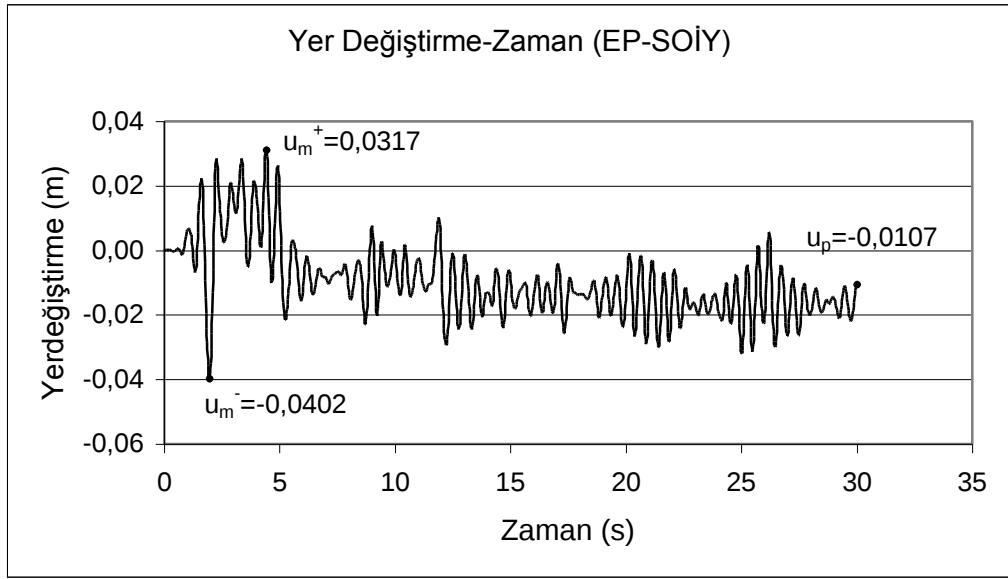


Şekil 4.13 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Zaman Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplam} = 0.36s$ dır.

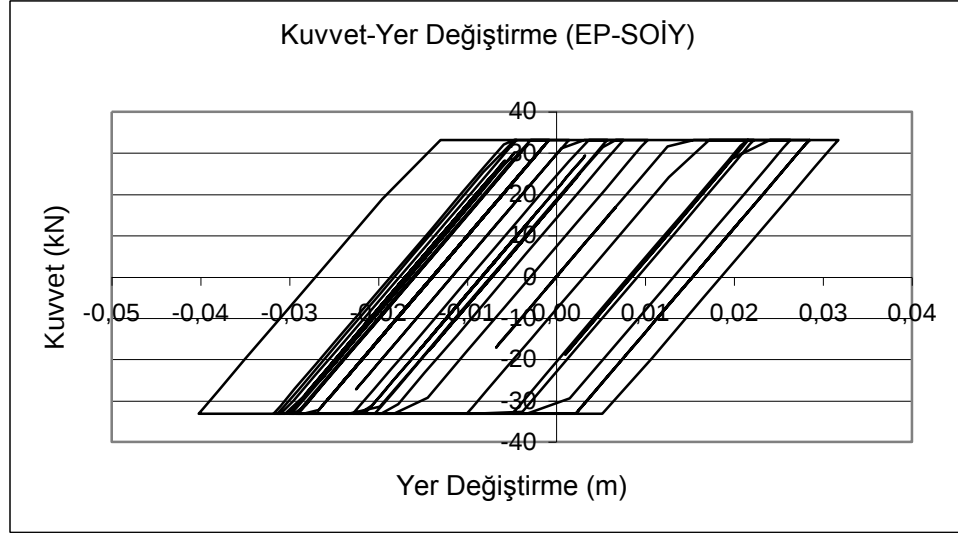
4.2.2. İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir.



Şekil 4.14 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

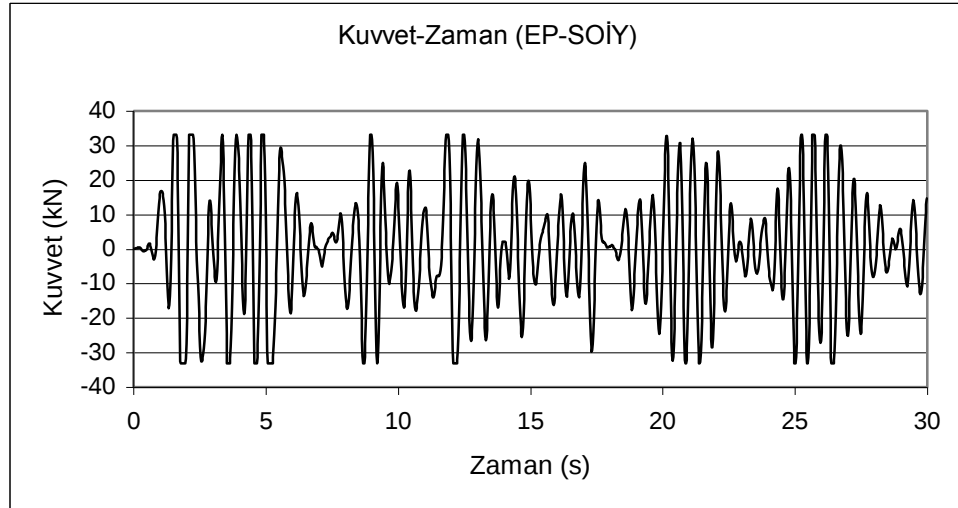
Buna göre $f_y = 33.219kN$ dır. Şekil 4.14'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 4.42s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.96s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0317m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0402m$ dır. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0107m$ dır.



Şekil 4.15 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değişirmesi u_y ,

$$u_y = \frac{f_y}{k} = .0132 m \text{ dır.}$$



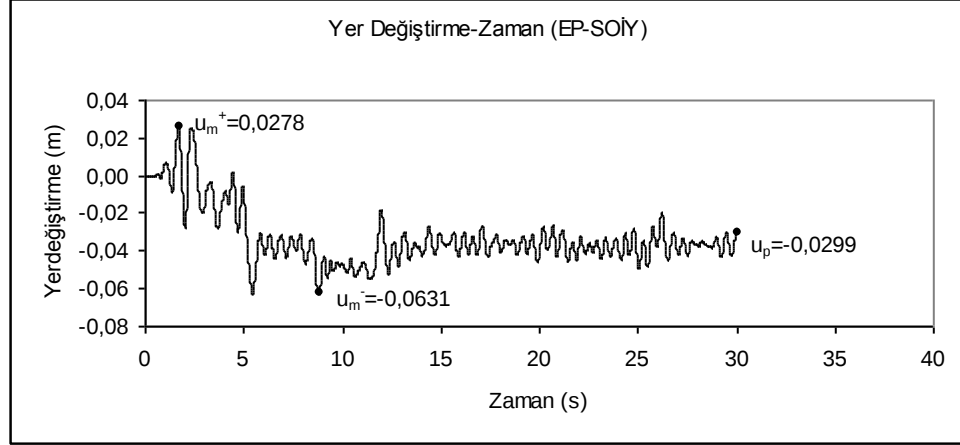
Şekil 4.16 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği

Süneklik Katsayısı μ ; $\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0402}{0.0132} = 3.05$ dır. Verilen tek serbestlik dereceli

sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplamlam} = 1.6 s$ dır.

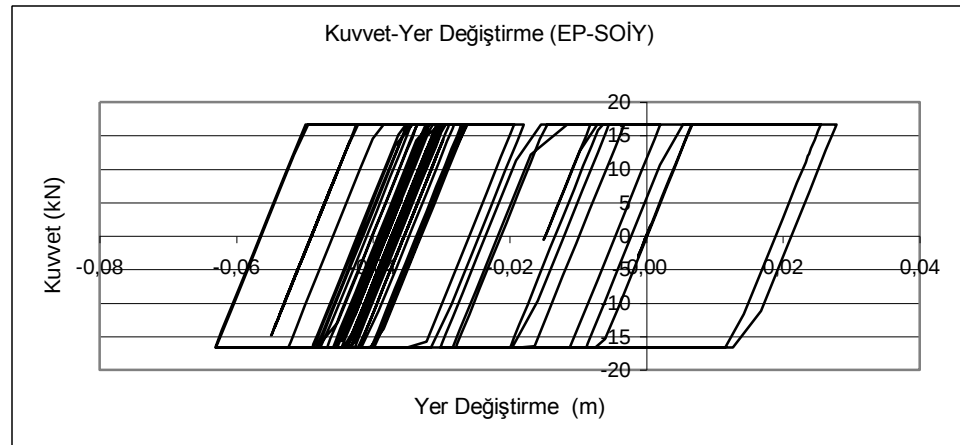
4.2.3. İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875 (kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 16.609 kN$ dir.



Şekil 4.17 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

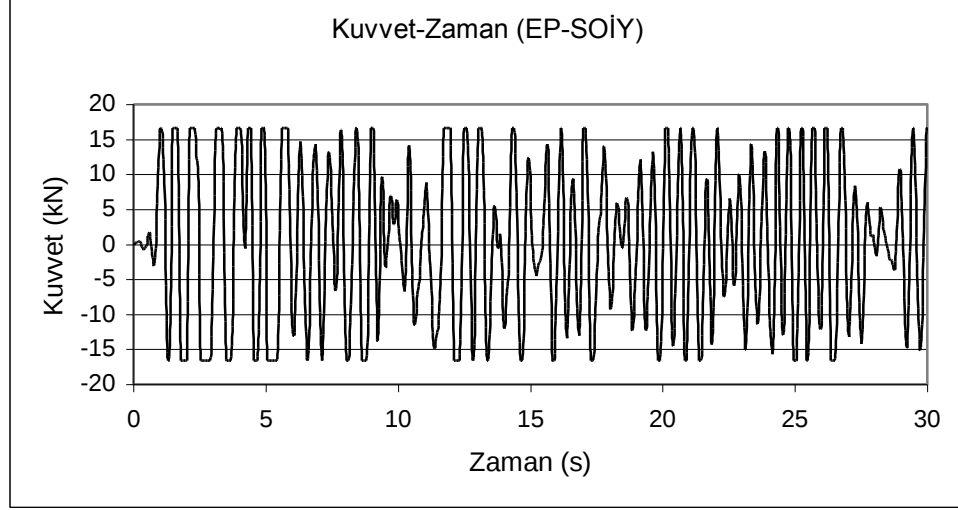
Şekil 4.17'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.66 s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 8.80 s$ 'de meydana gelmektedir.



Şekil 4.18 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0278m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0631m$ dir.

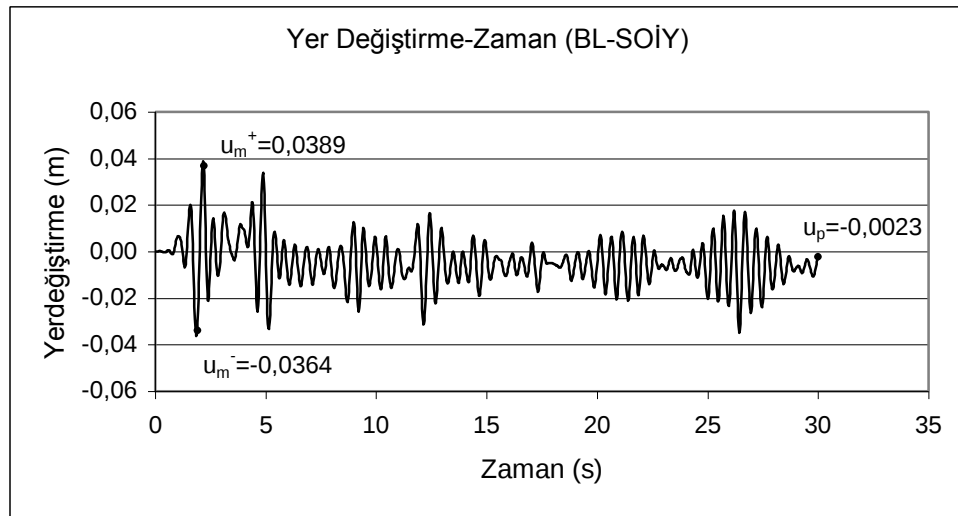
Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = -0.0299m$ dır. Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y , $u_y = \frac{f_y}{k} = .0066m$ dır.



Şekil 4.19 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Kuvvet-Zaman Grafiği

Süneklik Katsayısı μ ; $\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0631}{0.0066} = 9.56$ dır. Verilen tek serbestlik dereceli sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplamlam} = 4.88s$ dır.

4.2.4. Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) İçin Çözüm



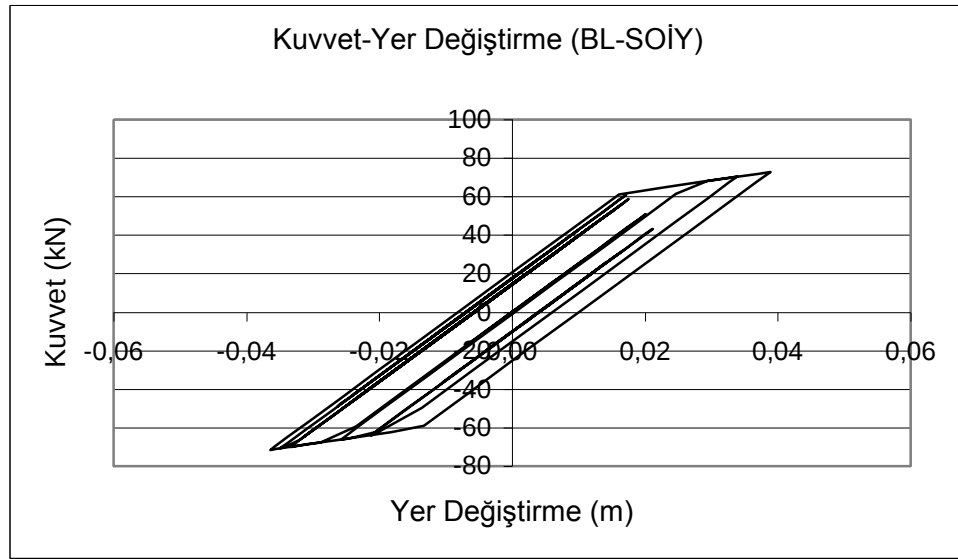
Şekil 4.20 Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 66.438kN$ dir. $\alpha = 0.2$ alınarak, $k_2 = 505.2 \left(\frac{kN}{m} \right)$ olarak alınmıştır.

Şekil 4.20'ye göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.18sn$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.86sn$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0389m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0364m$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0023m$ dir.

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y ,

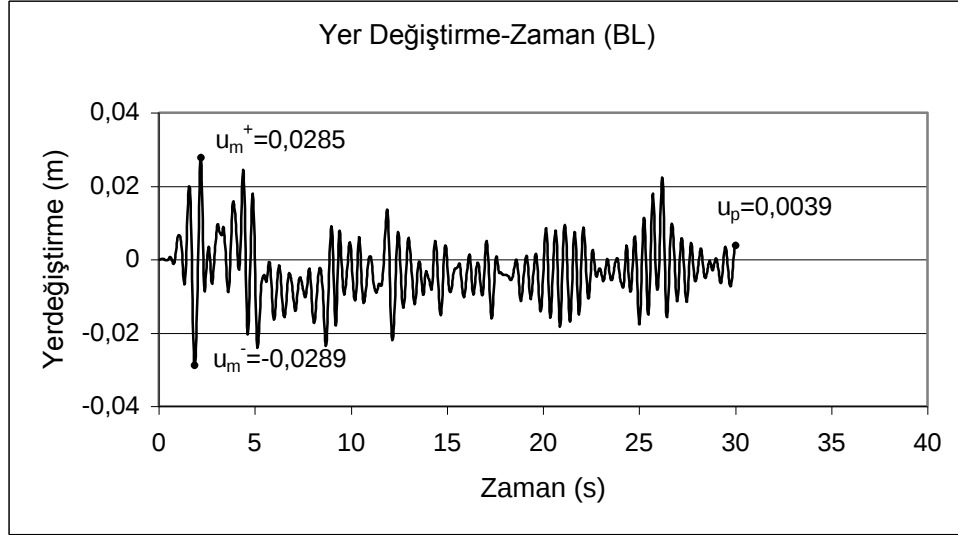
$$u_y = \frac{f_y}{k} = .0263m \text{ dir. Süneklik Katsayısı } \mu; \mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0389}{0.0263} = 1.48 \text{ dir.}$$



Şekil 4.21 Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

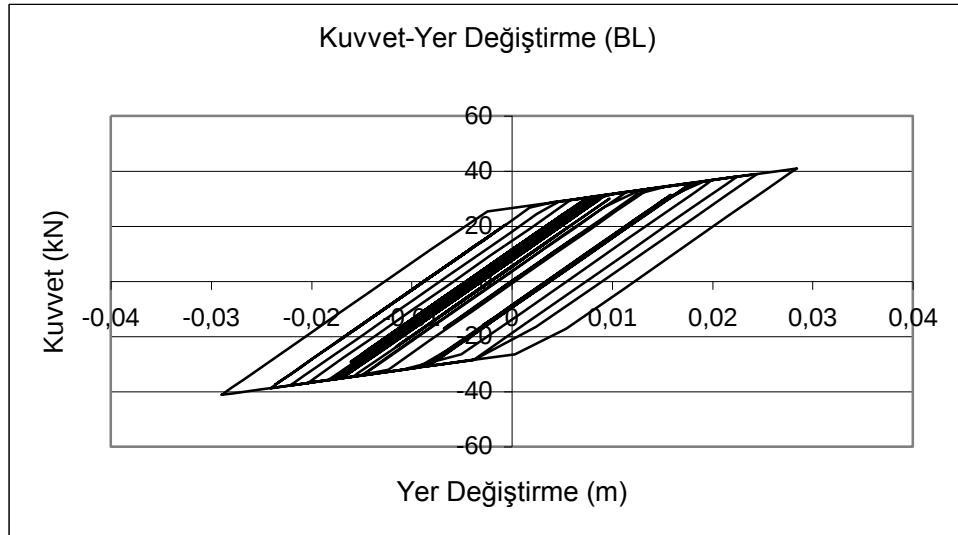
4.2.5. Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 33.219kN$ dir. $\alpha = 0.2$ alınarak, $k_2 = 505.2 \left(\frac{kN}{m} \right)$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.22 Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.22'ye göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.18s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.86s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0285m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0289m$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0039m$ dir.



Şekil 4.23 Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y ,

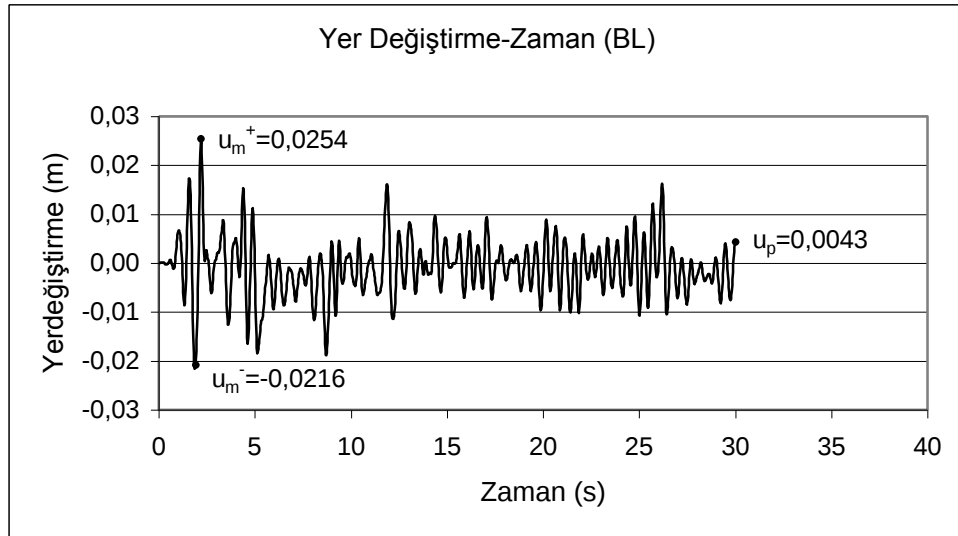
$$u_y = \frac{f_y}{k} = 0.0132m \text{ dir.}$$

Süneklik Katsayısı μ ; $\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0289}{0.0132} = 2.20$ dir.

4.2.6. Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 132.875(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 16.6094 kN$ dir. $\alpha = 0.2$ alınarak, $k_2 = 505.2 \left(\frac{kN}{m} \right)$ olarak alınmıştır.

Şekil 4.24'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.20 sn$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 1.88 sn$ 'de meydana gelmektedir.

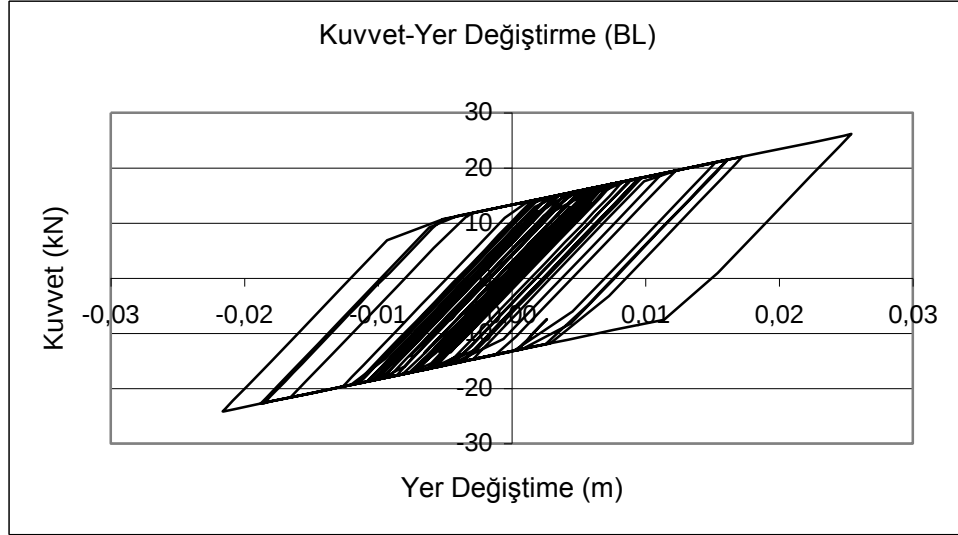


Şekil 4.24 Bilineer Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0254m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0216m$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0043m$ dir.

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y ,

$$u_y = \frac{f_y}{k} = 0.0066m \text{ dir.}$$

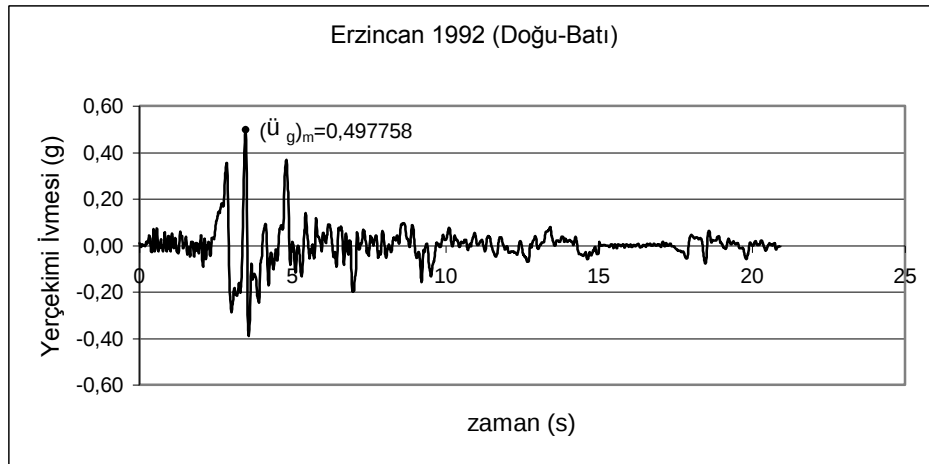


Şekil 4.25 Bilineer Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Süneklik Katsayısı μ ; $\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0254}{0.0066} = 3.86$ dir.

4.3. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Erzincan Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Analizi

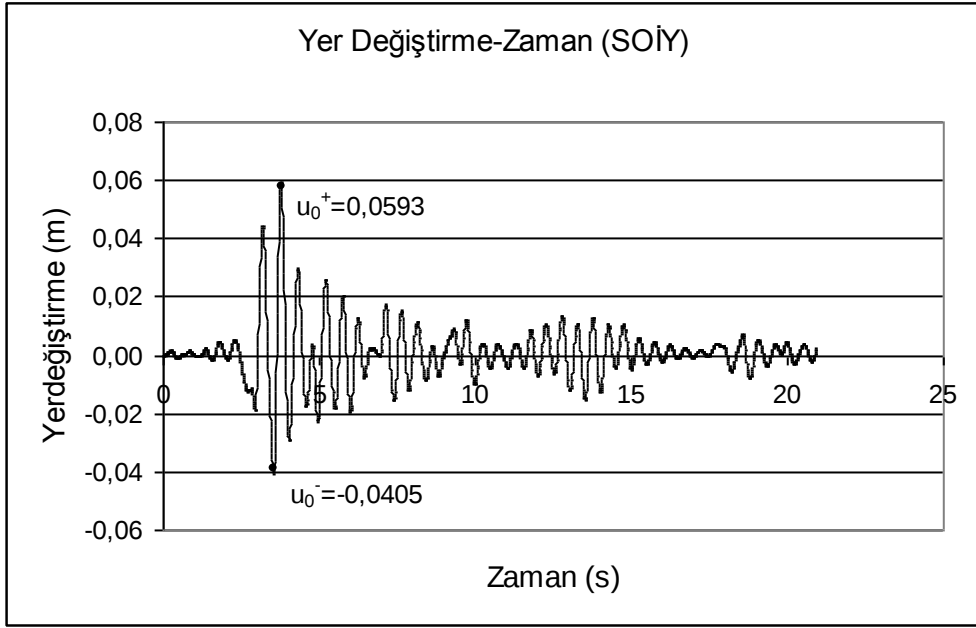
Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Erzincan 1992 (doğu-batı) deprem yer hareketi altında elastik en büyük kuvveti elde etmek için sadece Newmark'ın Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile çözülmüştür. 13 Mart 1992'de meydana gelen Erzincan (doğu-batı) deprem yer hareketi ivme izi grafiğinde en büyük ivme $t = 3.47s$ 'de meydana gelmektedir.



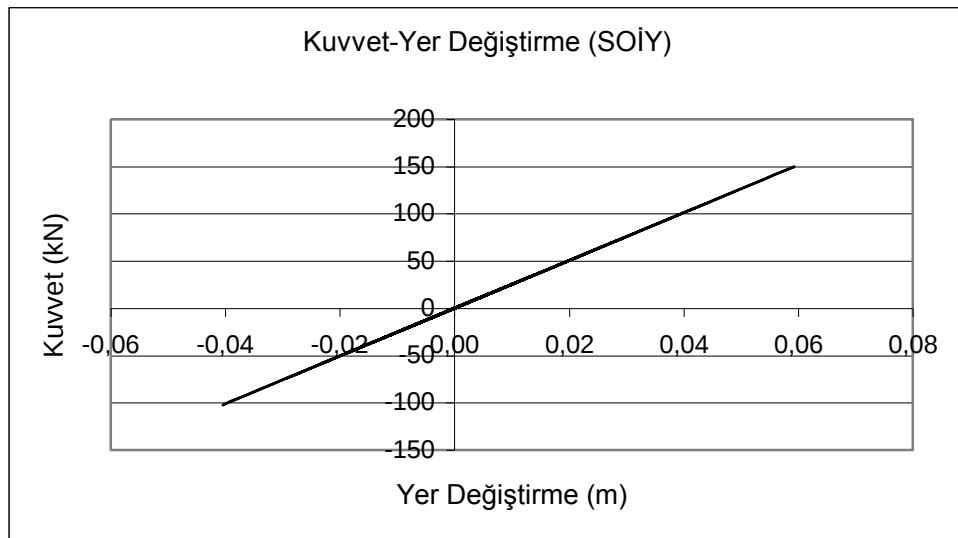
Şekil 4.26 Erzincan 1992 (Doğu-Batı) için İvme-Zaman Grafiği

4.3.1. Sabit Ortalama İvme Yöntemi İle Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem Sabit Ortalama İvme Yöntemi ($\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$) ile çözülmüştür. Şekil 4.27'ye göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 3.76s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 3.53s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_0^+ = 0.0593m$, negatif yönde $u_0^- = -0.0405m$ dir.

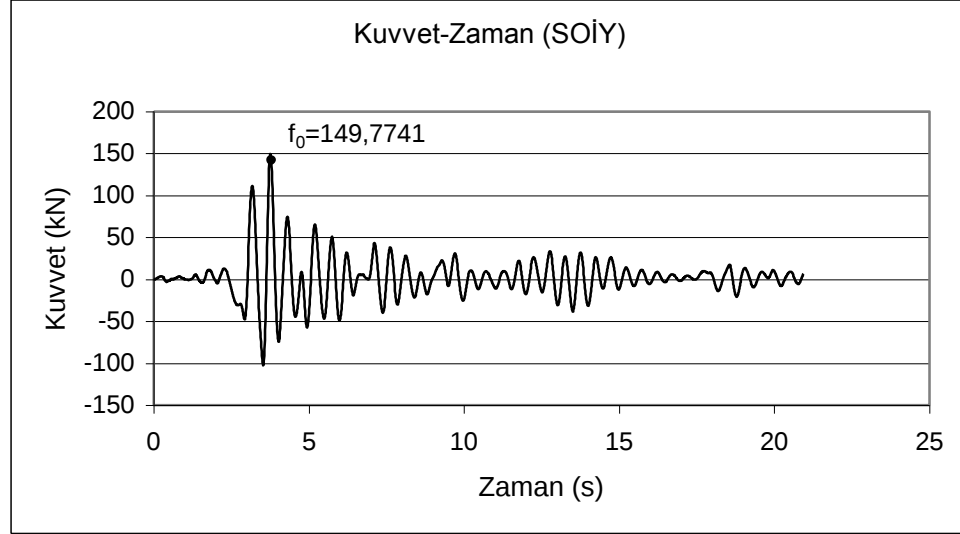


Şekil 4.27 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



Şekil 4.28 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Şekil 4.29'a göre elastik en büyük kuvvet $f_0 = ku_0$ dır ve en büyük değeri $t = 3.76s$ 'de $f_0 = 149.774kN$ dır.



Şekil 4.29 Sabit Ortalama İvme Yöntemi ile Kuvvet-Zaman Grafiği

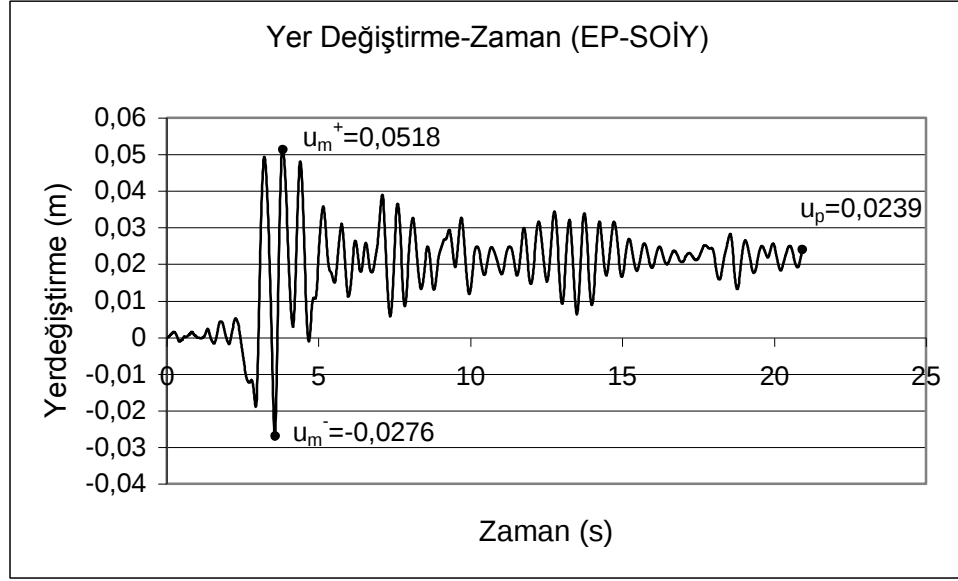
4.4. Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Erzincan Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Lineer Olmayan Analizi

Verilen tek serbestlik dereceli sistem Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle ideal elastoplastik kuvvet-yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak, Erzincan 1992 deprem yer hareketi etkisi altında Fortran 90'da hazırlanan program yardımıyla çözülmüştür.

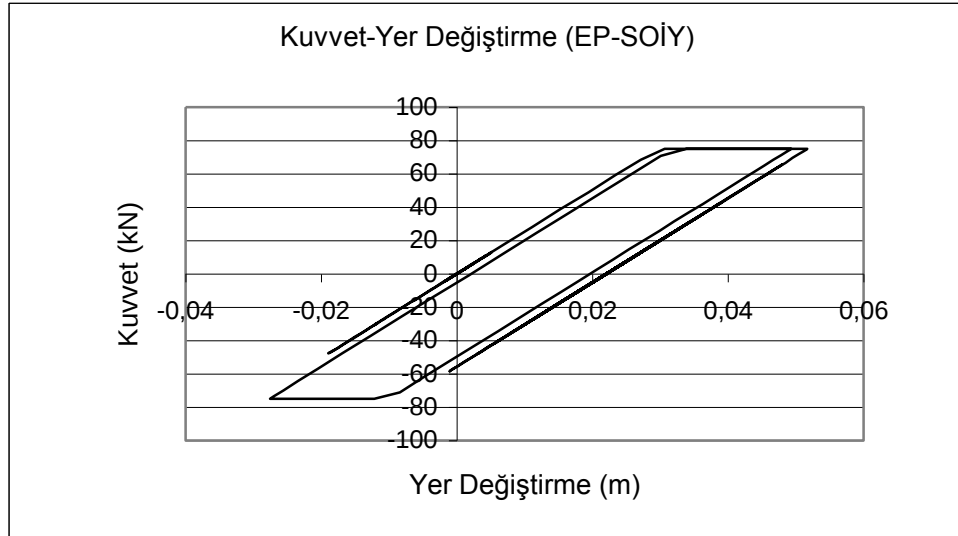
4.4.1. İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 149.774(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 74.887kN$ dır.

Şekil 4.30'a göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 3.82s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 3.56s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0518m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0276m$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0239m$ dir.



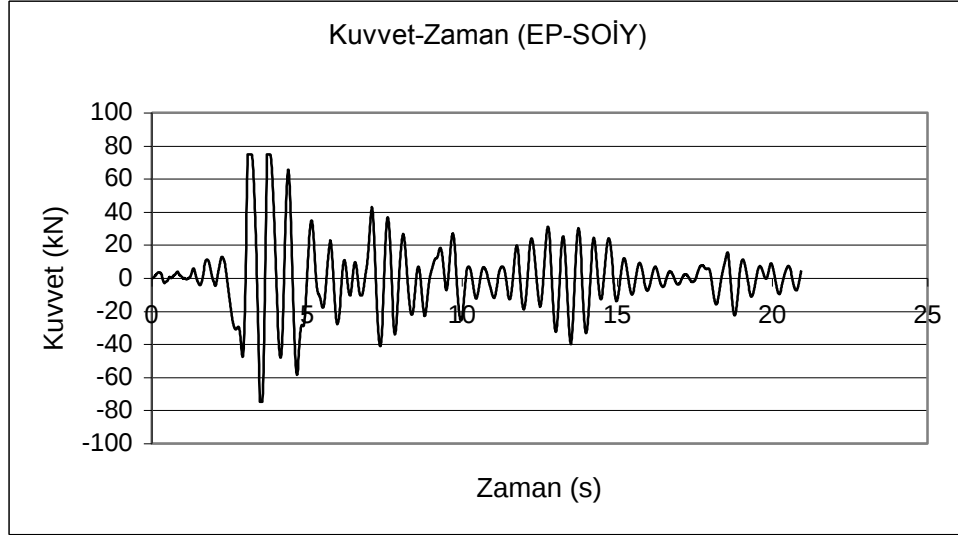
Şekil 4.30 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği



Şekil 4.31 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.5$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y ,

$$u_y = \frac{f_y}{k} = 0.0296 \text{ m dir. Süneklik Katsayısı } \mu ; \mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0518}{0.0296} = 1.74 \text{ dir.}$$

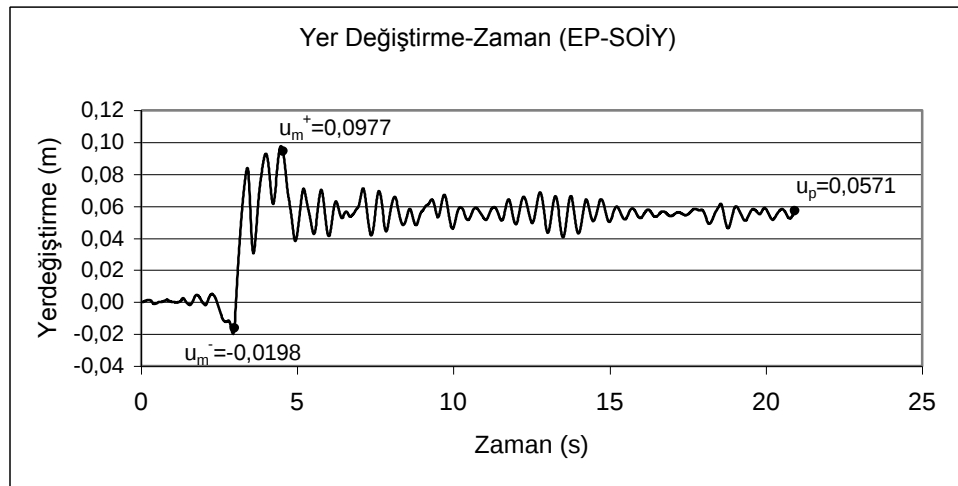


Şekil 4.32 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.5)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği

Verilen tek serbestlik dereceli sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplam} = 0.29s$ dir.

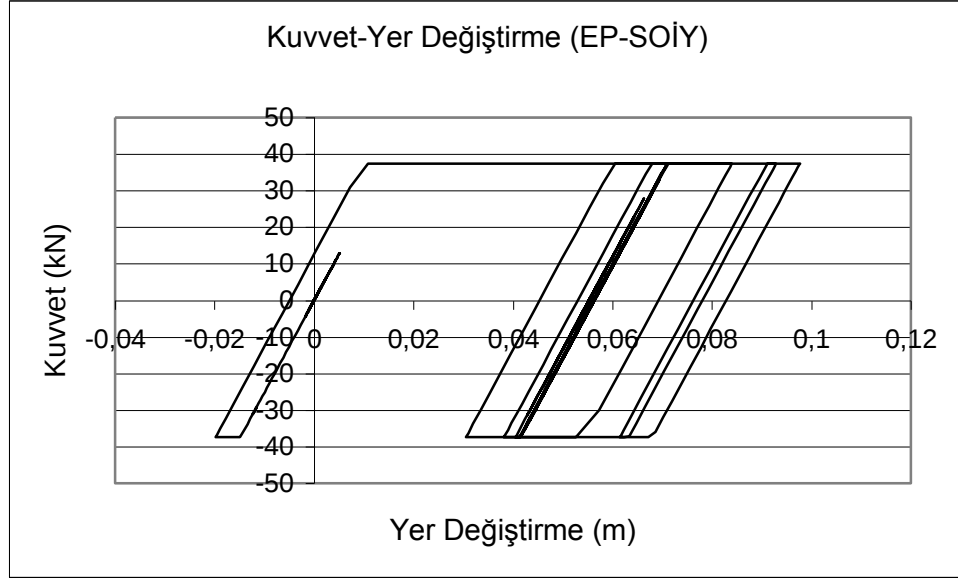
4.4.2. İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 149.774(kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 37.444kN$ dir.

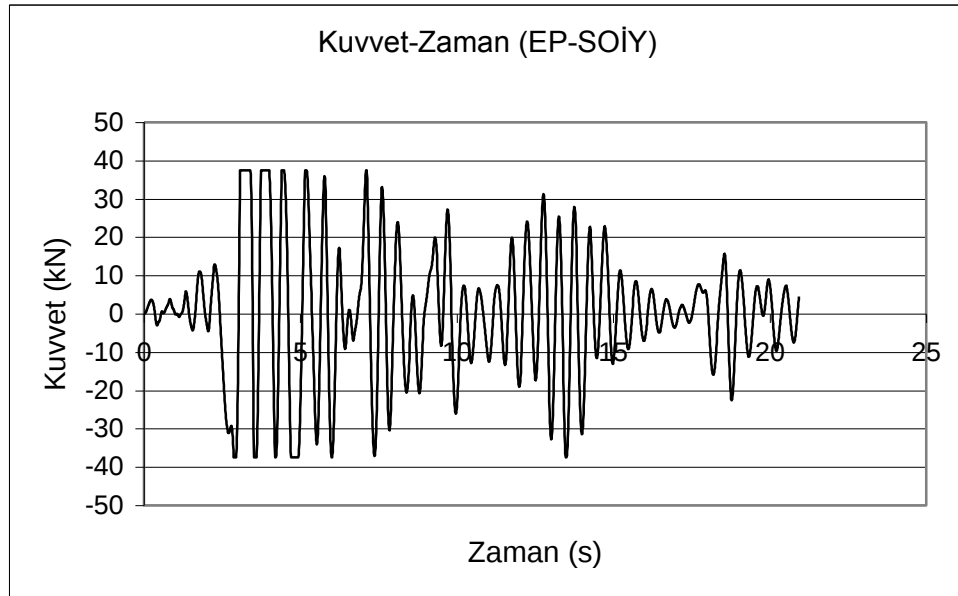


Şekil 4.33 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.25)$ için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.33'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 4.48s$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 2.94s$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0977m$, negatif yönde $u_m^- = -0.0198m$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.0571m$ dir.



Şekil 4.34 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiği



Şekil 4.35 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.25$) için Kuvvet-Zaman Grafiği

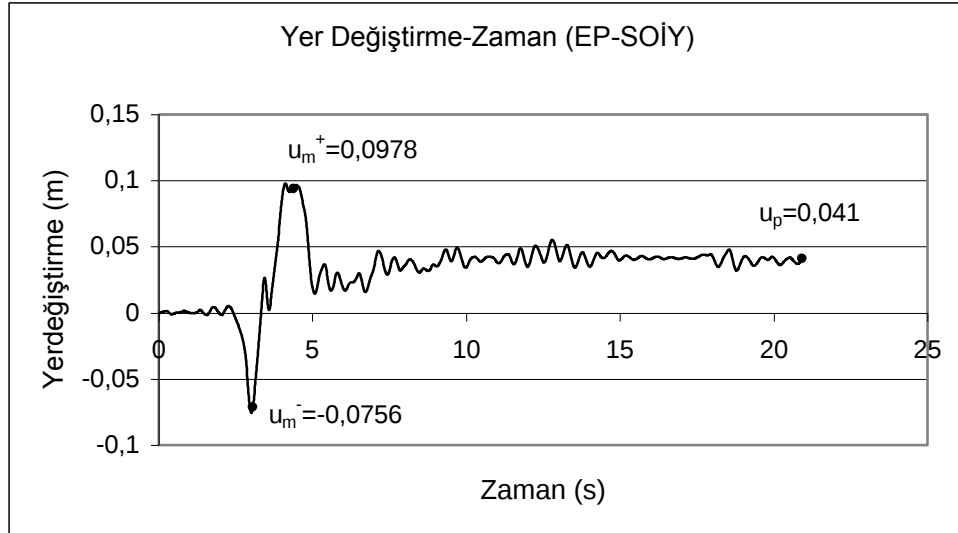
Verilen tek serbestlik dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y ,

$$u_y = \frac{f_y}{k} = 0.0148 \text{ m} \text{ dir. Süneklik Katsayısı } \mu; \mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0977}{0.0148} = 6.59 \text{ dir. Verilen}$$

tek serbestlik dereceli sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplamlam} = 1.16 \text{ s}$ dir.

4.4.3. İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) İçin Çözüm

Verilen tek serbestlik dereceli sistem, Sabit Ortalama İvme Yöntemiyle elde edilen elastik $f_0 = ku_0$ kuvveti, $f_0 = 149.774 (kN)$, $\bar{f}_y$ ile çarpılarak f_y akma kuvveti elde edilmiştir. Buna göre $f_y = 18.7218 kN$ dir.



Şekil 4.36 İdeal Elastoplastik Sistem, ($\bar{f}_y = 0.125$) için Yer Değiştirme-Zaman

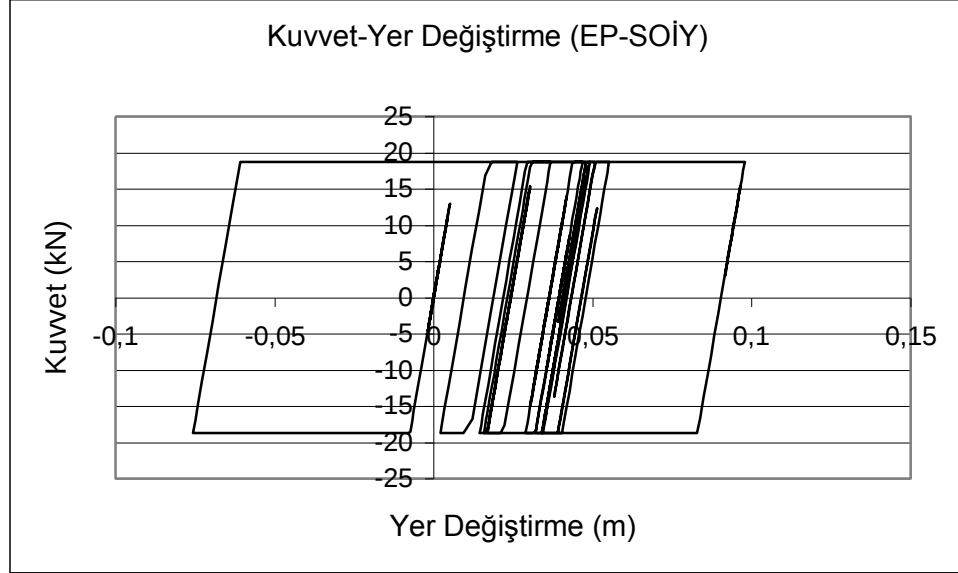
Grafiği

Şekil 4.36'e göre, pozitif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 4.12 \text{ s}$ 'de, negatif yöndeki en büyük yer değiştirme $t = 3.01 \text{ s}$ 'de meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirme pozitif yönde $u_m^+ = 0.0978 \text{ m}$, negatif yönde $u_m^- = -0.0756 \text{ m}$ dir. Sistemde oluşan kalıcı yer değiştirme u_p ise, $u_p = 0.041 \text{ m}$ dir. Verilen tek serbestlik

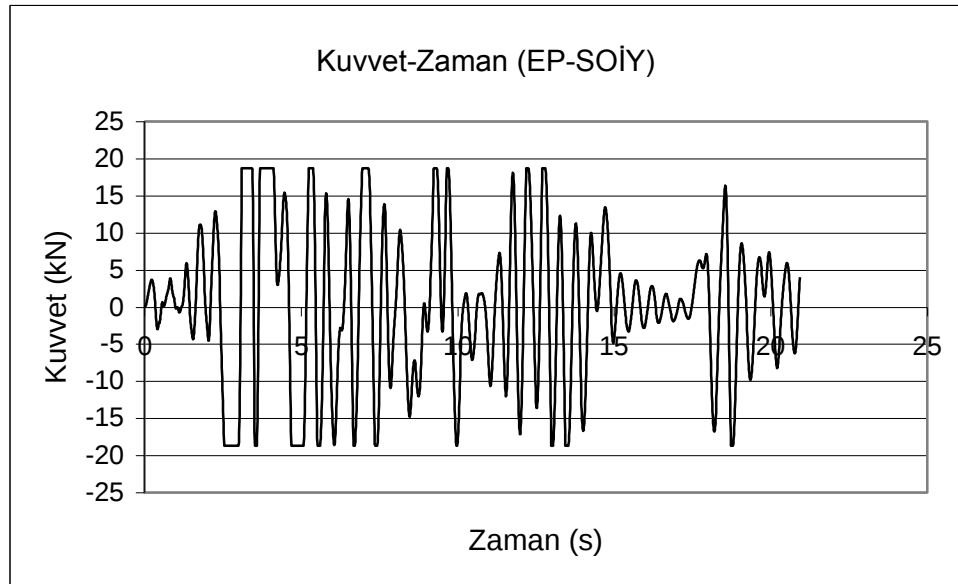
dereceli sistem için akma yer değiştirmesi u_y , $u_y = \frac{f_y}{k} = 0.0074 \text{ m}$ dir.

Süneklik Katsayısı μ ; $\mu = \frac{u_m}{u_y} = \frac{0.0978}{0.0074} = 13.20$ dir. Verilen tek serbestlik dereceli

sistemin akmaya ulaştığı toplam süre $t_{toplamlam} = 2.73s$ dir.



Şekil 4.37 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği



Şekil 4.38 İdeal Elastoplastik Sistem, $(\bar{f}_y = 0.125)$ için Kuvvet-Zaman Grafiği

5. SONUÇLAR

Çözümü yapılan sisteme ait sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.1 Sistemin El-Centro (doğu-batı) deprem yer hareketi etkisi altında lineer çözüm teknikleri ile elde edilmiş en büyük ve en küçük yer değiştirme değerleri

El-Centro (doğu-batı) deprem yer hareketi etkisi altında elastik yer değiştirme sonuçları		
Sayısal Çözüm Yöntemi	u_0^+	u_0^-
İNTERPOLASYON	0,0509	-0,0510
MERKEZİ FARKLAR	0,0509	-0,0514
SABİT ORTALAMA İVME	0,0526	-0,0500
LİNEER İVME DEĞİŞİMİ	0,0525	-0,0502

Sonuçlar karşılaştırıldığında, verilen sayısal çözüm yöntemleri yardımıyla elde edilen yer değiştirmelerin birbirine yakın olduğu görülür.

Tablo 5.2 Sistemin El-Centro (doğu-batı) ve Erzincan (doğu-batı) deprem yer hareketleri etkisi altında ideal elastoplastik kuvvet-yer değiştirme ilişkisi göz önüne alınarak süneklik taleplerinin karşılaştırılması

Kuvvet-Yer Değiştirme ilişkisi ideal elastoplastik	El-Centro (doğu-batı)	Erzincan (doğu-batı)
	μ katsayısı	μ katsayısı
$R_y = 8$	9,56	13,20
$R_y = 4$	3,05	6,59
$R_y = 2$	1,76	1,74

Tasarım mühendisi açısından taşıyıcı sistemin deprem yer hareketi etkisi altında boyutlandırılması ve dinamik analizin önemi ülkemizde yaşanan büyük depremlerden sonra artmıştır. Tablo 5.2’de görüldüğü üzere farklı iki deprem yer hareketinin aynı sistemden talep ettikleri süneklikler arasındaki fark deprem yer hareketi ve yapı karakteristiklerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3 İdeal Elastoplastik ve Bilineer Kuvvet-Yer Değiştirme İlişkilerinin El Centro (doğu-batı) Deprem Yer Hareketi Etkisi Altında Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yük Azaltım Katsayısı		İdeal Elastoplastik	Bilineer
$\bar{f}_y = 0.125$	u_m^+	0.0278	0.0254
	u_m^-	-0.0631	-0.0216
	u_p	-0.0299	0.0043
	μ	9.56	3.86
$\bar{f}_y = 0.25$	u_m^+	0.0317	0.0285
	u_m^-	-0.0402	-0.0289
	u_p	0.0107	0.0039
	μ	3.05	2.20
$\bar{f}_y = 0.5$	u_m^+	0.0463	0.0389
	u_m^-	-0.0384	-0.0364
	u_p	0.0081	0.0023
	μ	1.76	1.48

Tablo 5.3’e göre, $\bar{f}_y = 0.25$ ve $\bar{f}_y = 0.5$ için ideal elastoplastik ve bilineer kuvvet-yer değiştirme ilişkileri yakın sonuçlar vermektedir. Lineer olmayan sistemler için, sabit ortalama ivme yöntemi ile yapılan çözümde kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin tipinin önemi yoktur. Basit elastoplastik model kullanılarak yanıtlar tahmin edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Fajfar, P. and Krawinkler, H.**, 1992. Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings. Elsevier, Amsterdam.
- [2] **Chopra, Anil K.**, 1995. Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall International, Inc., New Jersey.
- [3] **Fillipou, F.C. and Issa, A.**, 1988. Nonlinear analysis of reinforced concrete frames under cyclic load reversals.EERC 88/12. University of California, Berkeley.
- [4] **Applied Technology Council (ATC)**, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings; 1:ATC-40.
- [5] **Chopra, Anil K. and Goel, R.**, 2000. Evaluation of NSP to estimate seismic deformations: SDF systems. *Journal of Structural Engineering*, ASCE; **26-4**
- [6] **Kumbasar, N. ve Celep, Z.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [7] **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, 1997. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [8] **Kumbasar, N. ve Celep, Z.**, 1996. Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [9] **Riddell R., Garcia J.E. and Garces E.**, 2002. Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; **31**:515-538

EKLER

EK1-İTERPOLASYON

```
program interpolation
implicit none
real,dimension(2500)::p,ud,uv
real a,a1,b,b1,c,c1,d,d1
real t0,dt,ud0,uv0,t
integer i,n
open (5,file='interpolation.txt')
open (6,file='interpolationresult.txt')
read(5,"(8F14.8)")a,a1,b,b1,c,c1,d,d1
read(5,"(I14)")n
read(5,"(2F12.2)")t0,dt
read(5,"(2F12.2)")ud0,uv0
read(5,"(8F12.4)")p(i),i=1,n)
write(6,"(8F14.8)")a,a1,b,b1,c,c1,d,d1
write(6,2)
2 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)"/)
t=t0
do i=1,n
write(6,"(I12,F12.2,F12.4)")i,t,p(i)
t=t+dt
end do
ud=ud0
uv=uv0
t=t0
write(6,3)
3 format(/10x,"t",10x,"uv",10x,"ud"/)
write(6,"(3F12.2)")t0,uv0,ud0
!t=t+dt
write(6,4)
4
format(/11x,"i",11x,"t",11x,"p",12x,"cp",12x,"dp",11x,"buuv",12x,"uv",11x,"aud",12
x,"ud"/)
do i=1,n
ud(i+1)=a*ud(i)+b*uv(i)+c*p(i)+d*p(i+1)
uv(i+1)=a1*ud(i)+b1*uv(i)+c1*p(i)+d1*p(i+1)
write(6,"(I12,F12.2,F12.4,6F14.8)")i,
t,p(i),c*p(i),d*p(i+1),b*uv(i),uv(i),a*ud(i),ud(i)
t=t+dt
end do
write(6,5)
```

```

5
format(/11x,"i",11x,"t",11x,"p",11x,"c1p",11x,"d1p",10x,"a1ud",12x,"ud",10x,"b1uv",12x,"uv"/)
t=t0
do i=1,n
ud(i+1)=a*ud(i)+b*uv(i)+c*p(i)+d*p(i+1)
uv(i+1)=a1*ud(i)+b1*uv(i)+c1*p(i)+d1*p(i+1)
write(6,"(I12,F12.2,F12.4,6F14.8)")i,t,p(i),c1*p(i),d1*p(i+1),a1*ud(i),ud(i),b1*uv(i),uv(i)
t=t+dt
end do
stop
end program interpolation

```

EK2-Merkezi Farklar

```

program centraldifference
real,dimension(2500)::p,pnew,ud,uv,ua
integer i,n
real m,k,c
real knew,a,b
real pi,ksi,tp
open (5,file='centraldifference.txt')
open (6,file='centraldifferenceresult.txt')
read(5,"(3F12.4)")m,k,c
read(5,"(I12)")n
read(5,"(2F12.2)")t0,dt
read(5,"(2F12.2)")ud0,uv0
read(5,"(8F12.4)")p(i),i=1,n)
ksi=0.05
pi=atan2(0.0,-1.0)
om=sqrt(k/m)
tp=2*pi/om
write(6,"(7F12.4)")m,k,ksi,pi,om,tp,c
write(6,2)
2 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)"/)
t=t0
do i=1,n
write(6,"(I12,F12.2,F12.4)")i,t,p(i)
t=t+dt
end do
ud=ud0
uv=uv0
t=t0
ua0=(p(1)-c*uv0-k*ud0)/m
ud(-1)=ud0-(dt)*uv0+(dt**2)*ua0/2
write(6,3)
3 format(/11x,"t",10x,"uv",10x,"ud"10x,"ua",7x,"ud(-1)"/)
write(6,"(5F12.4)")t0,uv0,ud0,ua0,ud(-1)
knew=m/(dt**2)+c/(2*dt)

```

```

a=m/(dt**2)-c/(2*dt)
b=k-2*m/(dt**2)
write(6,4)
4 format(/12x,"knew",15x,"a",15x,"b"/)
write(6,"(3F16.4)")knew,a,b
write(6,5)
5 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)",9x,"ud(i-1)",11x,"ud(i)",9x,"pnew(i)",9x,"ud(i+1)",11x,"uv(i)",11x,"ua(i)"/)
t=t0
do i=1,n
pnew(i)=p(i)-a*ud(i-1)-b*ud(i)
ud(i+1)=pnew(i)/knew
uv(i)=(ud(i+1)-ud(i-1))/(2*dt)
ua(i)=(ud(i+1)-2*ud(i)+ud(i-1))/(dt**2)
write(6,"(I12,F12.2,F12.4,6F16.6)")i,t,p(i),ud(i-1),ud(i),pnew(i),ud(i+1),uv(i),ua(i)
t=t+dt
end do
stop
end program centraldifference

```

EK3-Sabit Ortalama İvme

```

program averageacceleration
real,dimension(2500)::p,dp,dpnew,ud,uv,ua,dud,duv,dua
integer i,n
real m,k,c
real knew,a,b
real gama,beta
open (5,file='averageacceleration.txt')
open (6,file='averageaccelerationresult.txt')
read(5,"(3F12.4)")m,k,c
read(5,"(I12)")n
read(5,"(2F12.2)")t0,dt
read(5,"(2F12.4)")ud0,uv0
read(5,"(8F12.4)")p(i),i=1,n)
write(6,"(3F12.4)")m,k,c
write(6,2)
2 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)"/)
t=t0
do i=1,n
write(6,"(I12,F12.2,F12.4)")i,t,p(i)
t=t+dt
end do
!initial conditions
ud=ud0
uv=uv0
t=t0
ua0=(p(1)-c*uv0-k*ud0)/m
write(6,3)
3 format(/11x,"t",10x,"uv",10x,"ud"10x,"ua"/)

```

```

write(6,"(4F12.6)")t0,uv0,ud0,ua0
gama=1./2.
beta=1./4.
knew=k+(gama*c)/(beta*dt)+m/(beta*dt**2)
a=m/(beta*dt)+(gama*c)/beta
b=m/(2*beta)+c*dt*((gama/(2*beta))-1)
write(6,4)
4 format(/10x,"knew",13x,"a",13x,"b",10x,"gama",10x,"beta"/)
write(6,"(5F14.6)")knew,a,b,gama,beta
write(6,5)
5 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)",12x,"ua",12x,"dp",9x,"dpnew"&
,11x,"dud",11x,"duv",11x,"dua",12x,"uv",12x,"ud"/)
t=t0
do i=1,n
dp(i)=p(i+1)-p(i)
dpnew(i)=dp(i)+a*uv(i)+b*ua(i)
dud(i)=dpnew(i)/knew
duv(i)=(gama*dud(i))/(beta*dt)-(gama*uv(i))/(beta)+dt*ua(i)*(1-(gama)/(2*beta))
dua(i)=(dud(i)/(beta*dt**2))-(uv(i)/(beta*dt))-(ua(i)/(2*beta))
ud(i+1)=ud(i)+dud(i)
uv(i+1)=uv(i)+duv(i)
ua(i+1)=ua(i)+dua(i)
write(6,"(I12,F12.2,F12.4,8F14.6)")i,t,p(i),ua(i),dp(i),dpnew(i),dud(i),duv(i),dua(i),u
v(i),ud(i)
t=t+dt
end do
stop
end program averageacceleration

```

EK4-Doğrusal İvme Değişimi

```

program linearacceleration
real,dimension(2500)::p,dp,dpnew,ud,uv,ua,dud,duv,dua
integer i,n
real m,k,c
real knew,a,b
real gama,beta
open (5,file='linearacceleration.txt')
open (6,file='linearaccelerationresult.txt')
read(5,"(3F12.4)")m,k,c
read(5,"(I12)")n
read(5,"(2F12.2)")t0,dt
read(5,"(2F12.4)")ud0,uv0
read(5,"(8F12.4)")p(i),i=1,n)
write(6,"(3F12.4)")m,k,c
write(6,2)
2 format(/11x,"i",8x,"t",8x,"p(i)"/)
t=t0
do i=1,n
write(6,"(I12,F12.2,F12.4)")i,t,p(i)

```

```

t=t+dt
end do
ud=ud0
uv=uv0
t=t0
ua0=(p(1)-c*uv0-k*ud0)/m
write(6,3)
3 format(/11x,"t",10x,"uv",10x,"ud"10x,"ua"/)
write(6,"(4F12.6)")t0,uv0,ud0,ua0
gama=1./2.
beta=1./6.
knew=k+(gama*c)/(beta*dt)+m/(beta*dt**2)
a=m/(beta*dt)+(gama*c)/beta
b=m/(2*beta)+c*dt*((gama/(2*beta))-1)
write(6,4)
4 format(/10x,"knew",13x,"a",13x,"b",10x,"gama",10x,"beta"/)
write(6,"(5F14.6)")knew,a,b,gama,beta
write(6,5)
5 format(/11x,"i",11x,"t",8x,"p(i)",12x,"ua",12x,"dp",9x,"dpnew"&
,11x,"dud",11x,"duv",11x,"dua",12x,"uv",12x,"ud"/)
t=t0
do i=1,n
dp(i)=p(i+1)-p(i)
dpnew(i)=dp(i)+a*uv(i)+b*ua(i)
dud(i)=dpnew(i)/knew
duv(i)=(gama*dud(i))/(beta*dt)-(gama*uv(i))/(beta)+dt*ua(i)*(1-(gama)/(2*beta))
dua(i)=(dud(i)/(beta*dt**2))-(uv(i)/(beta*dt))-(ua(i)/(2*beta))
ud(i+1)=ud(i)+dud(i)
uv(i+1)=uv(i)+duv(i)
ua(i+1)=ua(i)+dua(i)
write(6,"(I12,F12.2,F12.4,8F14.6)")i,t,p(i),ua(i),dp(i),dpnew(i),dud(i),duv(i),dua(i),u
v(i),ud(i)
t=t+dt
end do
stop
end program linearacceleration

```

ÖZGEÇMİŞ

Orhan Uğur MÜFTÜOĞLU 1979 yılında Trabzon’da doğdu. İlköğretimini Dumlupınar İlkokulunda, orta öğretimini Kanuni Orta Okulunda tamamladıktan sonra, 1996 yılında Trabzon Yomra Fen Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl girdiği İ.T.Ü İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden, bir yılı ingilizce hazırlık olmak üzere beş yılda, bölüm 6.’sı olarak 2001’de mezun oldu. Tasarım Projesini “Çok Katlı Binalar” üzerine tamamladı. Yüksek lisans çalışmalarına 2001 yılında İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsünde başladı.