

15554

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN DEPREM
ETKİSİNDE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa Özgür YAYLI
(501011037)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Mayıs 2004

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet BAKİOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Metin AYDOĞAN 4.06.04
Prof.Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü.)

M. Bakioğlu
M. Aydoğan
F. Yükseler

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bilgilerini benden esirgemeyen Prof. Dr Mehmet BAKİOĞLU hocama teşekkürlerimi sunarım

Nisan 2004

Mustafa Özgür YAYLI



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapı Sisteminin Modellemesi Hakkında	2
1.2. Doğrudan İntegrasyon Yöntemleri Hakkında	7
1.3. İntegrasyon Yöntemlerinin Genel Özellikleri	9
2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN İNCELENMESİ	11
2.1. Sabit İvme Yöntemi	11
2.2. Ortalama İvme Yöntemi	12
2.3. Doğrusal İvme Yöntemi	15
2.4. Newmark β Yöntemi	17
2.5. Wilson θ Yöntemi	17
2.6. Merkez Fark Yöntemi	18
2.7. Houbolt Yöntemi	20
2.8. Bossak-Newmark Metodu	21
2.9. Hilber, Hughes, Taylor Metodu	22
3. İNTEGRASYON METODUNUN DOĞRULUĞU VE STABİLİTESİ	23
3.1. Sayısal İntegrasyon Yöntemlerinde Hatalar	23
3.2. İntegrasyon Yönteminin Stabilitesi	24
3.3. Stabilité Koşullarının Tesbit Edilmesi	25
3.3.1. Newmark β Metodu	25
3.3.2. Wilson θ Yöntemi	26
3.3.3. Merkez Fark Yöntemi	26
3.3.4. Houbolt Yöntemi	27
3.3.5. Bossak-Newmark Metodu	28
3.3.6. Hilber, Hughes, Taylor Metodu	28
3.4. Zaman Aralığı Seçimi	29
4. ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN İNCELENMESİ	31
4.1. Hareket Denklemlerinin Doğrudan İntegrasyonu	31
4.2. Kapalı(Implicit) İntegrasyon Tekniği	32
4.2.1. Ortalama İvme Yöntemi	32
4.2.2. Doğrusal İvme Yöntemi	33
4.2.3. Wilson θ Yöntemi	33
4.3. Açık(Explicit) İntegrasyon Tekniği	34
4.3.1. Merkez Fark Yöntemi	34

5. DOĞRUDAN İNTEGRASYONDA KARMA YÖNTEMLER	36
5.1. Karma Yöntemlerin Genel Özellikleri	36
5.2. E-I Açık(Explicit)-Kapalı(Implicit) İntegrasyon Tekniği	37
5.3. E-E ^R Açık(Explicit)-Açık(Explicit) İntegrasyon Tekniği	39
6. DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLER HAKKINDA	40
6.1. Hesap Kabulleri	40
6.2. Artım Formüllerinin Elde Edilmesi (Incremental Formulation)	40
6.3. Doğrusal Olmayan Çözümlerde Hatalar	43
7. ANALİZ ÖRNEKLERİ	47
7.1. İki Katlı Bir Yapının Analizi	47
7.2. Zaman Adımının Genişletilmesi	51
7.3. Beş Katlı Bir Yapının Analizi	52
7.3.1 Sistemin Rijitlik Matrisinin Kurulması	53
7.3.2 Sistemin Kütle Matrisinin Kurulması	53
7.3.3. Deprem İvme Kayıtlarının Kullanılması	53
7.4. Zaman Adımının Genişletilmesi	54
8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	58
KAYNAKLAR	60
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	115

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 7.1. Merkez fark yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı.....	49
Tablo 7.2. Ortalama ivme yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı.....	49
Tablo 7.3. Doğrusal ivme yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı.....	50
Tablo 7.4. Wilson θ yöntemi ile iki katlı bir yapının davranış durumu.....	50
Tablo 7.5. Merkez fark yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı ($h=0.25sn$).....	51
Tablo 7.6. Ortalama ivme yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı ($h=0.25sn$).....	51
Tablo 7.7. Doğrusal ivme yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı ($h=0.25sn$).....	51
Tablo 7.8. Wilson θ yöntemi ile iki katlı bir yapının davranışı ($h=0.25sn$).....	51

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Davranış hesaplama algoritması.....	2
Şekil 1.2 : Kayma yapı sistem modeli(lumped mass).....	3
Şekil 1.3 : Çok serbestlik dereceli sistem modeli.....	3
Şekil 1.4 : (i) nolu elemanın serbest cisim diyagramı.....	4
Şekil 1.5 : Yer hareketi etkisindeki sistem.....	4
Şekil 1.6 : Periyot büyümesi.....	10
Şekil 2.1 : Sabit ivme yöntemi	11
Şekil 2.2 : Ortalama ivme değişimi.....	13
Şekil 2.3 : Ortalama ivme yöntemi.....	13
Şekil 2.4 : Doğrusal ivme yöntemi.....	15
Şekil 2.5 : Wilson θ yöntemi.....	17
Şekil 2.6 : Merkez fark yöntemi (Hız tespiti).....	19
Şekil 2.7 : Merkez fark yöntemi (İvme tespiti).....	19
Şekil 5.1 : Karma sistemin sonlu eleman gösterimi.....	37
Şekil 6.1 : Eylemsizlik kuvveti değişimi.....	40
Şekil 6.2 : Sönüm kuvveti değişimi.....	40
Şekil 6.3 : Elastik kuvvet değişimi.....	40
Şekil 6.4 : Tanjant rijitliğinin kullanılması.....	41
Şekil 6.5 : Sabit eğimle iterasyon yapılması.....	44
Şekil 6.6 : Eğim değişimiyle iterasyon yapılması.....	44
Şekil 7.1 : İki serbestlik dereceli sistem ve uyarıcı kuvvet grafiği.....	47
Şekil 7.2 : Beş serbestlik dereceli sistem.....	52
Şekil 7.3 : Ortalama ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,01$).....	54
Şekil 7.4 : Ortalama ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,05$).....	54
Şekil 7.5 : Doğrusal ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,01$).....	55
Şekil 7.6 : Doğrusal ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,05$).....	55
Şekil 7.7 : Merkez fark yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,01$).....	56
Şekil 7.8 : Merkez fark yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,05$).....	56
Şekil 7.9 : Wilson yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,01$).....	57
Şekil 7.10 : Wilson yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0,05$).....	57

Şekil C.1	: Elcentro Depremi.....	83
Şekil C.2	: Erzincan Depremi(NS).....	84
Şekil C.3	: Erzincan Depremi(EW).....	85
Şekil C.4	: Pülümür Depremi(NS).....	86
Şekil C.5	: Pülümür Depremi(EW).....	87
Şekil D.1	: İki katlı yapı 1. kat karşılaştırması.....	88
Şekil D.2	: İki katlı yapı 2. kat karşılaştırması.....	89
Şekil E.1	: Elcentro Depremi 1.kat karşılaştırması.....	90
Şekil E.2	: Elcentro Depremi 2.kat karşılaştırması.....	91
Şekil E.3	: Elcentro Depremi 3.kat karşılaştırması.....	92
Şekil E.4	: Elcentro Depremi 4.kat karşılaştırması.....	93
Şekil E.5	: Elcentro Depremi 5.kat karşılaştırması.....	94
Şekil F.1	: Erzincan Depremi(NS) 1.kat karşılaştırması.....	95
Şekil F.2	: Erzincan Depremi(NS) 2.kat karşılaştırması.....	96
Şekil F.3	: Erzincan Depremi(NS) 3.kat karşılaştırması.....	97
Şekil F.4	: Erzincan Depremi(NS) 4.kat karşılaştırması.....	98
Şekil F.5	: Erzincan Depremi(NS) 5.kat karşılaştırması.....	99
Şekil G.1	: Erzincan Depremi(EW) 1.kat karşılaştırması.....	100
Şekil G.2	: Erzincan Depremi(EW) 2.kat karşılaştırması.....	101
Şekil G.3	: Erzincan Depremi(EW) 3.kat karşılaştırması.....	102
Şekil G.4	: Erzincan Depremi(EW) 4.kat karşılaştırması.....	103
Şekil G.5	: Erzincan Depremi(EW) 5.kat karşılaştırması.....	104
Şekil H.1	: Pülümür Depremi(NS) 1.kat karşılaştırması.....	105
Şekil H.2	: Pülümür Depremi(NS) 2.kat karşılaştırması.....	106
Şekil H.3	: Pülümür Depremi(NS) 3.kat karşılaştırması.....	107
Şekil H.4	: Pülümür Depremi(NS) 4.kat karşılaştırması.....	108
Şekil H.5	: Pülümür Depremi(NS) 5.kat karşılaştırması.....	109
Şekil I.1	: Pülümür Depremi(EW) 1.kat karşılaştırması.....	110
Şekil I.2	: Pülümür Depremi(EW) 2.kat karşılaştırması.....	111
Şekil I.3	: Pülümür Depremi(EW) 3.kat karşılaştırması.....	112
Şekil I.4	: Pülümür Depremi(EW) 4.kat karşılaştırması.....	113
Şekil I.5	: Pülümür Depremi(EW) 5.kat karşılaştırması.....	114

SEMBOL LİSTESİ

k	: Rijitlik
m	: Kütle
c	: Sönüm
u	: Yer değiştirme
\dot{u}	: Hız
\ddot{u}	: İvme
K	: Rijitlik matrisi
M	: Kütle matrisi
C	: Sönüm matrisi
U	: Yer değiştirme vektörü
\dot{U}	: Hız vektörü
\ddot{U}	: İvme vektörü
$\ddot{x}(t)$: Zemin ivmesi
P	: Dış kuvvet
h	: Zaman adımı veya integrasyon adımı
A	: İntegrasyon operatörü
ω	: Açısal frekans
ρ	: Spektral yarıçap
λ	: Özdeğer
ξ	: Sönüm oranı
β	: Newmark sayısal integrasyon sabitleri
γ	: Newmark sayısal integrasyon sabitleri
α	: Skaler katsayı
λ	: Skaler katsayı
θ	: Wilson yöntemi katsayısı
T	: Periyot
c_1, c_2	: İntegrasyon sabitleri

ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN DEPREM ETKİSİNDE İNCELENMESİ

ÖZET

Depremi yapı tasarımı etkisinin belirlenebilmesi için, yapının ve uyarıcı fonksiyonun gerçekçi bir şekilde modellenmesi ve dinamik analiz yapılarak yapıya gelen deprem kuvvetlerinin ve yapı davranışının tesbit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, ilk önce katların sonsuz rijit olduğu ve yer değiştirmelerin sadece yatay doğrultuda mümkün olabileceği kayma yapı davranışı modellenmiştir. Sistemin hareket denklemleri kurularak, denklemin doğrusal ve doğrusal olmayan durumlardaki çözüm yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Doğrudan integrasyon yöntemlerinin genel özellikleri tarif edilmiştir.

İkinci bölümde tek serbestlik dereceli sistemlerde, çeşitli doğrudan integrasyon teknikleri için formüllerin elde edilimleri incelenmiştir. Daha sonra elde edilmiş olan integrasyon tekniklerinin hassasiyeti ve stabilitesi integrasyon yönteminde kullanılan parametrelere ve seçilen zaman adımı büyüklüğüne bağlı olarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; tek serbestlik dereceli sistemler için elde edilmiş denklemlerde kullanılan skaler değerlerin yerini, matrislerin almasıyla çok serbestlik dereceli sistemlere geçiş yapılmıştır. Hareket denkleminin yazılma zamanına bağlı olarak integrasyon teknikleri iki farklı kısma ayrılmıştır. Daha sonra hesaplanabilme etkinliği ve yöntemin stabilitesi göz önünde bulundurularak, iki farklı kısımdaki integrasyon tekniklerinden karma yöntemler elde edilmiştir.

Altıncı bölümde; doğrusal olmayan durum sözkonusu olduğunda; bazı sayısal integrasyon yöntemlerinin uygulanma şekilleri sıralanmıştır.

Yedinci bölümde ise sırasıyla iki katlı yapı uyarıcı fonksiyon etkisinde ve beş katlı yapı beş farklı deprem ivme kaydı etkisinde, (merkez fark yöntemi, ortalama ivme yöntemi, doğrusal ivme yöntemi ve wilson yöntemi) kullanılarak yapıların davranışları belirlenmiştir.

ANALYSIS OF MULTI DEGREE OF FREEDOM SYSTEMS UNDER EARTHQUAKE

SUMMARY

In order to determine the effect of earthquake on the structure design, structure and time-varying applied load should be modelled in a realistic form and performing dynamical analysis with an aim to obtain the true load pattern and the response of the structure

In this project, shear structure response is modeled which has infinite stiff floors and their displacements can be possible only in the horizontal direction. Equation of motion is formed and characteristic procedures are presented about the solution techniques of equation of motion for both linear and nonlinear conditions. Basic concepts of direct integration methods are described.

Part two covers the formulation of the different step by step methods for single degree of freedom systems. Accuracy and stability of the integration methods are then presented according to parameters used in the integration method and time step

Part four deals with multi degree of freedom systems. The procedures used in solving single degree of freedom structures are extended to deal with multi degree systems by replacing scalar quantities by matrices. The methods are classified into two main groups according to equation of motion written at a selected time point. Then considering computational efficiency and stability of the integration method, two different schemes are combined

The nonlinear solution algorithms of integration methods, are the subject of part six.

Part seven covers the analysis of multi degree of freedom systems. The response computation of two story structure under exciting force and five story structure response under five different ground motions respectively are performed by using (central difference method, average acceleration method, linear acceleration method and Wilson method)

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımında yapının deprem etkisi altındaki davranışının gerçek davranışa en uygun şekilde bulunması amaçlanmaktadır. Ancak yapı davranışının tam olarak hesaplanması, yapının her bir noktasında davranışının belirlenmesini gerektirir. Yani sonsuz sayıda nokta ve sonsuz sayıda zaman anının dikkate alınması gerekmektedir. Bu da problemin çözümünü oldukça karmaşıklaştırır. Bu nedenle yapı dinamiği problemlerinin çözümü, statik problemlere göre daha karmaşık özellikler taşımaktadır.

Problemin matematiksel modelini basitleştirmek için, sistemi önceden belirlenmiş ve davranışın hesaplanacağı sonlu sayıda noktaya ayırmak uygun olacaktır. Dinamik davranışı sonlu sayıda zaman adımı kullanarak belirlemek, bir diğer basitleştirme yöntemidir.

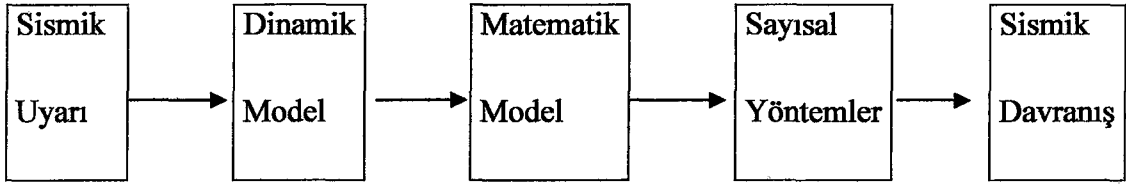
Yapı mühendisliği açısından bakıldığında; çok çeşitli zamana bağlı değişen titreşim kaynakları olsa da; bu çalışmada sismik uyarı(deprem) ve yapısal davranış ilişkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak yapı sistemi modellenerek; sistemin hareket denklemleri kurulmuştur. Hareket denkleminin sayısal çözüm yöntemleri üzerinde durulmuştur. Tek serbestlik dereceli sistemler için sayısal integrasyon formülleri elde edilmiş ve elde edilen sayısal integrasyon yöntemlerinin ortak ve farklı özellikleriyle birlikte stabilite koşulları tesbit edilmiştir. Hassasiyet ve hesaplama etkinliği gibi kavramların uygulanan yöntemin çeşitine ve sayısal integrasyonda kullanılan parametreler ile zaman adımının büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği incelenmiştir. Tek serbestlik dereceli sistemin skaler denklemlerinin yerini matrislerin almasıyla çok serbestlik dereceli sistemlere geçiş yapılmış ve hareket denkleminin çok serbestlik dereceli sistemlerde doğrusal ve doğrusal olmayan durumlar için sayısal çözüm teknikleri incelenmiştir.

Çözümlerin yapılabilmesi için dört farklı sayısal integrasyon yöntemi için bilgisayar programları geliştirilerek, farklı deprem etkilerinin analizi yapılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

1.1Yapı Sisteminin Modellenmesi Hakkında

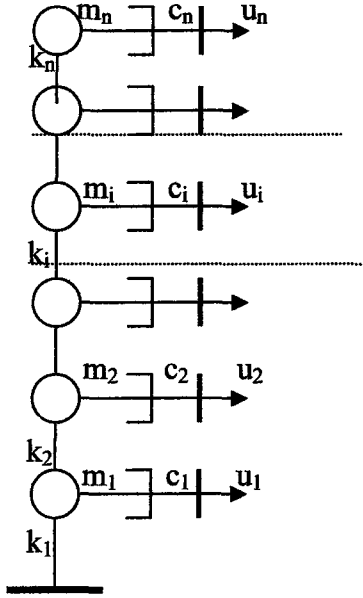
Uyarı ve davranış arasındaki ilişki nicel olarak matematiksel modelleme vasıtasıyla ifade edilir. Matematiksel modeli tanımlarken dikkate alınacak fiziksel özellikler; yapı sisteminin kütle, sönüm ve rijitlik özellikleridir.



Şekil 1.1 Davranış hesaplama algoritması

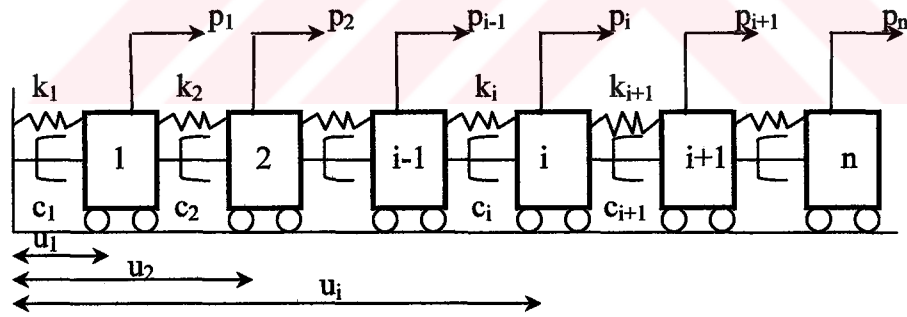
Yapı sistemini modellenmesinde en sık kullanılan metotlardan bir tanesi; yapının kütlelerini önceden seçilmiş noktalarda toplamaktır. Buna toplu (lumped) kütle modellenmesi adı verilir. Bunun nedeni eğer incelenecek sistem boyuna sürekli kabul edilirse, yer değiştirme ve ivmeler her noktada tanımlanmalıdır. Eğer kütleler ayırık noktalarda toplanırsa; Analitik problem büyük ölçüde basitleşir. Çünkü iç kuvvetler sadece kütlelerin toplandığı noktalarda ortaya çıkacaktır. Bu durumda sadece bu ayırık noktalardaki ivme ve yer değiştirmelerin tanımlanması gerekmektedir. İç kuvvetlerin etkisini temsil etmek için göz önüne alınması gereken yer değiştirme bileşenlerinin sayısı sistemin serbestlik derecesi olarak ifade edilir.

Yapı dinamiği analizinin birinci derecedeki amacı; zamana bağlı değişen yük etkisi altında, yer değiştirme – zaman davranışının belirlenmesidir. Dinamik yer değiştirmeleri tanımlayan matematiksel ifadeler yapıların hareket denklemi denir. Çoğu durumda sadece sınırlı sayıda serbestlik derecesini göz önüne alan yaklaşık hesaplama yeterli olabilmektedir. Problem sadece bu seçilmiş yer değiştirme bileşenlerinin zamana bağlı davranışının belirlenmesine indirgenebilir. Seçilmiş noktalar için hesap yapılarak bütün yapı davranışı hakkında yaklaşım yapılabilir.

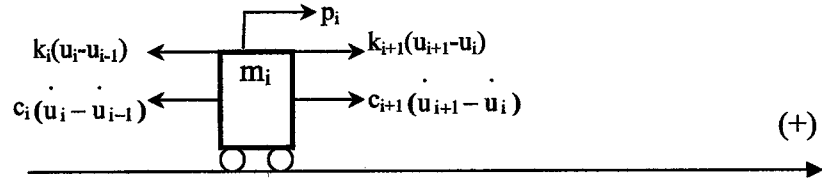


Şekil 1.2 Kayma yapı sistem modeli(lumped mass)

Kayma yapı sistem modeli Şekil 1.2' de gösterilmiştir. Bu model, katların sonsuz rijit olduğu ve düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin sadece yatay doğrultuda mümkün olabileceği hipotezine dayanır. Şekil 1.2' de gösterilmiş olan kayma yapı modeli dış uyarıcı kuvvet etkisi altında aşağıdaki şekilde olduğu gibi gösterilebilir.



Şekil 1.3 Çok serbestlik dereceli sistem modeli



Şekil 1.4 (i) nolu elemanın serbest cisim diyagramı

Pozitif yön Şekil 1.4'deki gibi kabul edilirse, (i) nolu elemanın hareket denklemi;

$$m_i \ddot{u}_i = -c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + c_{i+1}(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - k_i(u_i - u_{i-1}) + k_{i+1}(u_{i+1} - u_i) + p_i \quad (1.1)$$

şeklinde bulunur. (1.1) denklemi düzenlenirse, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$m_i \ddot{u}_i - c_i \dot{u}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} - k_i u_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) u_i - k_{i+1} u_{i+1} = p_i \quad (1.2)$$

($i=1,2,\dots,n$) olduğunda, sırasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$m_1 \ddot{u}_1 + (c_1 + c_2) \dot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + (k_1 + k_2) u_1 - k_2 u_2 = p_1$$

$$m_2 \ddot{u}_2 - c_2 \dot{u}_1 + (c_2 + c_3) \dot{u}_2 - c_3 \dot{u}_3 - k_2 u_1 + (k_2 + k_3) u_2 - k_3 u_3 = p_2$$

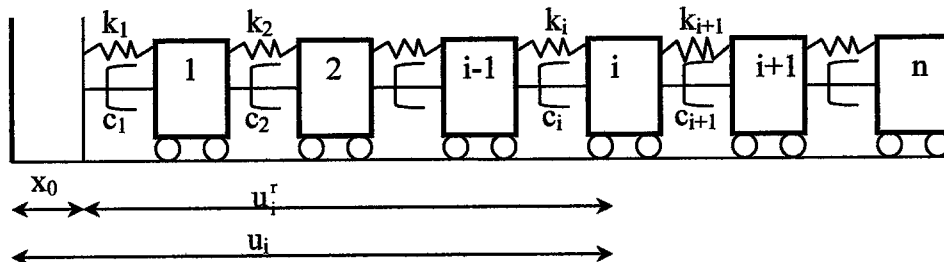
.....

$$m_{n-1} \ddot{u}_{n-1} - c_{n-1} \dot{u}_{n-2} + (c_{n-1} + c_n) \dot{u}_{n-1} - c_n \dot{u}_n - k_{n-1} u_n + (k_{n-1} + k_n) u_{n-1} - k_n u_n = p_{n-1}$$

$$m_n \ddot{u}_n - c_n \dot{u}_{n-1} + c_n \dot{u}_n - k_n u_{n-1} + k_n u_n = p_n$$

(1.3)

Şekil 1.3' deki sistem dış uyarıcı kuvvet yerine yer hareketine maruz kalırsa, bu durumda (x_0) yer hareketi olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir



Şekil 1.5 Yer hareketi etkisindeki sistem

$x_0 = x_0(t)$ hareket ifadesi göz önüne alındığında, hareket denklemi bulunurken aşağıdaki düzenlemelere ihtiyaç duyulur.

$$u_i = x_0 + u_i^r \quad (1.4)$$

eşitliğinden aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\ddot{u}_i = \ddot{x}_0 + \ddot{u}_i^r \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_i - \dot{u}_{i-1} &= \dot{x}_0 + \dot{u}_i^r - \dot{x}_0 - \dot{u}_{i-1}^r \\ &= \dot{u}_i^r - \dot{u}_{i-1}^r \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i = \dot{u}_{i+1}^r - \dot{u}_i^r$$

$$\begin{aligned} u_i - u_{i-1} &= x_0 + u_i^r - x_0 - u_{i-1}^r \\ &= u_i^r - u_{i-1}^r \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$u_{i+1} - u_i = u_{i+1}^r - u_i^r$$

Bulunan eşitlikler, dış uyarıcı kuvvet sıfır alınıp (1.1) denkleminde yerine yazılırsa, (i) nolu elemanın hareket denklemi;

$$m_i \ddot{u}_i - c_i \dot{u}_{i+1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{u}_i - c_{i+1} \dot{u}_{i+1} - k_i u_{i-1}^r + (k_i + k_{i+1}) u_i^r - k_{i+1} u_{i+1}^r = -m_i \ddot{x}_0 \quad (1.8)$$

şeklinde bulunur. (i=1,2...n) olduğunda, sırasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$m_1 \ddot{u}_1 + (c_1 + c_2) \dot{u}_1 - c_2 \dot{u}_2 + (k_1 + k_2) u_1^r - k_2 u_2^r = -m_1 \ddot{x}_0$$

$$m_2 \ddot{u}_2 - c_2 \dot{u}_1 + (c_2 + c_3) \dot{u}_2 - c_3 \dot{u}_3 - k_2 u_1^r + (k_2 + k_3) u_2^r - k_3 u_3^r = -m_2 \ddot{x}_0$$

.....

$$m_{n-1} \ddot{u}_{n-1} - c_{n-1} \dot{u}_{n-2} + (c_{n-1} + c_n) \dot{u}_{n-1} - c_n \dot{u}_n - k_{n-1} u_n^r + (k_{n-1} + k_n) u_{n-1}^r - k_n u_n^r = -m_{n-1} \ddot{x}_0$$

$$m_n \ddot{u}_n - c_n \dot{u}_{n-1} + c_n \dot{u}_n - k_n u_{n-1}^r + k_n u_n^r = -m_n \ddot{x}_0$$

(1.9)

J ve U vektörleri aşağıdaki şekildedir.

$$J = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_i \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}$$

Tek serbestlik dereceli sistem olması durumunda hareket denklemi, uyarıcı kuvvet ve yer hareketi etkisinde sırasıyla;

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (1.12)$$

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{x}(t) \quad (1.13)$$

şeklinde yazılır.

1.2 Doğrudan İntegrasyon Yöntemleri Hakkında

Çok serbestlik dereceli sistemlerde kullanılan modların birleştirilmesi yöntemi süperpozisyon kullanıldığı için doğrusal elastik hesapta geçerlidir. Herhangi bir doğrusal olmayan durum söz konusu olduğunda; sistemin davranışının belirlenmesinde kullanılan katsayılar matrisi değişir. Bu da analitik sonuçların geçerliliğini yitirmesine neden olur. Yine birçok durumda katsayıların sabit kaldığı düşünülemez. Örneğin çok şiddetli bir deprem esnasında; normal kuvvetlerdeki değişiklikler, kayda değer derecede geometrik rijitlik ve kütle veya sönüm katsayılarının davranış durumunda değişmesine neden olabilir [1]. Davranışın doğrusal elastik olmadığı durumlarda süperpozisyon ilkesi geçerli olmaz ve eğer klasik sönüm kavramı kabul edilmezse veya elastik ötesi davranış söz konusu ise hareket denklemlerinin ayrıklaştırılması sonucu bulunan Modların Birleştirilmesi Yöntemi geçerli olmaz bu durumda hareket denklemlerinin sayısal çözümü söz konusu olur. Yer hareketi etkisindeki sistemlerin çözümünde kullanılan etkin bir yöntemde hareket denkleminin zaman alanında adım adım sayısal integrasyondur.

Eğer adım adım integrasyon yöntemi doğrusal yapılarda uygulanıyorsa, hesaplama büyük ölçüde basitleşir. Çünkü yapısal özellikleri her adımda değiştirmeye ihtiyaç

duyulmaz. Bazı durumlarda doğrudan integrasyon yöntemini kullanmak, mod birleştirme yöntemine göre daha avantajlıdır. Çünkü birçok serbestlik derecesine sahip olan sistemde öz değer problemi büyük hesaplama zahmeti gerektirir. Adım adım davranış integrasyonunun çok serbestlik dereceli sistemlerdeki bir potansiyel zorluğu sönüm matrisi modal sönüm katsayılarından ziyade tam olarak belirlenmek zorundadır. Sönümün etkilediği katsayıların tam sönüm matrisinin değerini tahmin etmek oldukça zordur.

Genel olarak uygun bir sönüm matrisinin bulunması; önemli görülen modların modal sönüm değerleri uygun olarak kabul edilir ve daha sonra ortogonal özellikler taşıyan sönüm matrisi hesaplanır [1]. Diğer taraftan sönüm matrisi modal sönüm oranlarından ziyade tam olarak belirlendiği için adım adım integrasyon yöntemi genel olarak mod birleştirme yöntemine göre hassasiyet avantajı sağlayabilir.

Hareket denklemlerinin doğrudan integrasyonu sistemin davranışının ayrık zaman aralıklarında belirlenmesini sağlar. Bu zaman aralıkları genellikle birbirine eşittir. Davranış belirleme üç temel parametrenin hesaplanmasını içerir. Bu üç temel parametre yer değiştirme, hız ve ivmedir. İntegrasyon algoritması uygun seçilmiş ifadelerle dayanır. Bunlar zaman aralığında verilen ifadelerin değerleri veya önceki zaman noktalarındaki değerler ile ilişkilidir. Genel olarak iki bağımsız ifade belirlenmek zorundadır. Zaman aralığı için yazılan hareket denklemi üç bilinmeyeni belirlemek için gerekli olan üçüncü ifadenin yazılmasına olanak sağlar.

Doğrudan integrasyon yöntemi, dolayısıyla zaman boyunca ilerlemeyi içerir. İntegrasyonun başında, davranış parametreleri hesaplanmış veya biliniyor olması gerekir. Bu bilinen veya hesaplanan parametreler, metodun ilerlemesine ve takip eden noktalardaki istenen davranışın belirlenmesine olanak sağlar. Metodun doğruluğu ve stabilitesi bir zaman noktasındaki davranış parametrelerinin seçilmiş değerlerine ve hesaplamada kullanılan zaman aralığının büyüklüğüne dayanır [2].

1.3 İntegrasyon Yöntemlerinin Genel Özellikleri

Doğrudan integrasyon yöntemleri zaman tanım alanında sismik davranışın hesaplanmasına hem doğrusal sistemlerde, hem de doğrusal olmayan sistemlerde olanak sağlarlar. Bütün adım adım integrasyon yöntemleri sistemin hareket denklemini çözmek için kullanılırlar. Elde edilen davranış sürekli bir fonksiyon gibi değildir. Bir dizi önceden belirlenmiş zaman anlarındaki ardışık değerlerdir. Bu metotları üretmenin genel yolu şundan ibarettir; hızlar ve ivmeler, yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak uygun verilmiş zaman anlarında ve önceki zaman anlarındaki bilinen yer değiştirmeler, hızlar ve ivmelerle ifade edilirler. Elde edilen denklemler ve sistemin $t = t_a$ veya $t = t_{a+1}$ anında yazılan diferansiyel denklemi, çözümün hesaplanmasına olanak sağlar.

Çözüm geçmiş zaman noktaları için bulunduğu dolayısıyla bir yinelenen ifade her bir zaman anı için yazılabilir. Bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Y_{a+1} = AY_a \quad (1.14)$$

Burada Y_a yapının uygun zaman anında davranışdır ve A her bir integrasyon tekniğinde açıkça yazılması gereken bir matristir. Bütün geçmiş zaman anları için sırasıyla yukarıda verilen denklem uygulanırsa;

$$Y_{a+1} = AY_a = A^2 Y_{a-1} = \dots = A^a Y_1 \quad (1.15)$$

elde edilir. Bu denklemlerin normları alınırsa aşağıdaki eşitsizlik elde edilir.

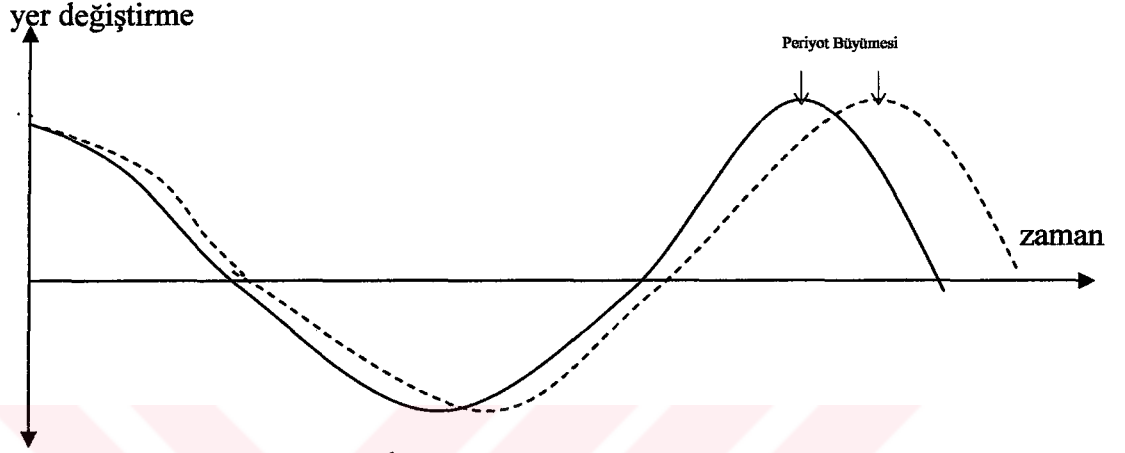
$$\|Y_{a+1}\| \leq \|A^a\| \|Y_1\| \quad (1.16)$$

Bilindiği gibi, $\|Y_{a+1}\| \leq [\rho(A)]^a \|Y_1\|$ denkleminde; $\rho(A)$, A matrisinin spektral yarıçapıdır ve $\rho(A) = \max |\lambda_a|$ buradaki λ_a öz değerdir. Görüldüğü gibi eğer kullanılan algoritmaya uygun spektral yarıçap birden küçük yada eşitse Y 'nin çözümü herhangi bir zaman anında sınırlanacaktır.

Sayısal integrasyon algoritmasında incelenmesi gereken bir başka önemli husus da çözümün hassasiyetini etkileyen periyot büyümesidir Şekil 1.6. Sayısal algoritma vasıtasıyla hesaplanmış olan sönümsüz serbest titreşim \tilde{T} periyodu teorik olandan T

büyüktür. Bu ikisinin arasındaki fark metodun hassasiyetinin tanımlanmasında kullanışlı bir kriter olmaktadır [3].

Genel bir kural olarak dinamik analizde kullanılacak zaman adımı $\Delta t/T = 0.1$ olmalıdır. Buradaki T bütün davranışta katkısı önemli derecede olan en yüksek titreşim periyodudur



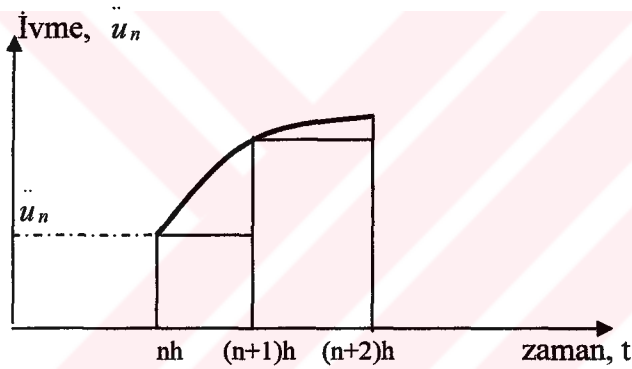
Şekil 1.6 Periyot Büyümesi

2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN İNCELENMESİ

2.1 Sabit İvme Yöntemi

Bu yöntem için formülleri elde ederken; küçük zaman aralığında (h) sistemin ivmesinin sabit kaldığı kabul edilir ve ivme aralığın başlangıcındaki değerine eşittir. Genelliği bozmadan koordinat başlangıcı (n) zaman noktasına taşınırsa. Sabit ivme kabulü aşağıdaki denklemi verir.

$$\ddot{u} = \ddot{u}_n = \text{sabit} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1 Sabit ivme yöntemi

(2.1) denklemi iki kez integre edilirse;

$$\dot{u} = \ddot{u}_n t + c_1 \quad (2.2)$$

$$u = \frac{1}{2} \ddot{u}_n t^2 + c_1 t + c_2 \quad (2.3)$$

Bulunur, denklemlerdeki c_1 ve c_2 integrasyon sabitleridir ve değerleri başlangıç koşullarından elde edilir. $t=0$ için ($u=u_n$, $\dot{u}=\dot{u}_n$) olacağından, $c_1=\dot{u}_n$, $c_2=u_n$ elde edilir. Bulunan integrasyon sabitleri, (2.2) ve (2.3) denklemlerinde yerlerine yazılırsa;

$$\dot{u} = \ddot{u}_n t + \dot{u}_n \quad (2.4)$$

$$u = \frac{1}{2} \ddot{u}_n t^2 + \dot{u}_n t + u_n \quad (2.5)$$

bulunur. ($t = h$) için ($u = u_{n+1}$, $\dot{u} = \dot{u}_{n+1}$) olacağından;

$$\dot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n h + \dot{u}_n \quad (2.6)$$

$$u_{n+1} = \frac{1}{2} \ddot{u}_n h^2 + \dot{u}_n h + u_n \quad (2.7)$$

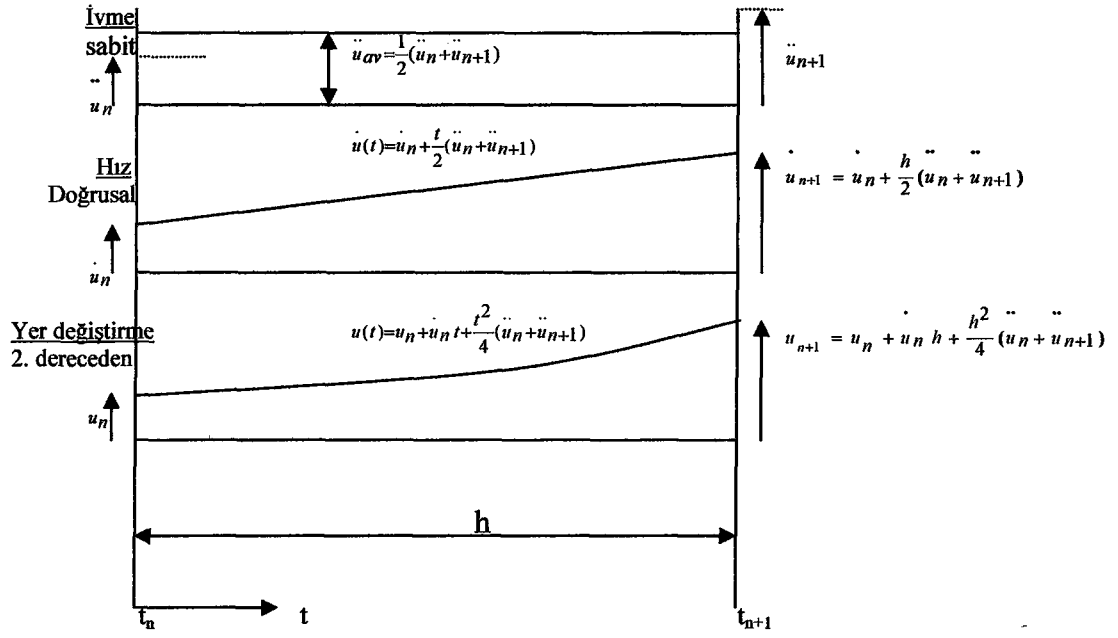
bulunur. (2.6) ve (2.7) denklemleri zaman integrasyonunda kullanılan üç denklemden iki tanesidir. Üçüncü denklem (1.12) hareket denkleminin, (n+1) zaman noktası için yazılmasıyla elde edilir.

$$m \ddot{u}_{n+1} + c \dot{u}_{n+1} + k u_{n+1} = p_{n+1} \quad (2.8)$$

(2.6), (2.7) ve (2.8) denklemleri u_{n+1} , \dot{u}_{n+1} , \ddot{u}_{n+1} değerlerinin, u_n , \dot{u}_n , \ddot{u}_n değerlerini kullanarak bulunmasına olanak sağlar. (2.6) denklemi hızı, (2.7) denklemi yer değiştirmeyi ve bulunan iki değer, (2.8) denkleminde yerine yazılırsa ivme bulunur. Zaman integrasyonuna başlayabilmek için u_0 , \dot{u}_0 , \ddot{u}_0 değerlerinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Sırasıyla yer değiştirme hız ve ivmenin ($t = 0$) anındaki değerleri belli olmalıdır. İki tanesinin değeri başlangıç değeri olarak verilir. Üçüncü parametre hareket denkleminin ($t=0$) anında yazılıp, verilen değerlerin kullanılmasıyla bulunur.

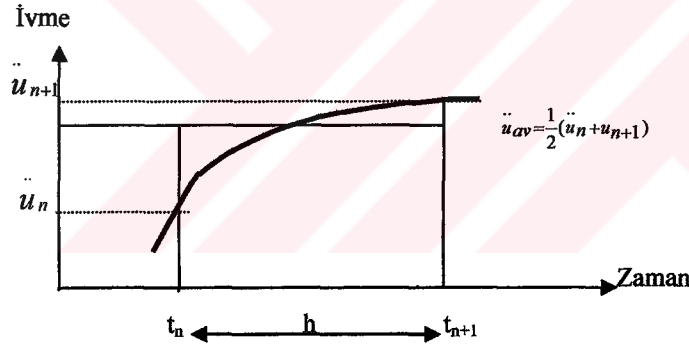
2.2 Ortalama İvme Yöntemi

Ortalama ivme yöntemi için formülleri elde ederken; küçük (h) zaman aralığında sistemin ivmesinin değişmeyip sabit kaldığı kabul edilir ve ivmenin değeri aralığın başlangıcındaki değeriyle aralığın sonundaki değerlerin ortalaması alınarak bulunur. ($t=t_n$) ve ($t=t_{n+1}$) noktaları arasındaki ivmenin değişimi ortalama ivme kabulüyle Şekil 2.2'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Ortalama ivme değişimi

Hız ve yer değişimi formüllerini elde etmek için izlenecek yol aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.3 Ortalama ivme yöntemi

Ortalama ivme kabulünde;

$$\ddot{u} = \frac{1}{2}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad (2.9)$$

dir. Basitlik için koordinat merkez noktası, (t_n) noktasına taşınır ve (2.9) denklemini iki kez integre edilirse;

$$\dot{u} = \frac{1}{2}t(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + c_1 \quad (2.10)$$

$$u = \frac{1}{4}t^2(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + c_1 t + c_2 \quad (2.11)$$

bulunur. buradaki c_1 ve c_2 ; başlangıç koşullarından elde edilecek olan integrasyon sabitleridir. $t = 0$ için $u = u_n$ ve $\dot{u} = \dot{u}_n$ olacaktır. dolayısıyla $c_1 = \dot{u}_n$ ve $c_2 = u_n$ bulunur. bulunan değerler (2.10) ve (2.11) denklemlerinde yerlerine yazılırsa;

$$\dot{u} = \frac{1}{2}t(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + \dot{u}_n \quad (2.12)$$

$$u = \frac{1}{4}t^2(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + \dot{u}_n t + u_n \quad (2.13)$$

bulunur. $t = h$ için ($u = u_{n+1}$ ve $\dot{u} = \dot{u}_{n+1}$) değerleri, (2.12) ve (2.13) denklemlerinde yerlerine yazılırsa, aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{1}{2}h(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + \dot{u}_n \quad (2.14)$$

$$u_{n+1} = \frac{1}{4}h^2(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) + \dot{u}_n h + u_n \quad (2.15)$$

(2.15) denkleminde;

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{4}{h^2}(u_{n+1} - \dot{u}_n h - u_n) - \ddot{u}_n \quad (2.16)$$

bulunur. (2.16) denklemini, (2.14) denkleminde yerine yazılırsa;

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{2}{h}(u_{n+1} - u_n) - \dot{u}_n \quad (2.17)$$

bulunur. (2.16) ve (2.17) ifadeleri, (2.8) denkleminde verilmiş olan (n+1) noktasındaki hareket denkleminde yerine yazılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\left(\frac{4}{h^2}m + \frac{2}{h}c + k\right)u_{n+1} = p_{n+1} + \left(\frac{4}{h^2}u_n + \frac{4}{h}\dot{u}_n + \ddot{u}_n\right)m + \left(\frac{2}{h}u_n + \dot{u}_n\right)c \quad (2.18)$$

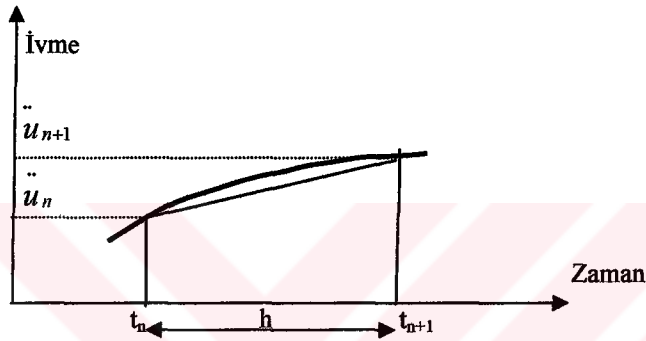
Adım adım ilerlemede hesap sırası şu şekildedir; Önce (2.18) bağıntısından u_{n+1} değeri hesaplanır. u_{n+1} değeri bulunduktan sonra (2.16) ve (2.17) den \ddot{u}_{n+1} ve \dot{u}_{n+1} değerleri bulunur. İntegrasyona başlayabilmek için; \ddot{u}_0 , \dot{u}_0 ve u_0 belli olmalıdır. Bunlardan iki tanesi başlangıç yer değiştirme ve başlangıç hız değerleri genellikle

verilir. Üçüncü parametre hareket denkleminin ($t=0$) için yazılıp, verilen değerler için çözülmesiyle bulunur.

2.3 Doğrusal İvme Yöntemi

Bu yöntemde her bir aralıkta ivmenin, yani ikinci türevin doğrusal değiştiği kabul edilir. Doğrusal ivme kabulü aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$\ddot{u} = \ddot{u}_n + \frac{t}{h}(\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) \quad (2.19)$$



Şekil 2.4 Doğrusal ivme yöntemi

Şekil 2.4 de basitlik için başlangıç noktası koordinat merkezine taşınırsa ve (2.19) denklemini iki kere integre edilirse;

$$\dot{u} = \ddot{u}_n t + \frac{t^2}{2h}(\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) + c_1 \quad (2.20)$$

$$u = \ddot{u}_n \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{6h}(\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) + c_1 t + c_2 \quad (2.21)$$

bulunur. Buradaki c_1 ve c_2 ; başlangıç koşullarından elde edilecek olan integrasyon sabitleridir. $t = 0$ için $u = u_n$ ve $\dot{u} = \dot{u}_n$ olacaktır, dolayısıyla $c_1 = \dot{u}_n$ ve $c_2 = u_n$ bulunur. Bulunan değerler, (2.20) ve (2.21) denklemlerinde yerine yazılırsa;

$$\dot{u} = \ddot{u}_n t + \frac{t^2}{2h}(\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) + \dot{u}_n \quad (2.22)$$

$$u = \ddot{u}_n \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{6h} (\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) + \dot{u}_n t + u_n \quad (2.23)$$

bulunur. $t = h$ için ($u = u_{n+1}$ ve $\dot{u} = \dot{u}_{n+1}$) değerleri, (2.22) ve (2.23) denklemlerinde yerine yazılırsa;

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{1}{2} h (\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n) + \dot{u}_n \quad (2.24)$$

$$u_{n+1} = \frac{1}{3} h^2 \ddot{u}_n + \frac{1}{6} h^2 \ddot{u}_{n+1} + \dot{u}_n h + u_n \quad (2.25)$$

bulunur. Bu bağıntılardan yararlanarak $(n+1)$ noktasındaki \ddot{u}_{n+1} ve \dot{u}_{n+1} değerleri

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{6}{h^2} (u_{n+1} - u_n - h \dot{u}_n - \frac{h^2}{3} \ddot{u}_n) \quad (2.26)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{3}{h} (u_{n+1} - u_n) - 2 \dot{u}_n - \frac{1}{2} h \ddot{u}_n \quad (2.27)$$

şeklinde yazılır. bulunan bu değerler (2.8) denklemiyle verilmiş olan $(n+1)$ noktasındaki hareket denkleminde yerine konulduğunda u_{n+1} değerini veren bağıntı

$$\left(\frac{6}{h^2} m + \frac{3}{h} c + k\right) u_{n+1} = p_{n+1} + \left(\frac{6}{h^2} m + \frac{3}{h} c\right) u_n + \left(\frac{6}{h} m + 2c\right) \dot{u}_n + \left(2m + \frac{h}{2} c\right) \ddot{u}_n \quad (2.28)$$

şeklinde elde edilir. Adım adım ilerlemede hesap sırası ortalama ivme yönteminde olduğu gibi şu şekildedir; Önce (2.28) bağıntısından u_{n+1} değeri hesaplanır.

u_{n+1} değeri bulunduktan sonra (2.26) ve (2.27) den \ddot{u}_{n+1} ve \dot{u}_{n+1} değerleri hesaplanır.

İntegrasyona başlayabilmek için; \ddot{u}_0 , \dot{u}_0 ve u_0 belli olmalıdır. Bunlardan iki tanesi başlangıç yer değiştirme ve başlangıç hız değerleri genellikle verilir. Üçüncü parametre hareket denkleminin ($t=0$) için yazılıp verilen değerler için çözülmesiyle bulunur.

2.4 Newmark β Yöntemi

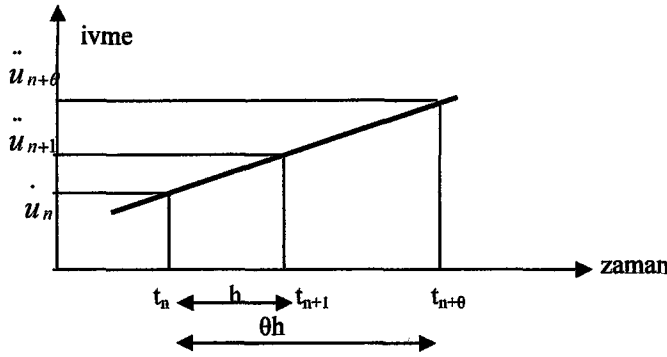
Newmark geliştirdiği bu yöntemle \dot{u}_{n+1} ve u_{n+1} değerlerini; \ddot{u}_{n+1} , \dot{u}_n ve u_n değerleri cinsinden

$$\begin{aligned}\dot{u}_{n+1} &= \dot{u}_n + h(1-\gamma)\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} \\ u_{n+1} &= u_n + h\dot{u}_n + h^2\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{u}_n + h^2\beta\ddot{u}_{n+1}\end{aligned}\quad (2.29)$$

biçiminde iki parametreye bağlı olarak vermektedir. γ ve β parametreleri yöntemin her adımda stabilitesi ve doğruluğuna göre seçilir. Newmark β Yöntemi $\gamma = \beta = 0$ olduğunda sabit ivme yöntemine, $\gamma=1/2$ ve $\beta=1/4$ olduğunda ortalama ivme yöntemine, $\gamma=1/2$ ve $\beta=1/6$ seçildiğinde doğrusal ivme yöntemine dönüşür. Genel olarak $\gamma=1/2$ ve $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ seçimi uygun seçimidir[4].

2.5 Wilson θ Yöntemi

Bu metot, doğrusal ivme yöntemine benzer olarak, E.L. WILSON tarafından öne sürülmüştür. İvmenin genişletilmiş (θh) zaman aralığında doğrusal olarak değiştiği varsayımına dayanır. θ parametresi her zaman birden büyüktür ve arzu edilen doğruluğu ve kararlılığı sağlayacak biçimde seçilir [2].



şekil 2.5 Wilson θ yöntemi

Bu kabuller altında doğrusal ivme için bulunan bağıntılarda; $(n+1)$ yerine $(n+\theta)$ ve (h) yerine (θh) yazılarak aşağıdaki bağıntılar bulunur.

$$\ddot{u}_{n+\theta} = \frac{6}{(\theta h)^2} \left[u_{n+\theta} - u_n - \theta h \dot{u}_n - \frac{(\theta h)^2}{3} \ddot{u}_n \right] \quad (2.30)$$

$$\dot{u}_{n+\theta} = \frac{3}{\theta h}(u_{n+\theta} - u_n) - 2\dot{u}_n - \frac{1}{2}\theta h \ddot{u}_n \quad (2.31)$$

$$\left[\frac{6}{(\theta h)^2} m + \frac{3}{\theta h} c + k \right] u_{n+\theta} = p_{n+\theta} + m \left[\frac{6}{(\theta h)^2} u_n + \frac{6}{\theta h} \dot{u}_n + 2\ddot{u}_n \right] + c \left[\frac{3}{\theta h} u_n + 2\dot{u}_n + \frac{\theta h}{2} \ddot{u}_n \right] \quad (2.32)$$

İvmenin, (n)h zamanından (n+θ)h zamanına kadar olan aralıkta doğrusal olarak değiştiği kabulü yapıldığı için, aynı zaman aralığında uyarıcı kuvvetin de doğrusal değiştiği kabulü yapılır. Bu yüzden $p_{n+\theta}$ değeri

$$p_{n+\theta} = p_n + \frac{1}{h}(p_{n+1} - p_n)(\theta h) = p_n(1 - \theta) + p_{n+1}\theta \quad (2.33)$$

şeklinde bulunur. bulunan bu değer (2.32) eşitliğinde kullanılarak eşitlikten $u_{n+\theta}$ değeri hesaplanır. $u_{n+\theta}$ değeri (2.30) denkleminde kullanılarak $\ddot{u}_{n+\theta}$ değeri hesaplanır. Bu değer yardımı ile (n+1) noktasındaki ikinci türev;

$$\ddot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n + (\ddot{u}_{n+1} - \ddot{u}_n) \frac{1}{\theta} \quad (2.34)$$

olarak bulunur. Bu değer doğrusal ivme yöntemi için verilmiş olan (2.24) ve (2.25) denklemlerinde kullanılarak u_{n+1} ve \dot{u}_{n+1} değerleri hesap edilir.

2.6 Merkez Fark Yöntemi

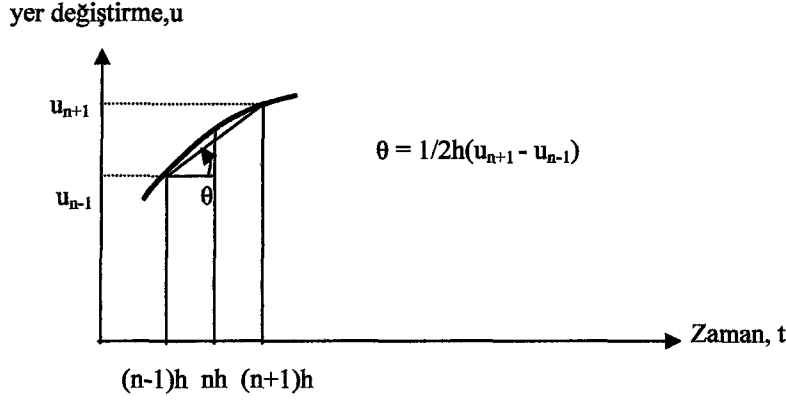
Bu yöntem, yer değiştirmenin zamana göre türevleri ile ilişkilidir. Bunlar seçilmiş zaman aralıklarındaki yer değiştirmelerin hız ve ivme ile olan ilişkisi gibi düşünülebilir [1]. Hız ifadesi aşağıdaki formüldeki gibi gösterilir.

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2h}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (2.35)$$

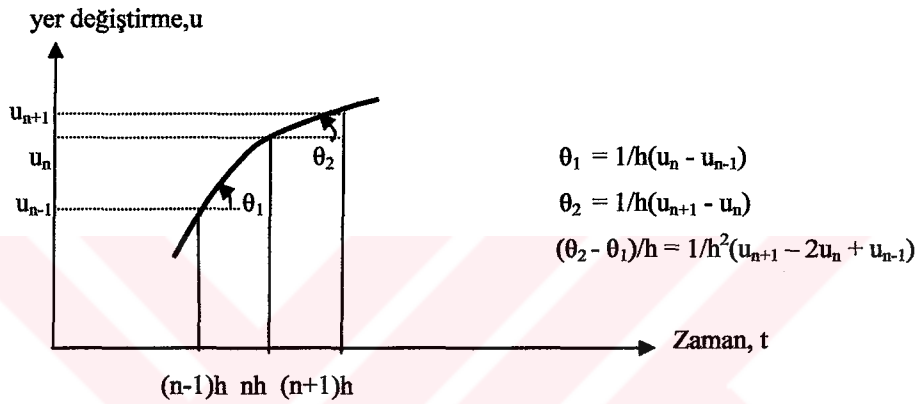
İvme için kullanılan merkez fark ifadesi ise;

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{h^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (2.36)$$

Formüllerin grafik gösterimleri Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'deki gibidir.



şekil 2.6 Merkez fark yöntemi (hız tespiti)



şekil 2.7 Merkez fark yöntemi (ivme tespiti)

(n) zaman noktasındaki hareket denklemini aşağıdaki formda yazılabilir.

$$m\ddot{u}_n + c\dot{u}_n + ku_n = p_n \quad (2.37)$$

(2.35) ve (2.36) denklemleri (n) zaman noktasındaki (2.37) hareket denkleminde yerlerine yazılırsa, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\left(\frac{1}{h^2}m + \frac{1}{2h}c\right)u_{n+1} = p_n + \left(-k + \frac{2}{h^2}m\right)u_n + \left(\frac{1}{2h}c - \frac{1}{h^2}m\right)u_{n-1} \quad (2.38)$$

Zaman integrasyonuna başlayabilmek için u_0 ve u_{-1} değerleri gereklidir (2.35) ve (2.36) denklemleri ($t=0$) anı için yazılır ve ortak olarak çözülürse; u_{-1} için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$u_{-1} = u_0 + \frac{h^2}{2}\ddot{u}_0 - hu_0 \quad (2.39)$$

Düzenli olan bir problemde, üç parametrenin $u_0, \dot{u}_0, \ddot{u}_0$ iki tanesi verilir. Üçüncü parametre, hareket denkleminin ($t=0$) zamanı için yazılması ve verilen değerlerin yerlerine konularak denklemin çözülmesinden elde edilir.

Buraya kadar incelenen merkez fark yöntemi dışındaki bütün metotlarda, üç denklemden bir tanesi olan hareket denklemi ($t=n+1$) zaman noktası için yazılmaktaydı. merkez fark yönteminde ise hareket denklemi ($t=n$) zaman noktası için yazılır. Bir metotta ($n+1$) zaman noktası için yazılan hareket denklemi kullanılıyorsa; kapalı(implicit) integrasyon yöntemi, (n) zaman noktası için yazılan hareket denklemi kullanılıyorsa; açık(explicit) integrasyon yöntemi adını alır [1]. Çok serbestlik dereceli sistemlerde, kapalı(implicit) integrasyon yöntemini kullanmak açık(explicit) integrasyon yöntemine göre daha çok hesaplama gerektirir.

2.7 Houbolt Yöntemi

Houbolt yöntemi yer değiştirmenin zamana göre türevlerini temsil etmek için fark işlemini kullanan bir başka örnektir. Hız ve ivme için ifadeleri bulmak için iki adım geriye yönelmiş fark işlemini içerir [2]. Hız ve ivme ifadesi aşağıdaki formdadır.

$$\dot{u}_{n+1} = a_1 u_{n-2} + a_2 u_{n-1} + a_3 u_n + a_4 u_{n+1} \quad (2.40)$$

$$\ddot{u}_{n+1} = b_1 u_{n-2} + b_2 u_{n-1} + b_3 u_n + b_4 u_{n+1} \quad (2.41)$$

Bu denklemlerdeki sabitler, (u) yerine sırasıyla ($1, t, t^2, t^3$) yazılarak bulunur. Bu durumda hız ifadesi;

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{1}{6h} (-2u_{n-2} + 9u_{n-1} - 18u_n + 11u_{n+1}) \quad (2.42)$$

şeklinde bulunur. İvme ifadesi ise;

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{h^2} (-u_{n-2} + 4u_{n-1} - 5u_n + 2u_{n+1}) \quad (2.43)$$

şeklindedir. Houbolt yönteminde kullanılan üçüncü ifade ise; hareket denkleminin

$t = (n+1)h$ noktası için yazılmasıyla bulunur. (2.42), (2.43) denklemleri ve $(n+1)$ zaman anında yazılmış olan (2.8) hareket denkleminin birlikte çözülmesiyle aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} \left(\frac{2}{h^2}m + \frac{11}{6h}c + k\right)u_{n+1} = p_{n+1} + m\left(\frac{5}{h^2}u_n - \frac{4}{h^2}u_{n-1} + \frac{1}{h^2}u_{n-2}\right) \\ + c\left(\frac{3}{h}u_n - \frac{3}{2h}u_{n-1} + \frac{1}{3h}u_{n-2}\right) \end{aligned} \quad (2.44)$$

(2.44) denkleminde görüldüğü gibi; u_0 , u_1 ve u_2 değerlerinin, zaman integrasyonuna başlamadan önce bilinmesi gerekir. u_0 yer değiştirmesi verilir, u_1 ve u_2 değerleri daha önce anlatılan metotlardan bir tanesi ile hesaplanabilir. Örnek olarak ortalama ivme metodu veya doğrusal ivme metodu kullanılabilir. Houbolt yöntemi, kapalı(implicit) integrasyon tekniği düzenindedir ve her koşulda stabil bir yöntemdir [2].

2.8 Bossak-Newmark Metodu

Bossak-Newmark metodu, önceki kısımlarda üstünde durulan Newmark metodunun genişletilmiş şeklidir. Yalnızca yüksek modlarda ortaya çıkacak stabilite bozukluğunu kontrol etmek için ek bir parametre eklenmiştir. Dolayısı ile üç parametreye sahip bir ifade elde edilir. Sistemin hareket denklemini çözmek için, Bossak tarafından öne sürülen fark denklemleri aşağıdaki gibidir [3].

$$\begin{aligned} \dot{u}_{n+1} &= \dot{u}_n + h(1-\gamma)\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} \\ u_{n+1} &= u_n + h\dot{u}_n + h^2\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{u}_n + h^2\beta\ddot{u}_{n+1} \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$(1-\alpha)m\ddot{u}_{n+1} + \alpha m\ddot{u}_n + c\dot{u}_{n+1} + ku_{n+1} = p_{n+1}$$

Buradaki ilk iki denklem Newmark metodundaki hız ve yer değiştirme ifadesiyle aynıdır. Aradaki fark üçüncü yani hareket denkleminde. Hareket denklemindeki (α) parametresi sıfır olduğunda iki metodunda denklemleri aynı olacaktır.

2.9 Hilber, Hughes, Taylor Metodu

Bu yöntemde Newmark metodunun bir çeşitidir. Hız ve yer değiştirme denklemleri Newmark metodunda kullanılan denklemlerle aynıdır. Fakat sistemin hareket denkleminde bir dağıtıcı λ katsayısı kullanılır. Bu durumda tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem için kullanılacak denklemler aşağıdaki gibidir [3].

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + h(1-\gamma)\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1}$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + h^2\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{u}_n + h^2\beta\ddot{u}_{n+1} \quad (2.46)$$

$$m\ddot{u}_{n+1} + (1+\lambda)ku_{n+1} - \lambda ku_n = p_{n+1}$$

Denklemlerden görüldüğü gibi $\lambda=0$ olması durumunda bu metod Newmark metoduyla aynıdır. Başlangıçta hız , ivme ve yer değiştirme değerlerinin bilinmesi gerekir

3. İNTEGRASYON YÖNTEMİNİN DOĞRULUĞU VE STABİLİTESİ

3.1 Sayısal İntegrasyon Yöntemlerinde Hatalar

Diferansiyel denklemlerin örneğin hareket denkleminin sayısal integrasyonunda hatalar üç sınıfa ayrılabilir.

- Küçük zaman adımı kullanımından kaynaklanan yuvarlatma hataları
- u_{n+1} ve u'_{n+1} parametrelerinin Taylor serisi açılımında sonlu sayıda terimle temsil edilmesinden kaynaklanan kesme hataları.
- Diferansiyel denklemin yerine sonlu fark kullanımından kaynaklanan hataların yayılması.

Bu kısımda yuvarlatma hataları detaylı bir şekilde incelenmeyecektir. Bunlar doğal olarak rasgele olduklarından dolayı, istatistiksel yöntemler uygulanmalıdır. Bilgisayar hesaplamalarında, yüksek hassasiyet kullanarak genellikle yuvarlatma hatalarını azaltmak mümkündür.

Kesme hataları her adımda mevcuttur. Her koşulda kararlı integrasyon yöntemi kullanılmadığı sürece, kesme hataları sayısal integrasyonun doğruluğunun belirlenmesinde iyi bir göstergedir. Bu yüzden kesme hata terimleri değişik integrasyon metotlarının göreceli doğruluğunun belirlenmesi için kullanışlı bir kriter sağlar.

Sönümsüz serbest titreşim denklemini göz önüne alınarak kesme hatası hakkında fikir sahibi olunabilir. Ayrıca sönümsüz serbest titreşim problemi stabilite analizinde test problemi olarak kullanılır.

$$\ddot{u} + \omega^2 u = 0 \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminin çözüm cinsi

$$u = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t \quad (3.2)$$

şeklindedir. Burada C_1 ve C_2 integrasyonun iki sabitidir. kesme hata terimi aşağıdaki formdadır.

$$Ch^p u^{(p)}(\xi) \quad (3.3)$$

Burada C sabittir. (3.3) denkleminde u parametresinin p 'inci türevi bir $(\omega h)^p$ çarpanı içermektedir. Bu yüzden hata terimini büyüklüğü $(\omega h)^p$ değerine dayanır. Açıkta ki kesme hatasını küçük tutmak için, zaman aralığı olan (h) değeri, ωh çarpım değeri birden küçük olacak şekilde seçilmelidir.

3.2 İntegrasyon Metodunun Stabilitesi

Sistemin serbest titreşimi göz önüne alındığında, tüm integrasyon yöntemlerinde n . adımda bilinen ivme, hız ve yer değiştirme değerleri, aşağıdaki gibi, U_n vektörüyle gösterilirse

$$U_n = \begin{bmatrix} u_n \\ \dot{u}_n \\ \ddot{u}_n \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$U_{n+1} = [A]U_n \quad (3.5)$$

$(n+1)$. Adımdaki büyüklüklere geçiş (3.5) deki gibi olmaktadır. $[A]$ matrisi kat kütleleri, kolon rijitlikleri ve zaman adımının bir fonksiyonu olup, integrasyon operatörü adını almaktadır.

$$U_1 = [A]U_0 \quad (3.6)$$

$$U_2 = [A]U_1 = [A]^2 U_0 \quad (3.7)$$

.....

.....

$$U_n = [A]U_{n-1} = [A]^n U_0 \quad (3.8)$$

İntegrasyonda (3.6), (3.7), (3.8) denklemlerinden de görüleceği gibi, her adımda bu operatörün kuvvetleri alınmaktadır. λ operatörün öz değerleri olmak üzere integrasyonun stabil olma koşulu aşağıda gösterildiği gibi;

$$\rho = \max|\lambda_A| \quad (3.9)$$

$$\rho < 1 \quad (3.10)$$

olduğunda integrasyon stabildir. Burada λ_A en büyük öz değerdir.

3.3 Stabilité Koşullarının Tesbit Edilmesi

3.3.1 Newmark Metodu

Tek serbestlik dereceli sönümsüz, serbest titreşim denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ddot{u}_{n+1} + \omega^2 u_{n+1} = 0 \quad (3.11)$$

Aynı şekilde daha önceki bölümlerde anlatılan Newmark denklemleri;

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + h(1-\gamma)\ddot{u}_n + \gamma h\ddot{u}_{n+1} \quad (3.12)$$

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + h^2\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{u}_n + h^2\beta\ddot{u}_{n+1} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılırsa, bu üç denklemden (n+1) zamanındaki davranış ile (n) zamanındaki davranış arasındaki ilişki kolaylıkla kurulabilir.

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ \dot{u}_{n+1} \\ \ddot{u}_{n+1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_n \\ \dot{u}_n \\ \ddot{u}_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Burada A matrisi;

$$A = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} 1 & h & \left(\frac{1}{2}-\beta\right)h^2 \\ -\gamma\omega^2 h & 1-(\gamma-\beta)\omega^2 h^2 & \left[1-\gamma-\left(\frac{1}{2}\gamma-\beta\right)h^2\omega^2\right]h \\ -\omega^2 & -\omega^2 h & -\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\omega^2 h^2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Ve $B = 1 + \beta\omega^2 h^2$ dir Bu integrasyon algoritması, $\gamma \geq \frac{1}{2}$ ve $\beta \geq \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} + \gamma\right)^2$ olduğunda her koşulda stabildir [3].

3.3.2 Wilson θ Yöntemi

(n+1) zamanındaki sönümlü serbest titreşim denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\ddot{u}_{n+1} + 2\xi\omega \dot{u}_{n+1} + \omega^2 u_{n+1} = 0 \quad (3.16)$$

(3.16) denklemini ve Wilson yönteminde kullanılan ivme, hız, yer değiştirme sırasıyla (2.30), (2.31), (2.32) denklemleri kullanılarak, (n+1) zamanındaki davranış ile (n) zamanındaki davranış arasındaki ilişki aşağıdaki gibi kurulabilir.

$$U_{n+1} = [A]U_n \quad (3.17)$$

burada $u_n^T = \left[u_n \quad \dot{u}_n h \quad \ddot{u}_n h^2 \right]$ formundadır. Bu durumda A matrisi;

$$A = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \theta + \frac{\omega^2 h^2}{6}(\theta^3 - 1) & \theta + \frac{\theta\omega^2 h^2}{6}(\theta^2 - 1) & \left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{6}\right) + \frac{\theta^2\omega^2 h^2}{12}(\theta - 1) \\ + \theta^2\xi\omega h & + \xi\omega h(\theta^2 - \frac{1}{3}) & + \theta\xi\omega h\left(\frac{\theta}{2} - \frac{1}{3}\right) \\ - \frac{\omega^2 h^2}{2} & \theta + \frac{\theta\omega^2 h^2}{6}(\theta^2 - 3) & \left(\theta - \frac{1}{2}\right) + \frac{\theta^2\omega^2 h^2}{12}(2\theta - 3) \\ - \omega^2 h^2 & + \xi\omega h(\theta^2 - 1) & + \xi\omega h\theta(\theta - 1) \\ & - \theta\omega^2 h^2 - 2\xi\omega h & \left(\theta - 1\right) + \frac{\theta^2\omega^2 h^2}{6}(\theta - 3) \\ & & + \xi\omega h\theta(\theta - 2) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

şeklinde bulunur [2]. Burada $D = \theta + \theta^2\xi\omega h + \frac{1}{6}\theta^3\omega^2 h^2$ dir. Bilindiği gibi yöntemin stabil olabilmesi için, sönümsüz durumda A matrisinin üç tane kökünün de mutlak değerce birden küçük olması gerekmektedir. Bu durum ($\theta > 1.37$) olduğunda sağlanır.

3.3.3 Merkez Fark Yöntemi

Tek serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşim olması durumunda, Merkez Fark Yöntemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ u_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_n \\ u_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Burada A matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} 2 - \omega^2 h^2 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

A matrisinin öz değerleri incelendiğinde integrasyon algoritması, sadece ($h \leq 2/\omega$) olduğunda stabildir. Burada ω sistemin frekansıdır.

3.3.4 Houbolt Yöntemi

Tek serbestlik dereceli sönümsüz, serbest titreşim denklemini aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\ddot{u}_{n+1} + \omega^2 u_{n+1} = 0 \quad (3.21)$$

Houbolt yönteminde kullanılan hız ve ivme ifadesi,

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{1}{6h} (-2u_{n-2} + 9u_{n-1} - 18u_n + 11u_{n+1}) \quad (3.22)$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{h^2} (-u_{n-2} + 4u_{n-1} - 5u_n + 2u_{n+1}) \quad (3.23)$$

şeklinde. Bu üç denklemden ($n+1$) zamanındaki davranış ile (n) zamanındaki davranış arasındaki ilişki

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ u_n \\ u_{n-1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_n \\ u_{n-1} \\ u_{n-2} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} 5\mu & -4\mu & \mu \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{ve } \mu = \frac{1}{2 + \omega^2 h^2} \text{ dir} \quad (3.25)$$

Houbolt yöntemi her koşulda stabildir.

3.3.5 Bossak Newmark Metodu

Bossak tarafından önerilen tek serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşim denklemi ve Newmark yöntemi hız ve ivme denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$(1-\alpha)\ddot{u}_{n+1} + \alpha\ddot{u}_n + \omega^2 u_{n+1} = 0 \quad (3.26)$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{\beta h^2}(u_{n+1} - u_n) - \frac{1}{\beta h}\dot{u}_n - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_n \quad (3.27)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{\gamma}{\beta h}(u_{n+1} - u_n) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{u}_n + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)h\ddot{u}_n \quad (3.28)$$

bu üç denklemden (n+1) zamanındaki davranış ile (n) zamanındaki davranış arasındaki ilişki;

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ \dot{u}_{n+1} \\ \ddot{u}_{n+1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_n \\ \dot{u}_n \\ \ddot{u}_n \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

şeklinde kurulabilir. Burada A matrisi;

$$A = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} 1-\alpha & (1-\alpha)h & \left(\frac{1}{2}-\beta-\frac{\alpha}{2}\right)h^2 \\ -\gamma\omega^2 h & -\alpha + (\beta-\gamma)\omega^2 h^2 & [1-\gamma-\alpha + (\beta-\frac{1}{2}\gamma)h^2\omega^2]h \\ -\omega^2 & -\omega^2 h & -\alpha - \left(\frac{1}{2}-\beta\right)\omega^2 h^2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Şeklindedir. ve $B = 1 + \beta\omega^2 h^2 - \alpha$ dir. Bu integrasyon algoritması, $\gamma \leq \frac{1}{2}$;

$\beta \geq \frac{\gamma}{2} \geq \frac{1}{4}$; $\alpha + \gamma \geq \frac{1}{2}$ olduğunda her koşulda stabildir [3].

3.3.6 Hilber, Hughes, Taylor Metodu

Bu yöntem için kullanılan tek serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşim denklemi ve Newmark yöntemi hız ve ivme denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\ddot{u}_{n+1} + (1+\lambda)\omega^2 u_{n+1} - \lambda\omega^2 u_n = 0 \quad (3.31)$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{\beta h^2}(u_{n+1} - u_n) - \frac{1}{\beta h} \dot{u}_n - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_n \quad (3.32)$$

$$\dot{u}_{n+1} = \frac{\gamma}{\beta h}(u_{n+1} - u_n) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_n + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) h \ddot{u}_n \quad (3.33)$$

Bu üç denklemden (n+1) zamanındaki davranış ile (n) zamanındaki davranış arasındaki ilişki;

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ \dot{u}_{n+1} \\ \ddot{u}_{n+1} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_n \\ \dot{u}_n \\ \ddot{u}_n \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

şeklinde kurulabilir. Burada A matrisi;

$$A = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 + \lambda \beta \omega^2 h^2 & h & \left(\frac{1}{2} - \beta\right) h^2 \\ -\gamma \omega^2 h & 1 - (1 + \lambda)(\gamma - \beta) \omega^2 h^2 & [1 - \gamma - (1 + \lambda)\left(\frac{1}{2} \gamma - \beta\right) h^2 \omega^2] h \\ -\omega^2 & -(1 + \lambda) \omega^2 h & -(1 + \lambda) \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \omega^2 h^2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

şeklinde ve $D = 1 + (1 + \lambda) \beta \omega^2 h^2$ dir. Bu integrasyon algoritması, λ parametresinin pozitif değerleri için fazla efektif değildir. Hilber, Hughes ve Taylor Yöntemi λ parametresinin negatif değerleri için önerilmektedir. λ parametresinin negatif değerleriyle, diğer iki parametrenin uygun değerlerini birleştirerek, tek bir parametreye dayanan efektif bir algoritma elde edilebilir. Örneğin $\beta = \frac{1}{4}(1 - \lambda)^2$, $\gamma = \frac{1}{2} - \lambda$ ve $-\frac{1}{3} \leq \lambda \leq 0$ değerleri için, her koşulda stabil bir algoritma elde edilir [3,5].

3.4 Zaman Aralığı Seçimi

Hareket denkleminin sayısal integrasyonunda uygun zaman adımı seçimi, prosedürün doğruluğu bakımından önemlidir. Hassasiyet açısından bakıldığında çok geniş zaman adımları tatmin edici sonuçlar vermez. Diğer taraftan çok küçük zaman adımları kullanmak, hesaplama zahmeti gerektirir ve yuvarlatma hatalarını artırır. Sistemin doğal periyodu ile birlikte uyarıcı kuvvetin karakteristikleri, seçilecek zaman

adımında etkili olan faktörlerdir. Geçtiğimiz bölümde üzerinde durulan, metotlardaki kesme hataları, (ωh) değerinin birden küçük olması durumunda; bu hataların, sınırın altında kalacağını göstermiştir. Aynı zamanda bu değer (h/T) değerinin 0.16 dan küçük olması demektir. Genel olarak kabul edilebilir hassasiyete doğal periyodun onda birine eşit zaman adımı (h) değeriyle ulaşılabilir [6].

Sayısal integrasyon uyarıcı fonksiyonun seçilen eşit zaman aralıklarında gösterimini de içerir. Eğer fonksiyon harmonik bileşenlerin süperpozisyonu şeklinde gösterilmişse, bu bileşenlerden en küçük periyoda sahip olan bileşenin periyodunun onda biri büyüklüğünde zaman adımı seçimi yeterli olacaktır. Genel olarak zaman adımı büyüklüğü uyarıcı kuvvet incelenerek de belirlenebilir.

Sayısal integrasyon prosedürünün hassasiyetini belirlemek için, birbirine yakın olan iki farklı zaman adımı, davranış hesaplamalarında kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir. Eğer kısa zaman adımından elde edilen sonuç geniş zaman adımından elde edilen sonuçtan çok farklı değilse proses doğru olarak kabul edilebilir. Sayısal analiz kısmında Pülümür Depremi(NS) iki farklı zaman adımıyla incelenmiştir.

4. ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN İNCELENMESİ

4.1 Hareket Denkleminin Doğrudan İntegrasyonu

Doğrudan integrasyon yöntemi çok serbestlik dereceli sistemlerde, hareket denkleminin bileşik olduğu durumlarda denklemi çözmek için kullanılmak zorundadır. Hatta denklemin bileşik durumdan ayrıklaştırılmasının mümkün olduğu durumlarda bile, Sönüm matrisinin bulunması ve davranışın sıfırdan başlamak üzere sadece birkaç zaman aralığında hesaplanmasına ihtiyaç duyulması koşuluyla, doğrudan integrasyon yöntemi çözüm için çok etkili metot olabilmektedir.

Sonucun kabul edilebilir hassasiyette olmasını sağlamak için, integrasyonda kullanılan zaman aralığı yeteri kadar küçük olmalıdır. Bazı metotlar sonuçların stabilitesini sağlamak için ek bir sınırlama getirirken, bazı metotlarda her koşulda kararlı sonuçlar vermektedir. Yinede bir integrasyon yöntemi sadece koşullu kararlı olsa da stabiliteyi sağlamak için zaman aralığına getirilen sınırlamanın boyutu çok büyük değildir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesinde durum biraz değişiktir ve stabilite koşullarının sağlanmasına çok dikkat edilmelidir.

Önceki kısımlardan da görüldüğü gibi, her koşulda stabil integrasyon tekniği kullanıldığı zaman seçilen zaman aralığı yüksek modların herhangi birinin periyodundan oldukça büyük olabilir. Stabilite kriteri, çok serbestlik dereceli sistemlerde integrasyon tekniğinin seçiminde büyük rol oynadığı için bu teknikleri iki kategoride incelemek uygun olacaktır [2].

- Kapalı(Implicit) integrasyon teknikleri; bazıları her koşulda stabil
- Açık(Explicit) integrasyon teknikleri; sadece koşullu stabil

İki kategoriye ait daha çok sıklıkta karşılaşılan teknikler, ilerdeki kısımlarda incelenecektir.

4.2 Kapalı(Implicit) İntegrasyon Tekniği

Tek serbestlik dereceli bir sistem için üç denklem, üç bilinmeyi belirlemek için gereklidir. Buradaki üç bilinmeyen ivme, hız ve yer değiştirmedir. Bu denklemlerden iki tanesi genellikle davranış parametrelerinin zaman adım aralığındaki değişiminde yapılan kabullerden elde edilir. Üçüncü denklem ise seçilen herhangi bir zaman noktasındaki hareket denklemdir. Eğer bu zaman noktası içinde bulunan zamanı temsil ediyorsa; bu integrasyon metodu açık(explicit) integrasyon tekniğidir. Diğer taraftan eğer hareket denkleminde bulunan zamandan bir sonraki adım için yazılmışsa, kapalı(implicit) integrasyon tekniğidir. Benzer sınıflandırma çok serbestlik dereceli sistemler içinde uygulanabilir. Fakat bu durumda tek serbestlik dereceli sistemlerin skaler denklemleri matris denklemleri halini alır Kapalı İntegrasyon tekniğinde çözülecek olan (n+1) zamanındaki yer değiştirme vektörünü bulan denklem takımında (K) rijitlik çarpanı da bulunur. İlerdeki bölümlerde, kapalı(implicit) integrasyon tekniği ile düzenlenmiş daha çok sıklıkla karşılaşılan yöntemler incelenecektir.

4.2.1 Ortalama İvme Yöntemi

Bu metot ivmenin, sistemin her bir koordinatı boyunca küçük zaman aralıklarında sabit kaldığı varsayımına dayanır ve ivmenin değerı aralığın başlangıcındaki değerıyla sonundaki değerın ortalaması olarak alınır. (n) ve (n+1) zamanındaki davranış parametreleri arasındaki ilişki skaler durumla benzerdir

$$\ddot{U}_{n+1} = \frac{4}{h^2}(U_{n+1} - \dot{U}_n h - U_n) - \ddot{U}_n \quad (4.1)$$

$$\dot{U}_{n+1} = \frac{2}{h}(U_{n+1} - U_n) - \dot{U}_n \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{4}{h^2}M + \frac{2}{h}C + K\right)U_{n+1} = P_{n+1} + \left(\frac{4}{h^2}U_n + \frac{4}{h}\dot{U}_n + \ddot{U}_n\right)M + \left(\frac{2}{h}U_n + \dot{U}_n\right)C \quad (4.3)$$

(4.3) denklemi U_{n+1} için çözüldür ve bulunan değerler (4.1) ve (4.2) denklemlerinde yerine yazılırsa; sırasıyla \ddot{U}_{n+1} , \dot{U}_{n+1} bulunur. Açıkça görüldüğü gibi; U_{n+1} için çözüm yapılabilmesi için (4.3) denkleminin sol tarafında (K) rijitlik çarpanına ihtiyaç vardır. ortalama ivme yöntemi her koşulda stabil olduğu için çok sayıda serbestlik derecesine sahip sistemlerin hareket denklemlerinin integrasyonu için uygundur.

4.2.2 Doğrusal İvme Yöntemi

Sistemin herhangi bir koordinatı boyunca uzanan ivmenin küçük zaman aralıklarında doğrusal olarak değiştiği varsayımına dayanır. Davranış parametreleri arasındaki ilişki skaler olan denklemlerle benzerdir.

$$\ddot{U}_{n+1} = \frac{6}{h^2}(U_{n+1} - U_n - h\dot{U}_n - \frac{h^2}{3}\ddot{U}_n) \quad (4.4)$$

$$\dot{U}_{n+1} = \frac{3}{h}(U_{n+1} - U_n) - 2\dot{U}_n - \frac{1}{2}h\ddot{U}_n \quad (4.5)$$

$$\left(\frac{6}{h^2}M + \frac{3}{h}C + K\right)U_{n+1} = P_{n+1} + \left(\frac{6}{h^2}M + \frac{3}{h}C\right)U_n + \left(\frac{6}{h}M + 2C\right)\dot{U}_n + \left(2M + \frac{h}{2}C\right)\ddot{U}_n \quad (4.6)$$

(4.6) denklemi U_{n+1} için çözülür ve bulunan değerler (4.4) ve (4.5) denklemlerinde yerine yazılırsa; sırasıyla \ddot{U}_{n+1} , \dot{U}_{n+1} bulunur. ortalama ivme yönteminde olduğu gibi; U_{n+1} için çözüm yapılabilmesi için (4.6) denkleminin sol tarafında (K) rijitlik çarpanına ihtiyaç vardır. doğrusal ivme yöntemi sadece koşullu stabildir ve stabilite koşulu; zaman adımı olan (h) değeri; en yüksek modun periyodundan (0.55) kat küçük olmalıdır [2].

4.2.3 Wilson-θ Yöntemi

Wilson θ Metodu; ivmenin, genişletilmiş (θh) zaman aralığında, doğrusal olarak değiştiği kabulüne dayanır. Kullanılacak olan bağıntılar skaler durumla benzerdir.

$$\ddot{U}_{n+\theta} = \frac{6}{(\theta h)^2} \left[U_{n+\theta} - U_n - \theta h \dot{U}_n - \frac{(\theta h)^2}{3} \ddot{U}_n \right] \quad (4.7)$$

$$\dot{U}_{n+\theta} = \frac{3}{\theta h} (U_{n+\theta} - U_n) - 2\dot{U}_n - \frac{1}{2}\theta h \ddot{U}_n \quad (4.8)$$

$$\left[\frac{6}{(\theta h)^2} M + \frac{3}{\theta h} C + K \right] U_{n+\theta} = P_{n+\theta} + M \left[\frac{6}{(\theta h)^2} U_n + \frac{6}{\theta h} \dot{U}_n + 2\ddot{U}_n \right] + C \left[\frac{3}{\theta h} U_n + 2\dot{U}_n + \frac{\theta h}{2} \ddot{U}_n \right] \quad (4.9)$$

İvmenin, (n)h zamanından (n+θ)h zamanına kadar olan aralıkta doğrusal olarak değiştiği kabulü yapıldığı için, aynı zaman aralığında uyarıcı kuvvet vektöründe de doğrusal değiştiği kabulü yapılır. Bu yüzden $P_{n+\theta}$ vektörü

$$P_{n+\theta} = P_n + \frac{1}{h}(P_{n+1} - P_n)(\theta h) = P_n(1 - \theta) + P_{n+1}\theta \quad (4.10)$$

şeklinde bulunur. bulunan bu vektör (4.9) eşitliğinde kullanılarak, eşitlikten $U_{n+\theta}$ vektörü hesaplanır. $U_{n+\theta}$ vektörü (4.7) denkleminde yerine yazılarak $\ddot{U}_{n+\theta}$ vektörü hesaplanır. Genişletilmiş zaman aralığında bulunmuş olan $\ddot{U}_{n+\theta}$ ivme vektörü kullanılarak (n+1) noktasındaki ikinci türev yani ivme;

$$\ddot{U}_{n+1} = \ddot{U}_n + (\ddot{U}_{n+1} - \ddot{U}_n) \frac{1}{\theta} \quad (4.11)$$

şeklinde bulunur. Bulunan vektör, doğrusal ivme yönteminde kullanılır;

$$\dot{U}_{n+1} = \frac{1}{2}h(\ddot{U}_{n+1} + \ddot{U}_n) + \dot{U}_n \quad (4.12)$$

$$U_{n+1} = \frac{1}{3}h^2\ddot{U}_n + \frac{1}{6}h^2\ddot{U}_{n+1} + \dot{U}_n h + U_n \quad (4.13)$$

(4.12) ve (4.13) denklemlerinde yerine konularak U_{n+1} ve \dot{U}_{n+1} değerleri hesap edilir. Wilson-θ yöntemi $\theta > 1,37$ olduğunda her koşulda stabil bir metottur

4.3 Açık(Explicit) İntegrasyon Tekniği

Prensip olarak Açık(explicit) integrasyon tekniği, Kapalı(implicit) integrasyon tekniği ile benzerdir. Ancak ikisinin arasındaki en belirgin fark; Açık(Explicit) integrasyon tekniğinde hareket denklemi (n+1) zamanı için değil de, bir önceki (n) zaman noktası için yazılır.

4.3.1 Merkez Fark Yöntemi

Açık integrasyon tekniğinin en sık kullanılan yöntemi merkez fark yöntemidir. Bu metotta tek serbestlik dereceli sistemler için elde edilmiş bağıntılardaki skaler değerlerin yerini matrisler alır.

$$\dot{U}_n = \frac{1}{2h}(U_{n+1} - U_{n-1}) \quad (4.14)$$

$$\ddot{U}_n = \frac{1}{h^2}(U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1}) \quad (4.15)$$

$$\left(\frac{1}{h^2}M + \frac{1}{2h}C\right)U_{n+1} = P_n + \left(-K + \frac{2}{h^2}M\right)U_n + \left(\frac{1}{2h}C - \frac{1}{h^2}M\right)U_{n-1} \quad (4.16)$$

Zaman integrasyonuna başlayabilmek için U_0 ve U_{-1} vektörlerine ihtiyacımız vardır. (4.14) ve (4.15) denklemleri ($t=0$) anı için yazılır ve ortak olarak çözülürse; U_{-1} için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$U_{-1} = U_0 + \frac{h^2}{2}\ddot{U}_0 - h\dot{U}_0 \quad (4.17)$$

(n+1) zamanındaki yer değiştirme vektörü (4.16) denklemi çözülerek elde edilebilir. Ayrıca bir önemli noktaya da dikkat çekmek gerekir, eşitliğin sol tarafında (K) rijitlik çarpanı olmadığı için, Eğer kütle matrisi diyagonal ve sönüm matrisi ihmal edilebilir veya sönüm matrisi kütle orantılı olduğunda; (4.16) denkleminde herhangi bir sistem denklemi çözümüne ihtiyaç duyulmaz

Merkez fark yöntemi sadece koşullu stabildir ve stabilite koşulu; zaman aralığı olan (h) değeri, (T/π) den küçük olmalıdır. Bazen bu durum, gereğinden fazla kısıtlayıcı olabilmektedir. Ancak yine de bu kısıtlayıcı durumlarda en yüksek modun periyodu çok küçük değilse, stabilite koşulu makul zaman aralıklarında sağlanır [2]. merkez fark yöntemi hesaplama pratikliği bakımından en uygun metottur.

5. DOĞRUDAN İNTEGRASYONDA KARMA YÖNTEMLER

5.1 Karma Yöntemlerin Genel Özellikleri

Hesaplama açısından önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi; açık(explicit) integrasyon tekniği daha kullanışlıdır. Özellikle kütle matrisinin diyagonal ve sönüm matrisinin ihmal edilebilir veya kütle orantılı olduğu durumlarda, integrasyon düzeni sistem denklemlerinin çözülmesine ihtiyaç duymamaktadır. Bunun aksine kapalı(implicit) integrasyon tekniğinde kaçınılmaz olarak sistem denklem takımı çözülmelidir. Büyük bir sistem için hesaplanabilme kolaylığı çözüm için önemlidir. Ancak hesaplanabilme kolaylığına karşın, açık(explicit) integrasyon tekniği her zaman hareket denklemlerinin integrasyonunda kullanılamaz. Bunun nedeni açık(explicit) integrasyon tekniğinin, sadece koşullu stabil olmasıdır. İntegrasyonda seçilen zaman adımı en yüksek modun periyoduna bağlı olarak değişir. Binlerce serbestlik derecesine sahip olan büyük sistemlerde, en yüksek modun periyodu çok küçük olacaktır. Buna bağlı olarak stabiliteyi sürdürmek için seçilen zaman adımı, integrasyon açısından pratik olmaktan çok uzaktır. Açıkça görüldüğü gibi böyle durumlarda integrasyon, her koşulda stabil olan integrasyon metotlarıyla yapılmak zorundadır.

Dinamik davranışı hesaplamakla ilişkili birçok mühendislik probleminde, sistem birçok bileşen veya alt yapı parçalarından oluşmaktadır. Rijit bileşen ve rijit bileşene göre daha esnek bileşen. Örnek olarak toprak yapı akışkan yapı etkileşim problemi. Toprak veya akışkan bileşen, yapı ile karşılaştırıldığında daha esnek davranış gösterir. Esnek bileşenin en yüksek modunun periyodu, yapının en yüksek modunun periyoduna göre belirgin bir ölçüde büyük olacağı açıktır.

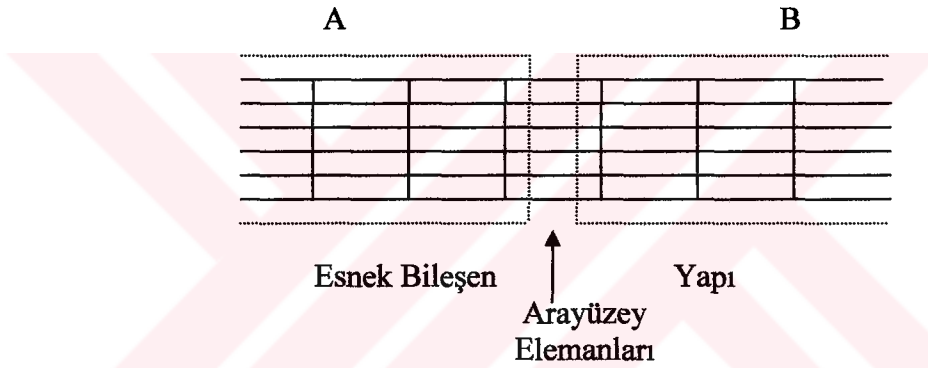
Eğer bileşik olan sistemin integrasyonunda açık integrasyon tekniği kullanılacaksa, stabilite koşulu ve dolayısıyla integrasyon için seçilecek zaman adımı rijit yapının en yüksek modunun periyodundan kuvvetli bir şekilde etkilenecektir ve dolayısıyla açık(explicit) integrasyon tekniği pratik olmaktan uzaklaşır. Böyle durumlarda hesaplama etkinliğini geliştirmek için iki farklı yöntem bir arada kullanılabilir.

Yani iki farklı integrasyon tekniği iki farklı bileşen için kullanılır. Bir tanesi akışkan veya toprak bileşen ötekisi yapı için kullanılır. Genellikle aşağıdaki iki farklı kombinasyondan yararlanır [2].

1. **E – I** Açık(explicit) integrasyon esnek bileşende, kapalı(implicit) integrasyon rijit yapıda, aynı zaman adımı ikisi içinde esas alınır
2. **E – E^R** Her ikisinde de, bileşen ve yapıda, açık(explicit) integrasyon; esnek bileşende (h) zaman adımı, rijit bileşende (h/R) zaman adımı kullanılır.

5.2 E-I Açık(Explicit)-Kapalı(Implicit) İntegrasyon Tekniği

Yapı ve bileşenden oluşan sistem, Şekil 5.1’de görüldüğü gibi sonlu sayıda parçalara ayrılabilir.



Şekil 5.1 Karma sistemin sonlu eleman gösterimi

A ile gösterilen noktalar bileşen parçaya ait ve B ile gösterilen noktalar yapıya ait olsun. Ara kısımda A' nin birçok noktası B' nin birçok noktası ile ara yüzey elemanları vasıtasıyla birleşmiştir. Bu ara yüzey elemanlarının yapıya mı yoksa bileşene mi ait olduğu önemli değildir. Bu durumda hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} M_{AA} & 0 \\ 0 & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_A \\ \ddot{U}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{AA} & 0 \\ 0 & C_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_A \\ P_B \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Matris formunda yazılmış olan (5.1) denklemi açık olarak, birinci denklem (n) zaman noktasında ve ikinci denklem (n+1) zaman noktasında yazılırsa, aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$M_{AA}\ddot{U}_A^n + C_{AA}\dot{U}_A^n + K_{AA}U_A^n + K_{AB}U_B^n = P_A^n \quad (5.2a)$$

$$M_{BB}\ddot{U}_B^{n+1} + C_{BB}\dot{U}_B^{n+1} + K_{BA}U_A^{n+1} + K_{BB}U_B^{n+1} = P_B^{n+1} \quad (5.2b)$$

A parçasının integrasyonu için (h) zaman adımı ve merkez fark yöntemi kullanıldığı kabul edilirse, B parçasının integrasyonunda ise her koşulda stabil olan ortalama ivme yöntemi ve aynı zaman adımı kullanılırsa; Merkez fark yönteminde kullanılan hız (4.14) ve ivme (4.15) denklemleri (5.2a) denkleminde yerine yazılabilir. Bu durumda aşağıdaki bağıntı elde edilir

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{h^2}M_{AA} + \frac{1}{2h}C_{AA}\right)U_A^{n+1} = P_A^n + (-K_{AA} + \frac{2}{h^2}M_{AA})U_A^n - K_{AB}U_B^n \\ + \left(\frac{1}{2h}C_{AA} - \frac{1}{h^2}M_{AA}\right)U_A^{n-1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

(5.3) denkleminde eşitliğin sağ tarafı sadece U_A ve U_B parametrelerinin bilinen değerlerinden oluştuğu için, denklem U_A^{n+1} için kolaylıkla çözülebilir.

Ortalama ivme yöntemindeki ivme ve hız parametreleri yani (4.1) ve (4.2) denklemleri, (5.2b) denkleminde yerlerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{aligned} \left(\frac{4}{h^2}M_{BB} + \frac{2}{h}C_{BB} + K_{BB}\right)U_B^{n+1} = P_B^{n+1} + \left(\frac{4}{h^2}U_B^n + \frac{4}{h}\dot{U}_B^n + \ddot{U}_B^n\right)M_{BB} \\ + \left(\frac{2}{h}U_B^n + \dot{U}_B^n\right)C_{BB} - K_{BA}U_A^{n+1} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Eşitliğin sağ tarafında bilinen \ddot{U}_B , \dot{U}_B ve U_B parametrelerine ek olarak bir tane U_A^{n+1} yer değiştirme değeri bulunmaktadır. Ancak denklem çiftinin açık(explicit) integrasyon ile incelenecek kısmı, (n+1) noktası için daha önceden merkez fark yöntemiyle çözüldüğü için U_A^{n+1} değeri bilinmektedir. Dolayısıyla (5.4) denklemini U_B^{n+1} için kolaylıkla çözülebilir. Burada dikkate edilmesi gereken nokta; Açık(explicit) integrasyon tekniğindeki stabilite koşulu sağlanmak zorundadır. (h) zaman adımı merkez fark yönteminde (T/π) ' den küçük olmalıdır (stabilite koşulu) burada (T) açık(explicit) parçada en yüksek modun periyodudur. Bu periyodu elde

ederken Kapalı(implicit) parçanın ara yüzey elemanlarını birbirine bağlayan düğüm noktaları tam rijit olarak düşünölmelidir.

5.3 E-E^R Açık(Explicit)-Açık(Explicit) İntegrasyon Tekniği

Bu metotta sistemin iki bileşeni içinde, açık(explicit) integrasyon tekniği uygulanır. Ancak esnek bileşenin integrasyonunda kullanılan (h) zaman adımı, rijit bileşenin integrasyonunda kullanılan zaman adımına göre büyük olacağı unutulmamalıdır. İki bileşen içinde merkez fark yöntemi kullanıldığını düşünölrse; esnek bileşen (h) zaman adımıyla integre edilirken, rijit bileşenin integrasyonunda (h/R) zaman adımı kullanılır. Esnek olan parça (A) ilk olarak integre edilecektir. Bu integrasyon için önceki bölümde bulunmuş olan (5.3) denklemi kullanılacaktır. Rijit bileşen için ise (n+p/R) zamanındaki yer değiştirme (h) yerine (h/R) yazılarak elde edilecektir. (B) parçası için (5.3) denkleminin yazılış şekli aşağıda gösterilmiştir[2].

$$\left(\frac{R^2}{h^2}M_{BB} + \frac{R}{2h}C_{BB}\right)U_B^{n+p/R} = P_A^{n+p/R} + \left(-K_{BB} + \frac{2R^2}{h^2}M_{BB}\right)U_B^{n+(p-1)/R} - K_{BA}U_A^{n+(p-1)/R} + \left(\frac{R}{2h}C_{BB} - \frac{R^2}{h^2}M_{BB}\right)U_B^{n+(p-2)/R} \quad (5.5)$$

(5.5) denklemini çözerken $U_B^{n+p/R}$ değerini bulmak için, $U_A^{n+(p-1)/R}$ değerini gerekmektedir. Ancak U_A sadece (n)h ve (n+1)h zaman noktalarında belirlenmiştir.

Bu yüzden $U_A^{n+(p-1)/R}$ değerini bulmak için, bilinen U_A^n ve U_A^{n+1} değerlerinden faydalanılarak doğrusal interpolasyon yapılır;

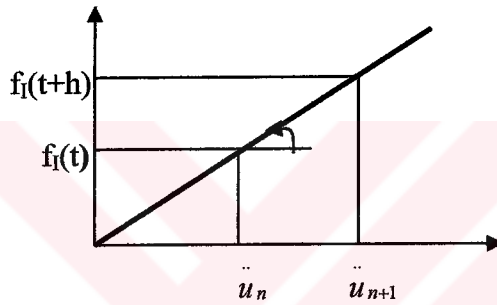
$$U_A^{n+(p-1)/R} = U_A^n + (U_A^{n+1} - U_A^n) \frac{p-1}{R} \quad (5.6)$$

şeklinde bulunur. Buradaki R değerı integrasyon stabilitesini sürdüreceğ şekilde seçilmelidir.

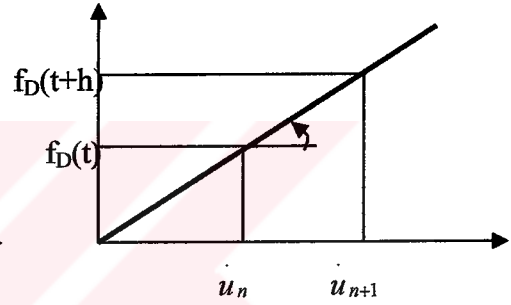
6. DOĞRUSAL OLMAYAN ÇÖZÜMLER HAKKINDA

6.1 Hesap Kabulleri

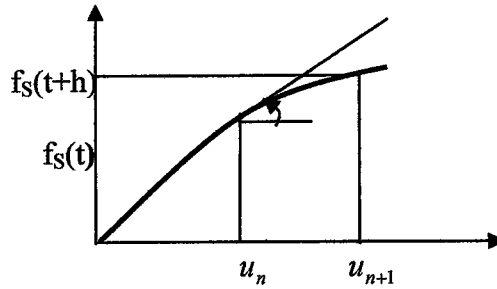
Sistemin eylemsizlik kuvvetleri ivmeyle ve sönüm kuvvetleri hızla zamana bağlı olarak doğrusal olarak değiştiği kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan durum sadece elastik kuvvetlerle yerdeğiştirme arasındadır. Yapılan bu kabuller grafiksel olarak Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Eylemsizlik kuvveti değişimi



Şekil 6.2 Sönüm kuvveti değişimi



Şekil 6.3 Elastik kuvvet değişimi

6.2 Artım Formüllerinin Elde Edilmesi (Incremental Formulation)

Herhangi bir zaman adımındaki ivme, hız ve yer değiştirme, değişim formüllerinin bulunması gerekmektedir. (incremental formulation) $t=nh$ zamanındaki hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (6.1)$$

veya yapılan kabüller yerine konulduğunda açık şekilde;

$$m\ddot{u}_n + c\dot{u}_n + f_s(t) = p_n \quad (6.2)$$

yazılabilir. Aynı şekilde (t+h) zamanında hareket denklemi;

$$m\ddot{u}_{n+1} + c\dot{u}_{n+1} + f_s(t+h) = p_{n+1} \quad (6.3)$$

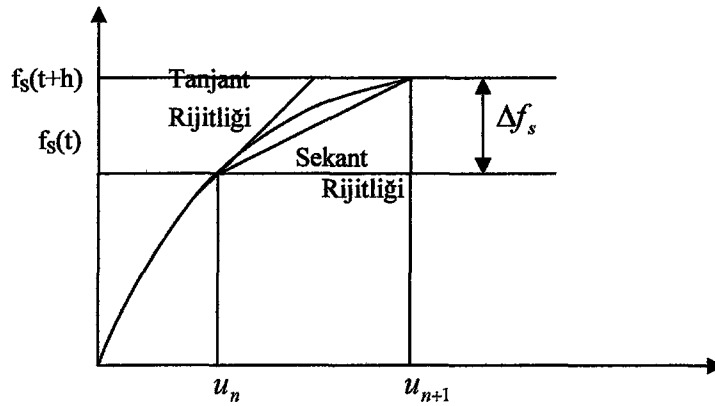
şeklinde yazılabilir. (6.3) denkleminde (6.2) denklemini taraf tarafa çıkarırsak;

$$m\Delta\ddot{u} + c\Delta\dot{u} + f_s(t+h) - f_s(t) = \Delta p \quad (6.4)$$

bağıntısını elde ederiz. Eğer küçük zaman aralığında (h) rijitliğin sabit ve başlangıçta tanjant rijitliğine eşit olduğu kabulünü yaparsak aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$f_s(t+h) - f_s(t) = k_T \Delta u \quad (6.5)$$

Burada bir noktayı açıklamak gerekir (6.5) denkleminde tanjant rijitliğinin kullanılması hatadır. Aslında tanjant rijitliğinin yerine sekant rijitliği kullanılmalıdır [2]. Ancak bizim aradığımız yeni yer değiştirme değeri (n+1 zaman anı) bilinmediği için tanjant rijitliğini kullanmak zorundayız. Yeteri kadar küçük zaman aralığında sekant rijitliği yerine tanjant rijitliği kullanımından kaynaklanan hata çok büyük değildir.



Şekil 6.4 Tanjant rijitliğinin kullanılması

(6.5) denklemini (6.4) denkleminde yerine yazdığımız zaman. Zaman integrasyon yöntemleriyle çözülebilecek bir denklem elde ederiz. Bu prosedürü göstermek için doğrusal ivme değişiminin davranış hesabında kullanıldığını düşünelim. Doğrusal

hesapta elde edilmiş olan yer değiştirme ifadesinde artım değerlerini yerine koyduğumuzda;

$$u_{n+1} = u_n + h\dot{u}_n + \frac{h^2}{3}\ddot{u}_n + \frac{h^2}{6}\ddot{u}_{n+1} \quad \Delta u = u_{n+1} - u_n \quad \ddot{u}_{n+1} = \ddot{u}_n + \Delta\ddot{u} \quad (6.6)$$

Aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$\Delta u = h\dot{u}_n + \frac{h^2}{2}\ddot{u}_n + \frac{h^2}{6}\Delta\ddot{u} \quad (6.7)$$

(6.7) denklemi, $\Delta\ddot{u}$ parametresini Δu cinsinden bulmamıza olanak sağlar.

$$\Delta\ddot{u} = \frac{6}{h^2}(\Delta u - h\dot{u}_n - \frac{h^2}{2}\ddot{u}_n) \quad (6.8)$$

Doğrusal hesapta kullanılan hız ifadesi aşağıdaki gibidir artım değerini denklemde yerine koyduğumuzda;

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{h}{2}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1}) \quad \Delta\dot{u} = \dot{u}_{n+1} - \dot{u}_n \quad (6.9)$$

aşağıdaki bağıntı bulunur.

$$\Delta\dot{u} = h\ddot{u}_n + \frac{h}{2}\Delta\ddot{u} \quad (6.10)$$

(6.8) denklemini (6.10) denkleminde yerine yazdığımızda;

$$\Delta\dot{u} = \frac{3}{h}\Delta u - 3\dot{u}_n - \frac{h}{2}\ddot{u}_n \quad (6.11)$$

bulunur. (6.5), (6.8) ve (6.11) denklemlerini (6.4) denkleminde yerine yazdığımız zaman aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\left(\frac{6m}{h^2} + \frac{3c}{h} + k_T\right)\Delta u = \Delta p + m\left(\frac{6\dot{u}_n}{h} + 3\ddot{u}\right) + c\left(3\dot{u}_n + \frac{h}{2}\ddot{u}_n\right) \quad (6.12)$$

veya aşağıdaki formda yazabiliriz.

$$k_T^* \Delta u = \Delta p^* \quad (6.13)$$

burada;

$$k_T^* = \frac{6m}{h^2} + \frac{3c}{h} + k_T$$

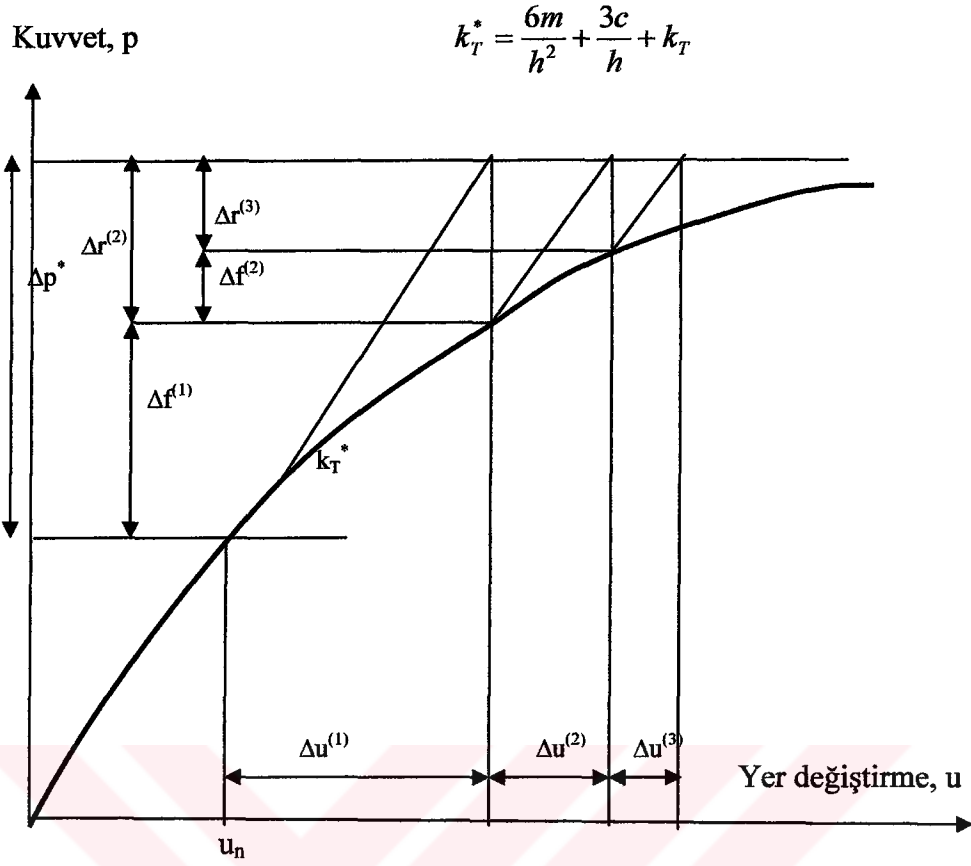
$$\Delta p^* = \Delta p + m\left(\frac{6\dot{u}_n}{h} + 3\ddot{u}\right) + c\left(3\dot{u}_n + \frac{h}{2}\ddot{u}_n\right)$$

şeklindedir (6.13) denkleminde Δu parametresi bulunduğu zaman; (6.11) denkleminde yerine yazılıp Δu elde edilebilir. Daha sonra elde edilen bu iki parametreye u_n ve \dot{u}_n değerleri eklenerek; sırasıyla u_{n+1} ve \dot{u}_{n+1} değerleri bulunmuş olur. t_{n+1} zamanındaki ivme parametresi de aynı şekilde hesaplanabilir fakat yöntemin hassasiyetini geliştirmek için ivme eklenerek değilde aşağıdaki gibi bulunabilir.

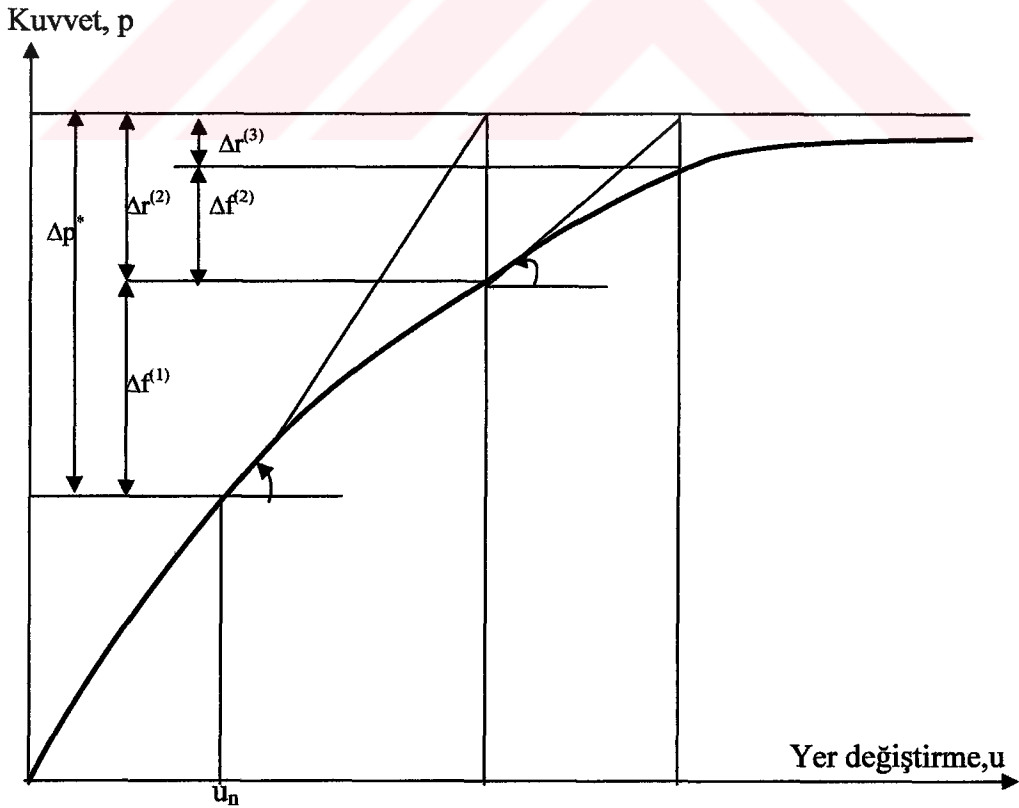
$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{1}{m}(p_{n+1} - f_S(t+h) - c\dot{u}_{n+1}) \quad (6.14)$$

6.3 Doğrusal Olmayan Sistemlerdeki Hatalar

Sayısal integrasyonda; hem doğrusal sistemlerde hem de doğrusal olmayan sistemlerde ortak olan hata kaynağı, hareket denkleminin çözümünde, orijinal fark denkleminin yerine, sonlu fark yaklaşımının yapılmasıdır. Doğrusal olmayan sistemlerde buna ek olarak tanjant rijitlik matrisinin sekant rijitlik matrisinin yerine kullanılmasından kaynaklanan hata mevcuttur [2].



şekil 6.5 Sabit eğimle iterasyon yapılması



şekil 6.6 Eğim değişimiyle iterasyon yapılması

Tanjant rijitlik matrisinin kullanımından kaynaklanan hata bir dizi iterasyon uygulanarak minimize edilebilir. (6.13) denkleminin grafik gösterimi göz önüne alınırsa. (Şekil 6.5)

$k_T^* = \frac{6m}{h^2} + \frac{3c}{h} + k_T$ eğimi sabit olmadığı için denklem ilişkisi, yer değiştirmeye ve dolayısı ile zamana göre doğrusal olmayan özellik gösterir. Statik yük durumunda $k_T^* = k_T$ olacaktır doğrusal olmayan durum daha belirgin olacaktır. (h) zaman aralığı küçük olduğunda sabit terimler $(\frac{6m}{h^2}, \frac{3c}{h})$; k_T parametresine göre oldukça büyüktür. İterasyona aşağıdaki denklemle başlanır.

$$k_T^* \Delta u^{(1)} = \Delta p^* \quad (6.15)$$

Artan kuvveti $\Delta r^{(2)}$ ile gösterirsek. Artan kuvvetten oluşan ilave yer değiştirme aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} k_T^* \Delta u^{(2)} &= \Delta r^2 \\ &= \Delta p^* - \Delta f^{(1)} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Bu ek yer değiştirme artan kuvvetin yeni değerinin bulunmasında kullanılır. Bu proses yeterli tolerans elde edilinceye kadar sürdürülür. Zamana göre iterasyon aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} k_T^* \Delta u^{(k)} &= \Delta r^{(k)} \\ u_{(n+1)}^{(k)} &= u_{n+1}^{(k-1)} + \Delta u^{(k)} \\ \Delta f^{(k)} &= f_s^k - f_s^{k-1} + \frac{6m}{h^2} \Delta u^{(k)} + \frac{3c}{h} \Delta u^{(k)} \quad k = 1, \hat{k} \\ \Delta r^{(k+1)} &= \Delta r^{(k)} - \Delta f^{(k)} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Burada f_s elastik kuvveti temsil etmektedir. İterasyona $\Delta r^{(1)} = \Delta p^*$ değeri ile başlanır. İterasyon işlemi sonlandığında yani $\Delta r^{(k)}$ veya $\Delta u^{(k)}$ yeteri kadar küçük olduğunda; Yer değiştirmedeki toplam artış.

$$\Delta u = \sum_{k=1}^{\hat{k}} \Delta u^{(k)} \quad (6.18)$$

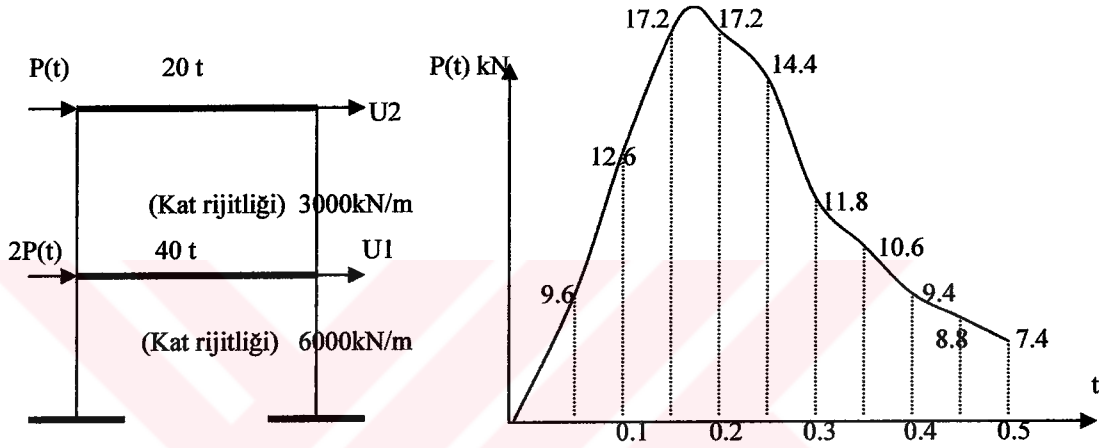
bağıntısıyla hesaplanır İvme ve hız değerlerindeki artış aynı şekilde (6.8) ve (6.11) bağıntılarından hesaplanır.



7. ANALİZ ÖRNEKLERİ

7.1 İki Katlı Bir Yapının Analizi

Şekil 7.1’de görülen iki serbestlik dereceli yapının uyarıcı kuvvet etkisinde davranışı tayin edilecektir.



Şekil 7.1 İki serbestlik dereceli sistem ve uyarıcı kuvvet grafiği

$$\xi = 0.05 \quad h(\text{zaman aralığı}) = 0.05$$

$$M = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 9000 & -3000 \\ -3000 & 3000 \end{bmatrix}$$

$$U_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \dot{U}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ olarak verilmiştir.}$$

Sistemin davranışı sırasıyla, merkez fark yöntemi, ortalama ivme yöntemi, doğrusal ivme yöntemi ve Wilson θ yöntemi ile belirlenecektir. İlk önce sönüm matrisi, kütle ve rijitlik orantılı olarak bulunacaktır. Orantı katsayılarının bulunabilmesi için ilk önce sistemin sönümsüz serbest titreşim frekansları bulunmalıdır.

$$[K - M\omega^2] \Phi = 0 \quad (7.1)$$

(7.1) denkleminin açık ifadesi aşağıdaki formdadır.

$$\begin{bmatrix} (9000 - 40\omega^2) & -3000 \\ -3000 & (3000 - 20\omega^2) \end{bmatrix} \Phi = 0 \quad (7.2)$$

Bu durumda karakteristik denklem;

$$800\omega^4 - 300000\omega^2 + 18000000 = 0 \quad (7.3)$$

(7.3) denkleminde $(\omega^2 = t)$ kabulü yapıp, denklem çözülürse $\omega_1 = 8,66$ ve $\omega_2 = 17.32$ olarak bulunur.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

(7.4) denkleminde bilinen değerler yerlerine yazıldığında;

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.1155 & 8.66 \\ 0.0577 & 17.32 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

bulunur. (7.5) denklem takımı çözüldüğünde $\alpha_0 = 0.577; \alpha_1 = 0,00385$ bulunur.

$$C = \alpha_0 M + \alpha_1 K \quad (7.6)$$

Bulunan değerler, (7.6) denkleminde yerlerine yazılırsa sönüm matrisi;

$$C = \begin{bmatrix} 57.73 & -11.55 \\ -11.55 & 23.09 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \%4.99 \quad \xi_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \omega_1 \\ \frac{1}{\omega_2} & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \%4.99$$

şeklinde bulunur. Bilgisayar programı vasıtasıyla iki katlı yapının analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.1, Tablo 7.2, Tablo 7.3, Tablo 7.4' de gösterilmiştir ve Şekil D' de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.1. Merkez fark yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.05	0.000000	0.000000
0.10	0.001166	0.001183
0.15	0.003380	0.003871
0.20	0.006430	0.008393
0.25	0.009442	0.014121
0.30	0.011490	0.019642
0.35	0.012199	0.023354
0.40	0.011773	0.024085
0.45	0.010463	0.021404
0.50	0.008443	0.015909

Merkez fark yöntemi koşullu stabil bir yöntem olduğu için, stabilite koşulu gösterilmelidir. En yüksek modun periyodu;

$$T_2 = \frac{2\pi}{17,32} = 0.363 \quad (7.8)$$

Stabilite koşulu $h < \frac{T_2}{\pi}$ dir. (0,05 < 0,1156) koşul sağlanır.

Tablo 7.2. Ortalama ivme yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.05	0.000268	0.000293
0.10	0.001330	0.001531
0.15	0.003398	0.004211
0.20	0.006192	0.008391
0.25	0.009040	0.013536
0.30	0.011140	0.018525
0.35	0.012024	0.022080
0.40	0.011681	0.023178
0.45	0.010361	0.021339
0.50	0.008336	0.016784

Ortalama ivme yöntemi her koşulda stabil bir yöntem olduğu için stabilite tahkiki yapılmayacaktır.

Tablo 7.3. Doğrusal ivme yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.05	0.000184	0.000196
0.10	0.001275	0.001420
0.15	0.003386	0.004104
0.20	0.006265	0.008391
0.25	0.009174	0.013716
0.30	0.011266	0.018871
0.35	0.012092	0.022485
0.40	0.011706	0.023487
0.45	0.010373	0.021399
0.50	0.008350	0.016542

Doğrusal İvme Yöntemi koşullu stabil bir yöntem olduğu için, stabilite kontrolü gösterilmelidir; Stabilite koşulu $h < 0,55T_2$ dir. ($0,05 < 0,19965$) koşul sağlanır.

Tablo 7.4 Wilson- θ yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı ($\theta=1.6$)

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.05	0.000168	0.000191
0.10	0.001167	0.001377
0.15	0.003129	0.003943
0.20	0.005879	0.007991
0.25	0.008782	0.012989
0.30	0.011031	0.017870
0.35	0.012110	0.021481
0.40	0.011938	0.022925
0.45	0.010698	0.021722
0.50	0.008690	0.017957

Wilson θ yöntemi, $\theta > 1,37$ olduğunda her koşulda stabil bir yöntemdir. ($\theta=1.6$) seçildiği için stabilite tahkiki yapılmasına ihtiyaç yoktur.

7.2 Zaman Adımının Genişletilmesi

Şekil 7.1' de verilmiş olan iki serbestlik dereceli sistemi ($h=0.25$ sn) zaman adımıyla integre edersek aşağıdaki sonuçları elde ederiz

Tablo 7.5. Merkez fark yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı ($h=0.25$)

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.25	0.000000	0.000000
0.50	0.039401	0.041810

Tablo 7.6. Ortalama ivme yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı ($h=0.25$)

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.25	0.003925	0.005944
0.50	0.008576	0.014743

Tablo 7.7. Doğrusal ivme yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı ($h=0.25$)

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.25	0.003222	0.004717
0.50	0.011576	0.019532

Tablo 7.8 Wilson- θ yöntemi ile iki serbestlik dereceli sistemin davranışı ($h=0.25$) [$\theta=1.6$]

t (sn)	U1 (m)	U2 (m)
0.25	0.001843	0.002884
0.50	0.008651	0.013936

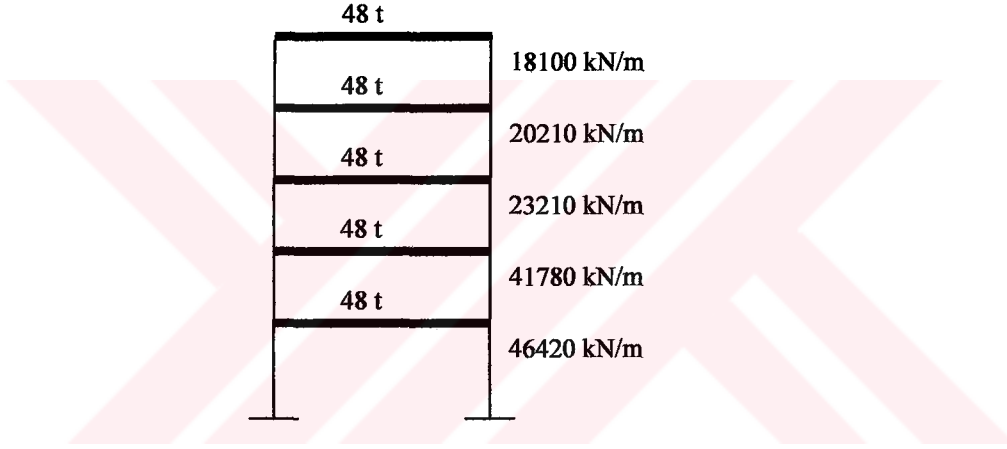
Tablo 7.5, Tablo 7.6, Tablo 7.7 ve Tablo 7.8 incelenecek olursa, dört yöntemle elde edilmiş sonuçlar birbirinden oldukça farklıdır. Buradan da anlaşılacağı gibi seçilen zaman adımı sistemin doğal periyodunun onda birinden büyük olmamalıdır. İkinci önemli nokta ise, zaman adımı, uyarıcı fonksiyonun zamana göre değişimini temsil edecek kadar küçük seçilmelidir.

7.3 Beş Kath Bir Yapının Analizi

Şekil 7.2’de görülen beş serbestlik dereceli yapının deprem ivme kayıtları etkisi altında (merkez fark yöntemi, ortalama ivme yöntemi, doğrusal ivme yöntemi ve Wilson θ yöntemi) ayrı ayrı kullanılarak davranışı tayin edilecektir. Kullanılacak deprem kayıtları sırasıyla;

1. Elcentro Depremi (1940)
2. Erzincan Depremi (N.S) (13.03.1992)
3. Erzincan Depremi (E.W) (13.03.1992)
4. Pülümür Depremi (N.S) (15.03.1992)
5. Pülümür Depremi (E.W) (15.03.1992)

Bu depremlerin grafikleri ivme kayıtlarından faydalanarak çizdirilmiştir.(h=0.01sn)



Şekil 7.2 Beş serbestlik dereceli sistem

$$U_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ ve } \dot{U}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Başlangıç koşulları kullanılacaktır.}$$

7.3.1 Sistemin Rijitlik Matrisinin Kurulması

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & (k_4 + k_5) & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Sayısal değerler (7.9) denkleminde yerine yazıldığında [K] matrisi aşağıdaki şekilde bulunur

$$[K] = \begin{bmatrix} 88200 & -41780 & 0 & 0 & 0 \\ -41780 & 64990 & -23210 & 0 & 0 \\ 0 & -23210 & 43420 & -20210 & 0 \\ 0 & 0 & -20210 & 38310 & -18100 \\ 0 & 0 & 0 & -18100 & 18100 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

7.3.2 Sistemin Kütle Matrisinin Kurulması

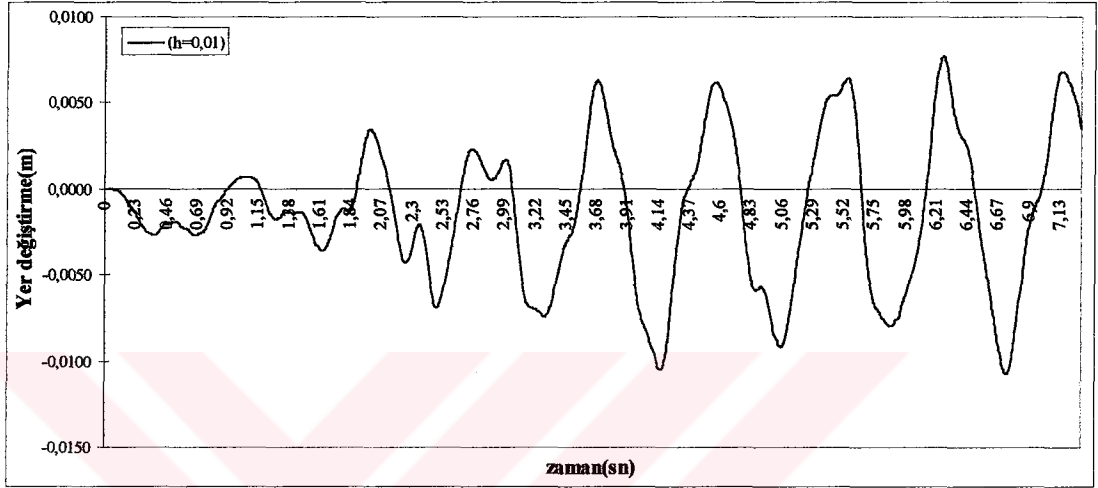
$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 48 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 48 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 48 \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

7.3.3 Deprem İvme Kayıtlarının Kullanılması

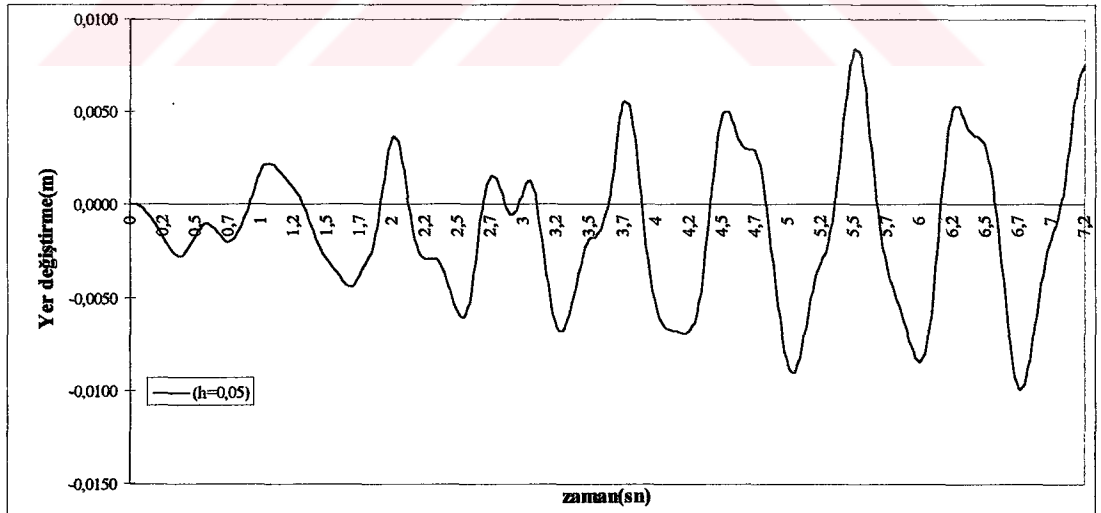
Yukarıda fiziksel özellikleri tespit edilen beş serbestlik dereceli sistemin, deprem ivme kayıtları altında davranışı tayin edilmiştir. Katların yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. Hesapların yapılması için FORTRAN 90 Programlama Dilinde dört farklı sayısal integrasyon yöntemi için dört farklı program geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik şeklinde çizdirilmiştir. Dört farklı integrasyon yöntemiyle elde edilen sonuçlar, yapının her bir katı için karşılaştırılmış, farklı renkte aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.(Şekil E, F, G, H, I) grafikleri

7.4 Zaman Adımının Genişletilmesi

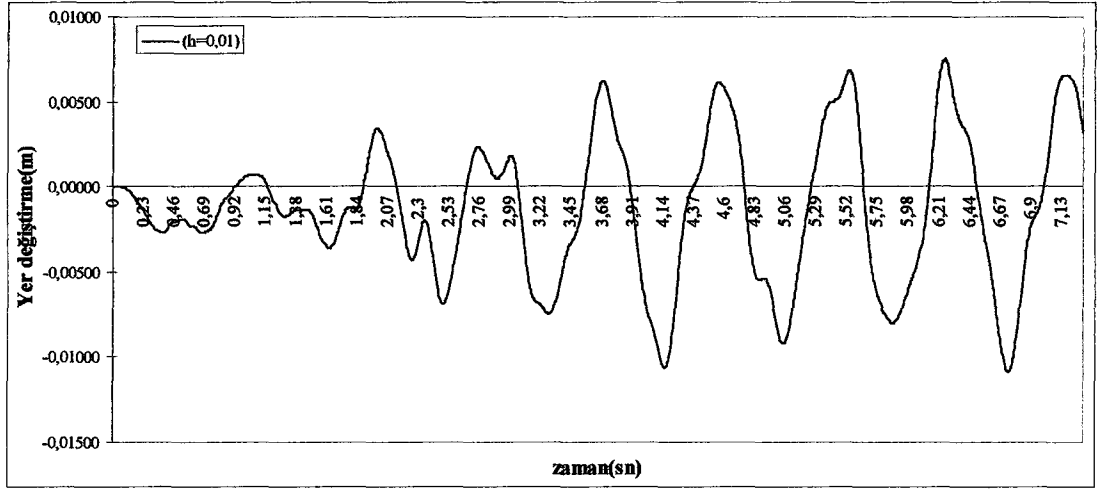
Şekil 7.2’de görülen beş serbestlik dereceli yapının Pülümür Depremi(NS) ivme kayıtları etkisi altında (merkez fark yöntemi, ortalama ivme yöntemi, doğrusal ivme yöntemi ve Wilson θ yöntemi) kullanılarak ($h=0.01sn$) ve ($h=0.05sn$) zaman adımlarıyla analizi yapıp, farklı zaman adımlarıyla elde edilmiş olan 5. kat yer değiştirmeleri grafiksel olarak karşılaştırılacaktır.



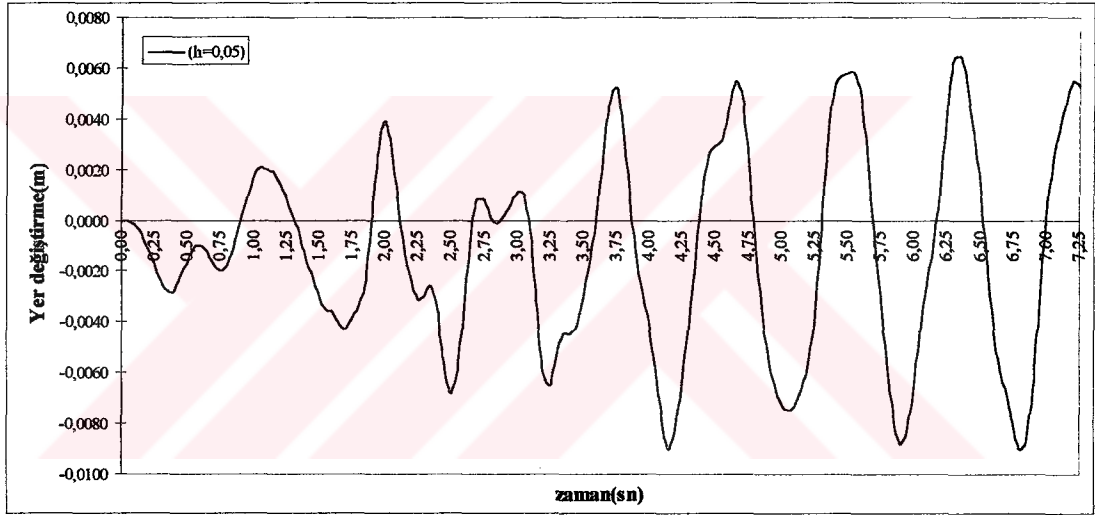
Şekil 7.3. Ortalama ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.01sn$)



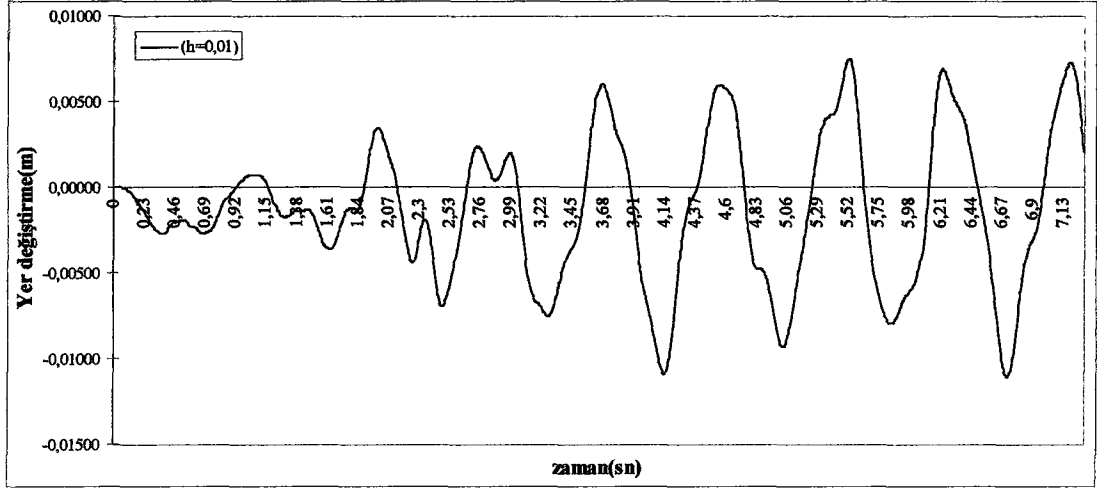
Şekil 7.4. Ortalama ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.05sn$)



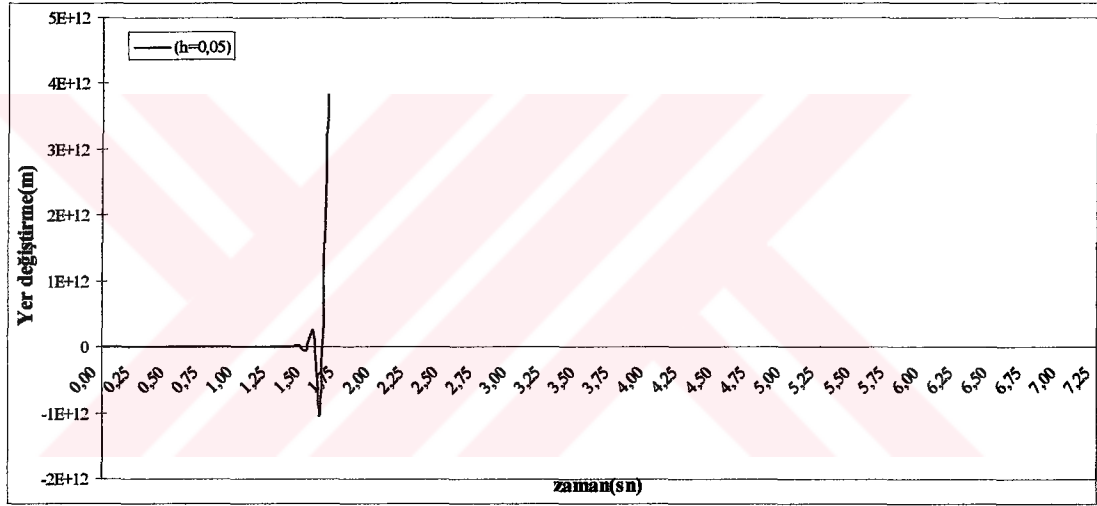
şekil 7.5. Doğrusal ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.01$ sn)



şekil 7.6. Doğrusal ivme yöntemine göre 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.05$ sn)

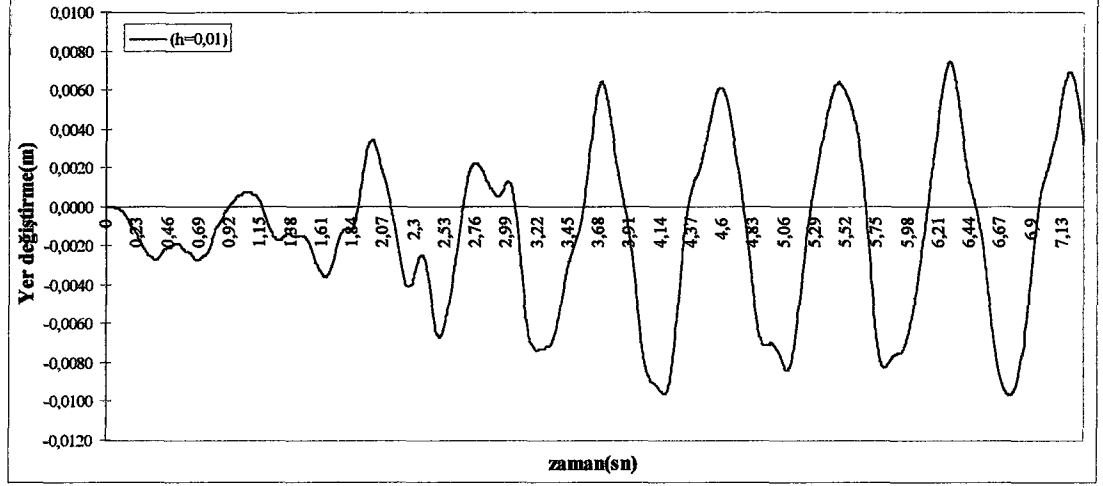


Şekil 7.7. Merkez fark yöntemine göre 5.kat yer değiştirme ($h=0.01sn$)

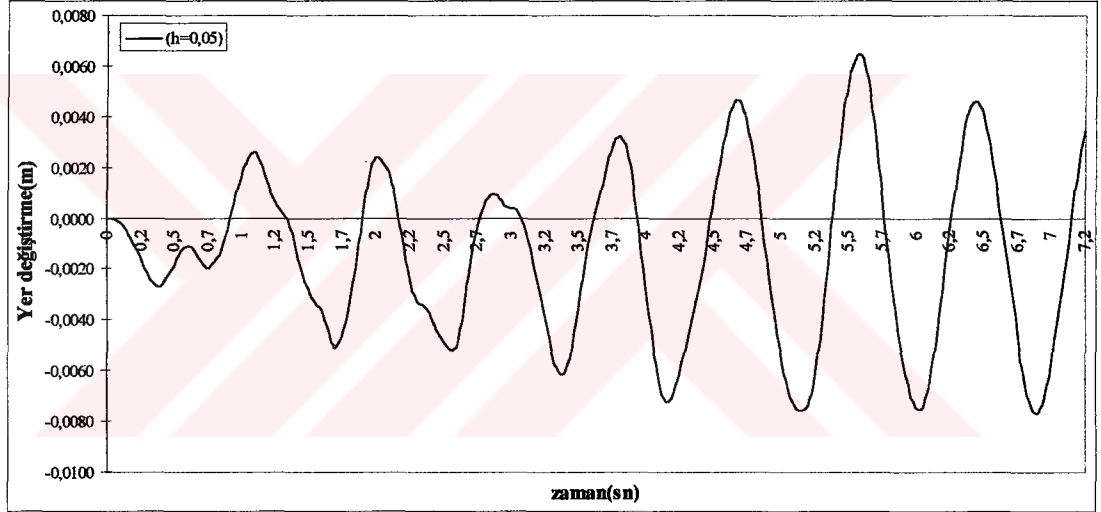


Şekil 7.8. Merkez fark yöntemine göre 5. kat yer değiştirme ($h=0.05sn$)

Merkez fark yöntemiyle ($h=0.05$) zaman adımıyla elde edilmiş sonuçlarda sayısal kabarma meydana gelmektedir. Dolayısıyla stabilite bozukluğu söz konusudur. nceki bölümlerde üzerinde durulduğu gibi merkez fark yöntemi koşullu stabildir ve sayısal stabilitenin sürdürülebilmesi için (h) zaman adımı, sistemin en yüksek modunun periyodunun bir fonksiyonu olarak seçilmelidir.



Şekil 7.9. Wilson yontemine gore 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.01$ sn)



Şekil 7.10. Wilson yontemine gore 5. kat yer değiştirmesi ($h=0.05$ sn)

($h=0.01$) ve ($h=0.05$) zaman adımlarıyla elde edilen sonuçlar incelendiğinde Wilson yontemi, doğrusal ivme yontemi ve ortalama ivme yonteminde herhangi bir stabilite bozukluğu yoktur. Elbetteki kucuk zaman adımıyla elde edilen sonuçların hassasiyeti daha yuksektir. merkez fark yonteminde ise ($h=0.01$) zaman adımıyla diğer metotlardaki sonuşlara yakın grafiksel sonuçlar elde edilirken ($h=0.05$) zaman adımıyla elde edilen sonuçların Şekil 7.8'de gorulduğu gibi stabilitesi bozulmuştur.

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1. Yapı sisteminde sönüm matrisinin ortogonal özellikler taşıması veya herhangi bir doğrusal olmayan durum söz konusu olduğunda sayısal çözüm yapmak çoğu zaman zorunlu hale gelmektedir. Hareket denkleminin çözümünde kullanılacak doğrudan integrasyon yöntemleri temel olarak iki kısımda incelenebilirler. Birinci grup yöntemlerde sistem denkleminin, çözüm zaman aralığının başında ve sonunda sağlanması üzerine ara bölgede kat ivmelerinin değişimi tahmin edilmeye çalışılır (kapalı integrasyon). Farklı yer değiştirmeler arasında yazılan denklem takımının çözümüyle her adımda sonuca ulaşılabilir. İkinci grup yöntemlerde denklemler dinamik dengenin hesap zamanının başlangıcında sağlanması üzerine kurulur (açık integrasyon). Bu yöntemin temel pratikliği her adımda sistem denklemlerinin çözümünü gerektirmemesidir.

2. Doğrudan integrasyon yöntemlerinin amacı ivme, hız ve yerdeğiştirme değerlerinin belirli zamanlarda belirlenmesidir. Üç bilinmeyen için iki bağımsız ifadenin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemlerin bir çoğunda bu iki bağımsız ifade, ivmenin küçük zaman aralığında değişiminde yapılan kabullerden elde edilir. Üçüncü ifade ise herhangi bir zaman aralığında yazılmış olan hareket denklemdir.

3. Sayısal integrasyon yöntemlerinden elde edilmiş olan sonuçlar sürekli bir fonksiyon gibi değildir. Birbirini takip eden ardışık değerlerdir. Dolayısıyla herhangi bir zaman anındaki hata, daha sonraki adımların sonucunu etkiler.

4. Sayısal integrasyon yöntemlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan bir tanesi integrasyonun stabilitesidir. Seçilen yaklaşımla elde edilen yöntemler her koşulda stabil veya koşullu stabil olabilirler. Bölüm 3.3 de açıklandığı gibi stabilite koşulu, integrasyon operatörünün $[A]$ öz değerlerine bağlıdır. Stabilite bozukluğu ise integrasyon operatörünün ardışık çarpımları sonucu sayısal kabarmadan kaynaklanmaktadır. Operatörün öz değerlerinin reel ve mutlak değerce birden büyük olması halinde sistemde sayısal kabarma olmaktadır ve bu durum çözümün stabil olmadığını göstermektedir. Öz değerlerin birden küçük olması halinde sayısal sönüm

meydana gelmektedir ve çözüm stabildir. Her koşulda stabil yöntemlerde seçilen zaman adımına göre yüksek frekanslı modlar sayısal sönüme uğrayarak düşük frekanslı modlar ön plana çıkmaktadır.

Koşullu stabil olan yöntemlerde ise zaman adımı sistemdeki minimum periyottan daha küçük seçilmediği takdirde maksimum frekansa sahip olan bu mod sayısal olarak büyük sonuçlar verir ve dolayısıyla çözüm stabilitesi bozulmaktadır. Diğer taraftan zaman adımının çok küçük seçilmesi hesaplama açısından pratik değildir ve çok sayıda adım kullanılacağı için yuvarlatma hataları ortaya çıkar. Bu hataları minimize etmek için, kullanılan programın hassasiyeti artırılabilir.

5. Çözümlerin stabil olması doğru olması anlamına gelmemektedir. Zaman adımları yeteri kadar küçük seçilmediği takdirde, genlik ve periyot kayması türünden hatalar oluşabilir. Ayrıca seçilen zaman adımı uyarıcı fonksiyonu temsil edecek derecede küçük olmalıdır. Yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar, zaman aralığı minimum sistem periyodunun 0.1 katı seçilerek elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Clough, R. W., and Penzien, J.**, Dynamics of Structures, McGraw-Hill. New York, 1975
- [2] **Jagmohan L. Humar**, Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632
- [3] **Barbat A. H., and Miquel Canet J.**, Structural Response Computations İn Earthquake Engineering, Pineridge Press.,1989
- [4] **Bakioğlu, M.**, Sayısal Analiz, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004
- [5] **Geradin.M.,Rixen.D.**, Mechanical Vibrations, Theory and Applications to Structural Dynamics, Wiley, Masson, 1994
- [6] **Paz. M.**, Structural Dynamics Theory and Computation, Van Nostrand Reinhold New York
- [7] **Celep, Z.,Kumbasar, N.**, Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Sema Matbaacılık, İstanbul, 1992.
- [8] **Donea,,J.**, Advanced Structural Dynamics, Applied Science Publishers, London, 1978
- [9] **Yılmaz, M.**, 2003.,Elasto-Plastik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

EK LİSTESİ

EK-A	Geliştirilen FORTRAN 90 Programları Hakkında
EK-B	FORTRAN90 Pogramları
EK-C	Deprem İvme Kaydı Grafikleri
EK-D	İki Katlı Yapı Analizi Grafikleri
EK-E	Beş Katlı Yapı Analizi Grafikleri(Elcentro Depremi)
EK-F	Beş Katlı Yapı Analizi Grafikleri(Erzincan Depremi NS-1992)
EK-G	Beş Katlı Yapı Analizi Grafikleri(Erzincan Depremi EW-1992)
EK-H	Beş Katlı Yapı Analizi Grafikleri(Pülümür Depremi NS-1992)
EK-I	Beş Katlı Yapı Analizi Grafikleri(Pülümür Depremi EW-1992)



EK-A

Geliştirilen FORTRAN 90 Programları Hakkında

Merkez Fark Yöntemi

1. Adım: Bilinen değerlerin Programa Girilmesi

N(sistemin serbestlik derecesi), h(zaman aralığı)
hh(İntegrasyonda kullanılacak adım sayısı)
[M], [K], [C], [U₀], [Ú₀] ve [P₀] Matrisleri

2. [Ú₀] ivme vektörünün hesaplanması

$$\begin{aligned}[\dot{U}_0] &= [V_0] \\ [U_1] &= [K][U_0] \text{ ve } [U_2] = [C][V_0] \text{ buradan } [U_3] = [P_0] - [U_2] - [U_1] \\ [\ddot{U}_0] &= [WW] \\ [WW] &= [M]^{-1}[U_3]\end{aligned}$$

3. [U₋₁] yer değiştirmesinin hesaplanması

$$\begin{aligned}[U_{-1}] &= [X_0] \\ [X_0] &= [U_0] + (h^2/2)[WW] - h[V_0]\end{aligned}$$

4. Yer değiştirmelerin katsayılarının hesaplanması

$$\begin{aligned}[D] &= (1/h^2)[M] + (1/(2h))[C] \\ [E] &= (2/h^2)[M] - [K] \\ [S] &= (1/(2h))[C] - (1/(h^2))[M] \\ [FF] &= [M][BR] \quad [BR] = [1]\end{aligned}$$

5. Dış dosyanın açılıp döngü başlatılması; Dış dosyadan (a) ivme değerlerinin okutulması

$$\begin{aligned}[P_n] &= a[FF] \\ [X_2] &= [E][U_0] \\ [X_3] &= [S][X_0] \\ [X_4] &= [X_3] + [X_2] + [P_n]\end{aligned}$$

6. Bir sonraki adımın yer değiştirmelerinin bulunması döngünün tekrarı

$$\begin{aligned}[WW] &= [D]^{-1}[X_4] \\ [X_0] &= [U_0] \\ [U_0] &= [WW]\end{aligned}$$

Ortalama İvme Yöntemi

1. Adım: Bilinen değerlerin Programa Girilmesi

N(sistemin serbestlik derecesi), h(zaman aralığı)
hh(İntegrasyonda kullanılacak adım sayısı)
[M], [K], [C], [U₀], [Ú₀] ve [P₀] Matrisleri

2. [Ú₀] ivme vektörünün hesaplanması

$$\begin{aligned} [\dot{U}_0] &= [V_0] \\ [U_1] &= [K][U_0] \text{ ve } [U_2] = [C][V_0] \text{ buradan } [U_3] = [P_0] - [U_2] - [U_1] \\ [\ddot{U}_0] &= [XX_0] \\ [XX_0] &= [M]^{-1}[U_3] \end{aligned}$$

3. Yer değiştirmelerin katsayılarının hesaplanması

$$\begin{aligned} [D] &= (4/h^2)[M] + (2/h)[C] + [K] \\ [E] &= (4/h^2)[M] + (2/h)[C] \\ [S] &= (4/h)[M] + [C] \\ [FF] &= [M][BR] \quad [BR] = [1] \end{aligned}$$

4. Dış dosyanın açılıp döngü başlatılması. Dış dosyadan (a) ivme değerlerinin okutulması

$$\begin{aligned} [P_n] &= a[FF] \\ [X_2] &= [E][U_0] \\ [X_3] &= [S][X_0] \\ [X_4] &= [M][XX_0] \\ [X_5] &= [X_4] + [X_3] + [X_2] + [P_n] \end{aligned}$$

5. Bir sonraki adımın yer değiştirme, hız ve ivmelerinin bulunması döngünün tekrarı

$$\begin{aligned} [WW] &= [D]^{-1}[X_5] \\ [XX_0] &= -[XX_0] + (4/h^2)[WW] - (4/h^2)[U_0] - (4/h)[V_0] \\ [V_0] &= -[V_0] + (2/h)[WW] - (2/h)[U_0] \\ [U_0] &= [WW] \end{aligned}$$

Doğrusal İvme Yöntemi

1. Adım: Bilinen değerlerin Programa Girilmesi

N(sistemin serbestlik derecesi), h(zaman aralığı)
hh(İntegrasyonda kullanılacak adım sayısı)
[M], [K], [C], [U₀], [Ú₀] ve [P₀] Matrisleri

2. [Ú₀] ivme vektörünün hesaplanması

$$\begin{aligned} [\dot{U}_0] &= [V_0] \\ [U_1] &= [K][U_0] \text{ ve } [U_2] = [C][V_0] \text{ buradan } [U_3] = [P_0] - [U_2] - [U_1] \\ [\ddot{U}_0] &= [XX_0] \\ [XX_0] &= [M]^{-1}[U_3] \end{aligned}$$

3. Yer değiştirmelerin katsayılarının hesaplanması

$$\begin{aligned}[D] &= (6/h^2)[M] + (3/h)[C] + [K] \\ [E] &= (6/h^2)[M] + (3/h)[C] \\ [S] &= (6/h)[M] + 2[C] \\ [F] &= 2[M] + (h/2)[C] \\ [FF] &= [M][BR] \quad [BR] = [1]\end{aligned}$$

4. Dış dosyanın açılıp döngü başlatılması Dış dosyadan (a) ivme değerlerinin okutulması

$$\begin{aligned}[P_n] &= a[FF] \\ [X_2] &= [E][U_0] \\ [X_3] &= [S][V_0] \\ [X_4] &= [F][XX_0] \\ [X_5] &= [X_4] + [X_3] + [X_2] + [P_n]\end{aligned}$$

5. Bir sonraki adımın yer değiştirme, hız ve ivmelerinin bulunması döngünün tekrarı

$$\begin{aligned}[WW] &= [D]^{-1}[X_5] \\ [XXX] &= -2[XX_0] + (6/h^2)[WW] - (6/h^2)[U_0] - (6/h)[V_0] \\ [V_0] &= -2[V_0] - (h/2)[XX_0] + (3/h)[WW] - (3/h)[U_0] \\ [U_0] &= [WW] \\ [XX_0] &= [XXX]\end{aligned}$$

Wilson θ Yöntemi

1. Adım: Bilinen Değerlerin Programa Girilmesi

Q= θ parametresi

N(sistemin serbestlik derecesi), h(zaman aralığı)

hh(İntegrasyonda kullanılacak adım sayısı)

[M], [K], [C], [U₀], [U₀˙] ve [P₀] Matrisleri

2. [U₀˙] ivme vektörünün hesaplanması

$$\begin{aligned}[U_0\dot{]} &= [V_0] \\ [U_1] &= [K][U_0] \text{ ve } [U_2] = [C][V_0] \text{ buradan } [U_3] = [P_0] - [U_2] - [U_1] \\ [U_0\dot{]} &= [XX_0] \\ [XX_0] &= [M]^{-1}[U_3]\end{aligned}$$

3. Yer değiştirmelerin katsayılarının hesaplanması

$$\begin{aligned}[D] &= (6/(\theta h)^2)[M] + (3/\theta h)[C] + [K] \\ [E] &= (6/(\theta h)^2)[M] + (3/(\theta h))[C] \\ [S] &= (6/(\theta h))[M] + 2[C] \\ [F] &= 2[M] + ((h\theta)/2)[C] \\ [FF] &= [M][BR] \quad [BR] = [1]\end{aligned}$$

4. Dış dosyanın açılıp döngü başlatılması Dış dosyadan (a) ivme değerlerinin okutulması $[P_0]$ vektörünün hesaplanması

$$\begin{aligned}[P_n] &= a[FF] \\ [P_0] &= [P_q] \\ [P_q] &= (1-\theta)[P_0] + \theta[P_n] \\ [X_2] &= [E][U_0] \\ [X_3] &= [S][V_0] \\ [X_4] &= [F][XX_0] \\ [X_5] &= [X_4] + [X_3] + [X_2] + [P_q]\end{aligned}$$

5. Bir sonraki adımın yer değiştirme, hız ve ivmelerinin bulunması döngünün tekrarı

$$\begin{aligned}[U_{n+\theta}] &= [WW] \\ [WW] &= [D]^{-1}[X_5] \\ [\dot{U}_{n+\theta}] &= [WWW] \\ [WWW] &= -2[XX_0] + (6/(\theta h)^2)[WW] - (6/(\theta h)^2)[U_0] - (6/(\theta h))[V_0] \\ [\dot{U}_0] &= [WW_0] \\ [WW_0] &= -2[V_0] - (h\theta/2)[XX_0] + (3/(\theta h))[WW] - (3/(\theta h))[U_0] \\ [\dot{U}_{n+1}] &= [WWW_1] \\ [WWW_1] &= [XX_0] + (1/\theta)[WWW] - (1/\theta)[XX_0] \\ [U_{n+1}] &= [WW_1] \\ [WW_1] &= ((h^2/6))[WWW_1] + ((2h^2)/6)[XX_0] + [U_0] + h[V_0] \\ [\dot{U}_{n+1}] &= [WW_0_1] \\ [WW_0_1] &= -2[V_0] - (h/2)[XX_0] + (3/h)[WW_1] - (3/h)[U_0] \\ [U_0] &= [WW_1] \\ [V_0] &= [WW_0_1] \\ [XX_0] &= [WWW_1] \\ [P_0] &= [P_n]\end{aligned}$$

EK-B

FORTRAN 90 Programları

```
program MERKEZFARK
real, dimension(:,:), allocatable:: M,K,C,D,E,S,AG,BG
real, dimension(:), allocatable:: U0,V0,X0,X1,X2,X3,X4,Pn,WW,P0
real, dimension(:), allocatable:: U1,U2,U3,BR,FF
integer I,J,N,r,p
real h,hh,a
print*, 'N Kat adedidini giriniz'
read*, N
print*, 'h zaman aralığını giriniz'
read*, h
allocate(M(N,N),K(N,N),C(N,N),D(N,N),E(N,N),S(N,N),AG(N,N+1))
allocate (X0(N),X1(N),X2(N),X3(N),X4(N),P0(N),WW(N))
allocate (U0(N),V0(N),U1(N),U2(N),U3(N),Pn(N),BR(N),FF(N))
print*, "M matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((M(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "K matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((K(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "C matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((C(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*
print*, "U0 İlk yer değiştirme vektörünü giriniz:"
read*, (U0(J),J=1,N)
print*, "V0 İlk hız vektörünü giriniz:"
read*, (U1(J),J=1,N)
print*, "P0 İlk kuvvet vektörünü giriniz:"
read*, (P0(J),J=1,N)
print*
do i=1,N
do j=1,N
U1(i)=U1(i)+K(i,j)*U0(j)
end do
end do
print*
do i=1,N
do j=1,N
U2(i)=U2(i)+C(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
U3(i)=P0(i)-U2(i)-U1(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=M(I,J)
end do
```

```

end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=U3(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
do i=1,N
X0(i)=U0(i)+(h**2/2)*WW(i)-h*V0(i)
end do
print*
do i=1,N
do j=1,N
D(i,j)=(1/(h**2))*M(i,j)+(1/(2*h))*C(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
E(i,j)=(2/(h**2))*M(i,j)-K(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
S(i,j)=(1/(2*h))*C(i,j)-(1/(h**2))*M(i,j)
end do
end do
print*,"BR vektörünü giriniz:"
read*,(BR(J),J=1,N)
do i=1,N
do j=1,N
FF(i)=FF(i)+M(i,j)*BR(j)
end do
end do
print*,"hh adım sayısını giriniz:"
read*,hh
open(8,FILE='DOSYA1.txt',STATUS='UNKNOWN',
FORM='FORMATTED')
do r=1,hh
read(8,2,end=12)a
do i=1,N
Pn(i)=a*FF(i)
end do
2 format(F14.10)
print*
print*
do i=1,N
do j=1,N
X2(i)=X2(i)+E(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N

```

```

X3(i)=X3(i)+S(i,j)*X0(j)
end do
end do
do i=1,N
X4(i)=X3(i)+X2(i)+Pn(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=D(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=X4(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
hh=r*h
print*,"h=",hh," için"
print*
do I=1,N
write(*,1) I,WW(I)
1 format("U",I2"=",F8.4)
end do
print*
open(9,FILE='DOSYA2.txt',STATUS='UNKNOWN',
FORM='FORMATTED')
write(9,4)hh
4 format(F6.3)
do I=1,N
write(9,1)I,WW(I)
print*
end do
print*
do i=1,N
X0(i)=U0(i)
end do
do i=1,N
U0(i)=WW(i)
end do
do i=1,N
X2(i)=0
end do
do i=1,N
X3(i)=0
end do
end do
endfile(8)
12.close(8)
STOP
CONTAINS
SUBROUTINE GAUSS(L,W,N)

```

```

INTEGER,INTENT(IN)::N
REAL,DIMENSION(:,:),INTENT(IN)::L
REAL,DIMENSION(:),INTENT(OUT)::W
REAL,DIMENSION(N,N+1)::AG
INTEGER::Z,J,P,I
REAL SS
AG=L
DO Z=1,N-1
DO J=Z+1,N
DO P=Z+1,N+1
AG(J,P)=AG(J,P)-AG(J,Z)/AG(Z,Z)*AG(Z,P)
END DO
END DO
END DO
IF(L(N,N)==0)THEN
WRITE(*,*)"SISTEMIN TEK BIR ÇÖZUMU YOK"
STOP
ELSE
W(N)=AG(N,N+1)/AG(N,N)
END IF
DO I=N-1,1,-1
SS=0
DO J=I+1,N
SS=SS+AG(I,J)*W(J)
END DO
W(I)=1/AG(I,I)*(AG(I,N+1)-SS)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE GAUSS
END PROGRAM MERKEZFARK

```

```

program ORTALAMAIVME
real, dimension(:,:), allocatable:: M,K,C,D,E,S,AG
real, dimension(:), allocatable:: X0,XX0,X2,X3,X4,X5,Pn,WW
real, dimension(:), allocatable:: U0,V0,U1,U2,U3,P0,BR,FF
integer I,J,N,r,p
real h,hh,a
print*, 'N Kat adedidini giriniz'
read*, N
print*, 'h zaman aralığını giriniz'
read*, h
allocate(M(N,N),K(N,N),C(N,N),D(N,N),E(N,N),S(N,N),AG(N,N+1))
allocate (X0(N),XX0(N),X2(N),X3(N),X4(N),X5(N),Pn(N),WW(N))
allocate (U0(N),V0(N),U1(N),U2(N),U3(N),P0(N),FF(N),BR(N))
print*, "M matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((M(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "K matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((K(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "C matrisini satır satır giriniz:"
read*, ((C(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "Uo İlk yer değiştirme vektörün giriniz:"
read*, (U0(J),J=1,N)
print*, "Uo ilk hız vektörün giriniz:"
read*, (V0(J),J=1,N)
print*, "P0 İlk kuvvet vektörünü giriniz:"
read*, (P0(J),J=1,N)
print*
print*
do i=1,N
do j=1,N
U1(i)=U1(i)+K(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
U2(i)=U2(i)+C(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
U3(i)=P0(i)-U2(i)-U1(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=M(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=U3(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
do i=1,N

```

```

XX0(i)=WW(I)
end do
do i=1,N
do j=1,N
D(i,j)=(4/h**2)*M(i,j)+(2/h)*C(i,j)+K(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
E(i,j)=(4/h**2)*M(i,j)+(2/h)*C(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
S(i,j)=(4/h)*M(i,j)+C(i,j)
end do
end do
print*, "BR vektörünü giriniz:"
read*,(BR(J),J=1,N)
do i=1,N
do j=1,N
FF(i)=FF(i)+M(i,j)*BR(j)
end do
end do
print*, "hh adım sayısını giriniz:"
read*,hh
open(6,FILE="DOSYA1.txt",STATUS="UNKNOWN",
FORM="FORMATTED")
do r=1,hh
read(6,2,END=12)a
do i=1,N
Pn(i)=a*FF(i)
end do
2 format(F14.10)
do i=1,N
do j=1,N
X2(i)=X2(i)+E(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
X3(i)=X3(i)+S(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
X4(i)=X4(i)+M(i,j)*XX0(j)
end do
end do
do i=1,N

```

```

X5(i)=X4(i)+X3(i)+X2(i)+Pn(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=D(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=X5(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
print*
hh=r*h
print*,"h=",hh,"için"
print*
do I=1,N
write(*,1) I,WW(I)
1 format("U",I2)="F8.4)
end do
print*
print*
open(7,FILE='DOSYA2.txt',STATUS='UNKNOWN',FORM='FORMATTED')
write(7,4)hh
4 format(F6.3)
do I=1,N
write(7,1)I,WW(I)
print*
end do
do i=1,N
XX0(i)=-XX0(i)+(4/h**2)*WW(I)-(4/h**2)*U0(i)-(4/h)*V0(i)
end do
do i=1,N
V0(i)=-V0(i)+(2/h)*WW(I)-(2/h)*U0(i)
end do
do i=1,N
U0(i)=WW(I)
end do
do i=1,N
X2(i)=0
end do
do i=1,N
X3(i)=0
end do
do i=1,N
X4(i)=0
end do
end do
ENDFILE(6)
12 CLOSE(6)
STOP

```

```

CONTAINS
SUBROUTINE GAUSS(L,W,N)
INTEGER,INTENT(IN)::N
REAL,DIMENSION(:,,:),INTENT(IN)::L
REAL,DIMENSION(:,),INTENT(OUT)::W
REAL,DIMENSION(N,N+1)::AG
INTEGER::Z,J,P,I
REAL=SS
AG=L
DO Z=1,N-1
DO J=Z+1,N
DO P=Z+1,N+1
AG(J,P)=AG(J,P)-AG(J,Z)/AG(Z,Z)*AG(Z,P)
END DO
END DO
END DO
IF(AG(N,N)==0)THEN
WRITE(*,*)"SISTEMIN TEK BIR ÇÖZUMU YOK"
STOP
ELSE
W(N)=AG(N,N+1)/AG(N,N)
END IF
DO I=N-1,1,-1
SS=0
DO J=I+1,N
SS=SS+AG(I,J)*W(J)
END DO
W(I)=1/AG(I,I)*(AG(I,N+1)-SS)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE GAUSS
end program ORTALAMAIVME

```

```

program DOGRUSALIVME
real, dimension(:,:), allocatable:: M,K,C,D,E,S,F,AG
real, dimension(:), allocatable:: XX0,XXX,X2,X3,X4,X5,Pn,WW
real, dimension(:), allocatable:: U0,V0,U1,U2,U3,P0,BR,FF
integer I,J,N,r,p
real h,hh,a
print*,'N Kat adedidini giriniz'
read*,N
print*,'h zaman aralığını giriniz'
read*,h
allocate(M(N,N),K(N,N),C(N,N),D(N,N),E(N,N),S(N,N),F(N,N))
allocate(AG(N,N+1))
allocate (XX0(N),XXX(N),X2(N),X3(N),X4(N),X5(N),FF(N),BR(N))
allocate (Pn(N),WW(N),U0(N),V0(N),U1(N),U2(N),U3(N),P0(N))
print*,"M matrisini satır satır giriniz:"
read*,((M(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*,"K matrisini satır satır giriniz:"
read*,((K(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*,"C matrisini satır satır giriniz:"
read*,((C(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*,"Uo İlk yer değiştirme vektörün giriniz:"
read*,(U0(J),J=1,N)
print*,"Vo ilk hız vektörün giriniz:"
read*,(V0(J),J=1,N)
print*,"P0 İLK KUVVET vektörün giriniz:"
read*,(P0(J),J=1,N)
print*
do i=1,N
do j=1,N
U1(i)=U1(i)+K(i,j)*U0(j)
end do
end do
print*
do i=1,N
do j=1,N
U2(i)=U2(i)+C(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
U3(i)=P0(i)-U2(i)-U1(i)
end do
print*
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=M(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=U3(I)
end do

```

```

CALL GAUSS(AG,WW,N)
do i=1,N
XX0(i)=WW(I)
end do
do i=1,N
do j=1,N
D(i,j)=(6/h**2)*M(i,j)+(3/h)*C(i,j)+K(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
E(i,j)=(6/h**2)*M(i,j)+(3/h)*C(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
S(i,j)=(6/h)*M(i,j)+2*C(i,j)
end do
end do
print*
print*
do i=1,N
do j=1,N
F(i,j)=2*M(i,j)+(h/2)*C(i,j)
end do
end do
print*,"BR vektörünü gir:"
read*,(BR(J),J=1,N)
do i=1,N
do j=1,N
FF(i)=FF(i)+M(i,j)*BR(j)
end do
end do
print*,"hh adım sayısını giriniz:"
read*,hh
open(10,FILE="DOSYA1.txt",STATUS="UNKNOWN",
FORM="FORMATTED")
do r=1,hh
read(10,2,END=12)a
do i=1,N
Pn(i)=a*FF(i)
end do
2 format(F14.4)
do i=1,N
do j=1,N
X2(i)=X2(i)+E(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N

```

```

X3(i)=X3(i)+S(i,j)*V0(j)
end do
end do
print*
do i=1,N
do j=1,N
X4(i)=X4(i)+F(i,j)*XX0(j)
end do
end do
do i=1,N
X5(i)=X4(i)+X3(i)+X2(i)+Pn(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=D(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=X5(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
hh=r*h
print*,"h=",hh,"için"
print*
do I=1,N
write(*,1) I,WW(I)
1 format("U",I2"=",F8.4)
end do
open(11,FILE='DOSYA2.txt',STATUS='UNKNOWN',FORM='FORMATTED')
write(11,4)hh
4 format(F6.3)
do I=1,N
write(11,1) I,WW(I)
end do
do i=1,N
XXX(i)=-2*XX0(i)+(6/h**2)*WW(I)-(6/h**2)*U0(i)-(6/h)*V0(i)
end do
do i=1,N
V0(i)=-2*V0(i)-(h/2)*XX0(i)+(3/h)*WW(i)-(3/h)*U0(i)
end do
do i=1,N
U0(i)=WW(I)
end do
do i=1,N
XX0(i)=XXX(I)
end do
do i=1,N
X2(i)=0
end do
do i=1,N

```

```

X3(i)=0
end do
do i=1,N
X4(i)=0
end do
end do
ENDFILE(10)
12 CLOSE(10)
STOP
CONTAINS
SUBROUTINE GAUSS(L,W,N)
INTEGER,INTENT(IN)::N
REAL,DIMENSION(:,:),INTENT(IN)::L
REAL,DIMENSION(:,),INTENT(OUT)::W
REAL,DIMENSION(N,N+1)::AG
INTEGER::Z,J,P,I
REAL=SS
AG=L
DO Z=1,N-1
DO J=Z+1,N
DO P=Z+1,N+1
AG(J,P)=AG(J,P)-AG(J,Z)/AG(Z,Z)*AG(Z,P)
END DO
END DO
END DO
IF(AG(N,N)==0)THEN
WRITE(*,*)"SISTEMIN TEK BIR ÇÖZUMÜ YOK"
STOP
ELSE
W(N)=AG(N,N+1)/AG(N,N)
END IF
DO I=N-1,1,-1
SS=0
DO J=I+1,N
SS=SS+AG(I,J)*W(J)
END DO
W(I)=1/AG(I,I)*(AG(I,N+1)-SS)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE GAUSS
end program DOGRUSALIVME

```

```

program WILSONYONTEMI
real, dimension(:,:), allocatable:: M,K,C,D,E,S,F,AG
real, dimension(:), allocatable:: X0,XX0,X1,X2,X3,X4,X5,P0,WW,WW0
real, dimension(:), allocatable:: WWW,WW1,WW01,WWW1,U0,V0,U1,U2,U3
real, dimension(:), allocatable:: FF,BR,Pn,Pq
integer I,J,N,r,p
real h,Q,hh,a
print*, 'N Kat adedidini giriniz'
read*, N
print*, 'h zaman aralığını giriniz'
read*, h
print*, 'Q giriniz'
read*, Q
allocate(M(N,N),K(N,N),C(N,N),D(N,N),E(N,N),S(N,N),F(N,N))
allocate(AG(N,N+1))
allocate (X0(N),XX0(N),X1(N),X2(N),X3(N),X4(N),X5(N),Pq(N))
allocate (U0(N),V0(N),U1(N),U2(N),U3(N),Pn(N),FF(N),BR(N))
allocate (P0(N),WW(N),WWW(N),WW0(N),WW1(N),WW01(N),WWW1(N))
print*, "M matrisini satır satır giriniz:"
read*,((M(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "K matrisini satır satır giriniz:"
read*,((K(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "C matrisini satır satır giriniz:"
read*,((C(I,J),J=1,N),I=1,N)
print*, "Uo İlk yer değiştirme vektörün giriniz:"
read*,(U0(J),J=1,N)
print*, "Vo ilk hız vektörün giriniz:"
read*,(V0(J),J=1,N)
print*, "P0 vektörünü giriniz:"
read*,(P0(J),J=1,N)
print*
do i=1,N
do j=1,N
U1(i)=U1(i)+K(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
U2(i)=U2(i)+C(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
U3(i)=P0(i)-U2(i)-U1(i)
end do
print*
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=M(I,J)
end do
end do

```

```

do I=1,N
AG(I,N+1)=U3(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
do i=1,N
XX0(i)=WW(I)
end do
do i=1,N
do j=1,N
D(i,j)=(6/(h*Q)**2)*M(i,j)+(3/(Q*h))*C(i,j)+K(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
E(i,j)=(6/(h*Q)**2)*M(i,j)+(3/(Q*h))*C(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
S(i,j)=(6/(Q*h))*M(i,j)+2*C(i,j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
F(i,j)=2*M(i,j)+((h*Q)/2)*C(i,j)
end do
end do
print*, "BR vektörünü gir:"
read*,(BR(J),J=1,N)
do i=1,N
do j=1,N
FF(i)=FF(i)+M(i,j)*BR(j)
end do
end do
print*, "hh adım sayısını gir:"
read*,hh
open(12,FILE="DOSYA1.txt",STATUS="UNKNOWN",
FORM="FORMATTED")
do r=1,hh
read(12,2,END=12)a
do i=1,N
Pn(i)=a*FF(i)
end do
do i=1,N
Pq(i)=(1-Q)*P0(i)+Q*Pn(i)
end do
2 format(F14.10)
print*
print*
do i=1,N

```

```

do j=1,N
X2(i)=X2(i)+E(i,j)*U0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
X3(i)=X3(i)+S(i,j)*V0(j)
end do
end do
do i=1,N
do j=1,N
X4(i)=X4(i)+F(i,j)*XX0(j)
end do
end do
do i=1,N
X5(i)=X4(i)+X3(i)+X2(i)+Pq(i)
end do
do I=1,N
do J=1,N
AG(I,J)=D(I,J)
end do
end do
do I=1,N
AG(I,N+1)=X5(I)
end do
CALL GAUSS(AG,WW,N)
do i=1,N
WWW(i)=-2*XX0(i)+(6/(h*Q)**2)*WW(I)-(6/(h*Q)**2)*U0(i)-(6/(Q*h))*V0(i)
end do
do i=1,N
WW0(i)=(3/(Q*h))*WW(i)-(3/(Q*h))*U0(i)-2*V0(i)-((Q*h)/2)*XX0(i)
end do
do i=1,N
WWW1(i)=XX0(i)+(1/Q)*WWW(i)-(1/Q)*XX0(i)
end do
do i=1,N
WW1(i)=(h**2/6)*WWW1(i)+((2*h**2)/6)*XX0(i)+U0(i)+h*V0(i)
end do
do i=1,N
WW01(i)=-2*V0(i)-(h/2)*XX0(i)+(3/h)*WW1(i)-(3/h)*U0(i)
end do
hh=r*h
print*, "h=",hh," için"
print*
do I=1,N
write(*,1) I,WW1(I)
1 format("U",I2"=",F8.4)
end do
open(13,FILE='DOSYA2.txt',STATUS='UNKNOWN',FORM='FORMATTED')
write(13,4)hh

```

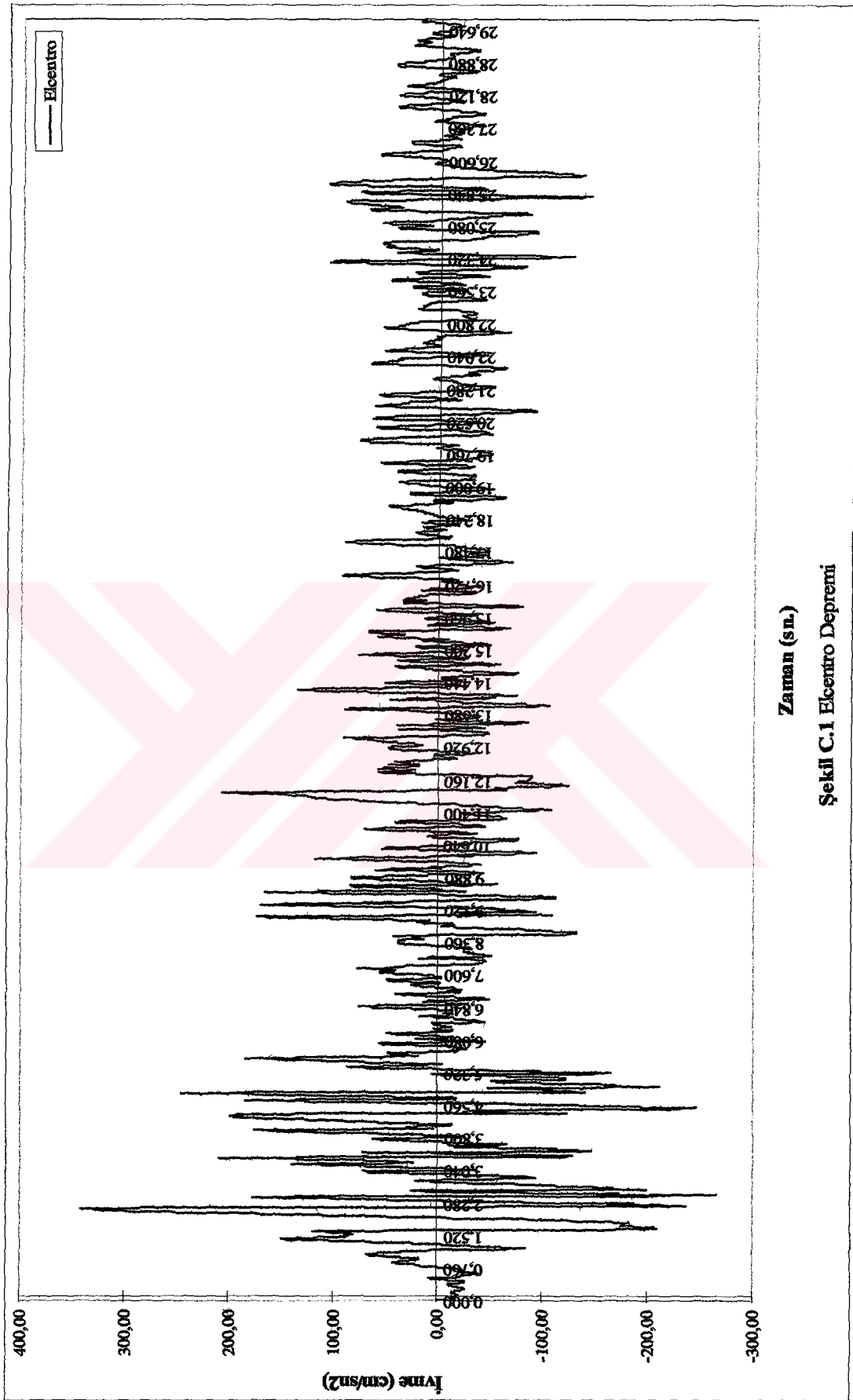
```

4 format(F6.3)
do I=1,N
write(13,1) I,WW1(I)
end do
do i=1,N
U0(i)=WW1(I)
end do
do i=1,N
V0(i)=WW01(I)
end do
do i=1,N
XX0(i)=WWW1(I)
end do
do i=1,N
P0(i)=Pn(I)
end do
do i=1,N
X2(i)=0
end do
do i=1,N
X3(i)=0
end do
do i=1,N
X4(i)=0
end do
end do
endfile(12)
12 close(12)
STOP
CONTAINS
SUBROUTINE GAUSS(L,W,N)
INTEGER,INTENT(IN)::N
REAL,DIMENSION(:,:),INTENT(IN)::L
REAL,DIMENSION(:),INTENT(OUT)::W
REAL,DIMENSION(N,N+1)::AG
INTEGER::Z,J,P,I
REAL=SS
AG=L
DO Z=1,N-1
DO J=Z+1,N
DO P=Z+1,N+1
AG(J,P)=AG(J,P)-AG(J,Z)/AG(Z,Z)*AG(Z,P)
END DO
END DO
END DO
IF(AG(N,N)==0)THEN
WRITE(*,*)"SISTEMIN TEK BIR ÇÖZUMU YOK"
STOP
ELSE
W(N)=AG(N,N+1)/AG(N,N)

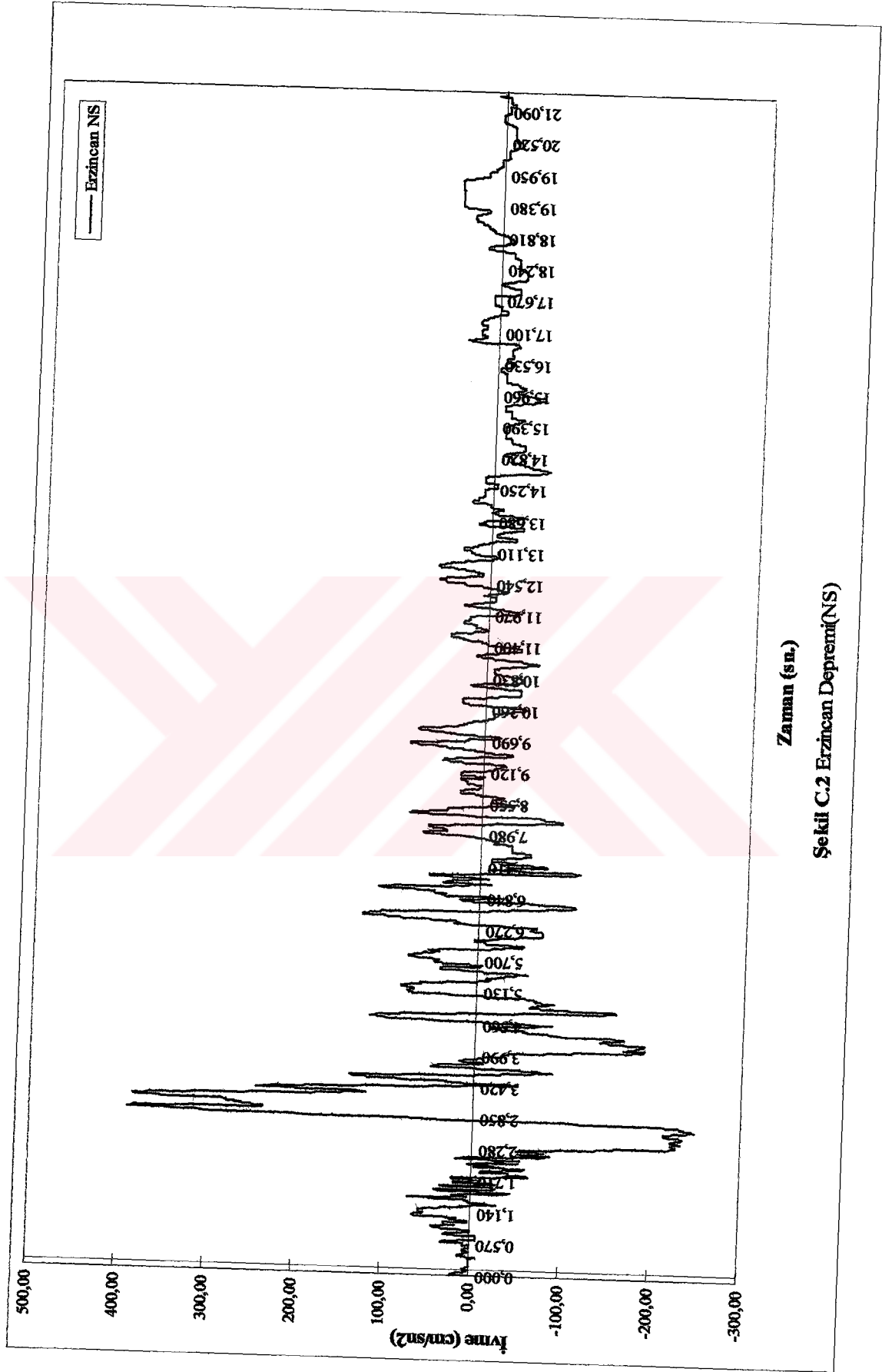
```

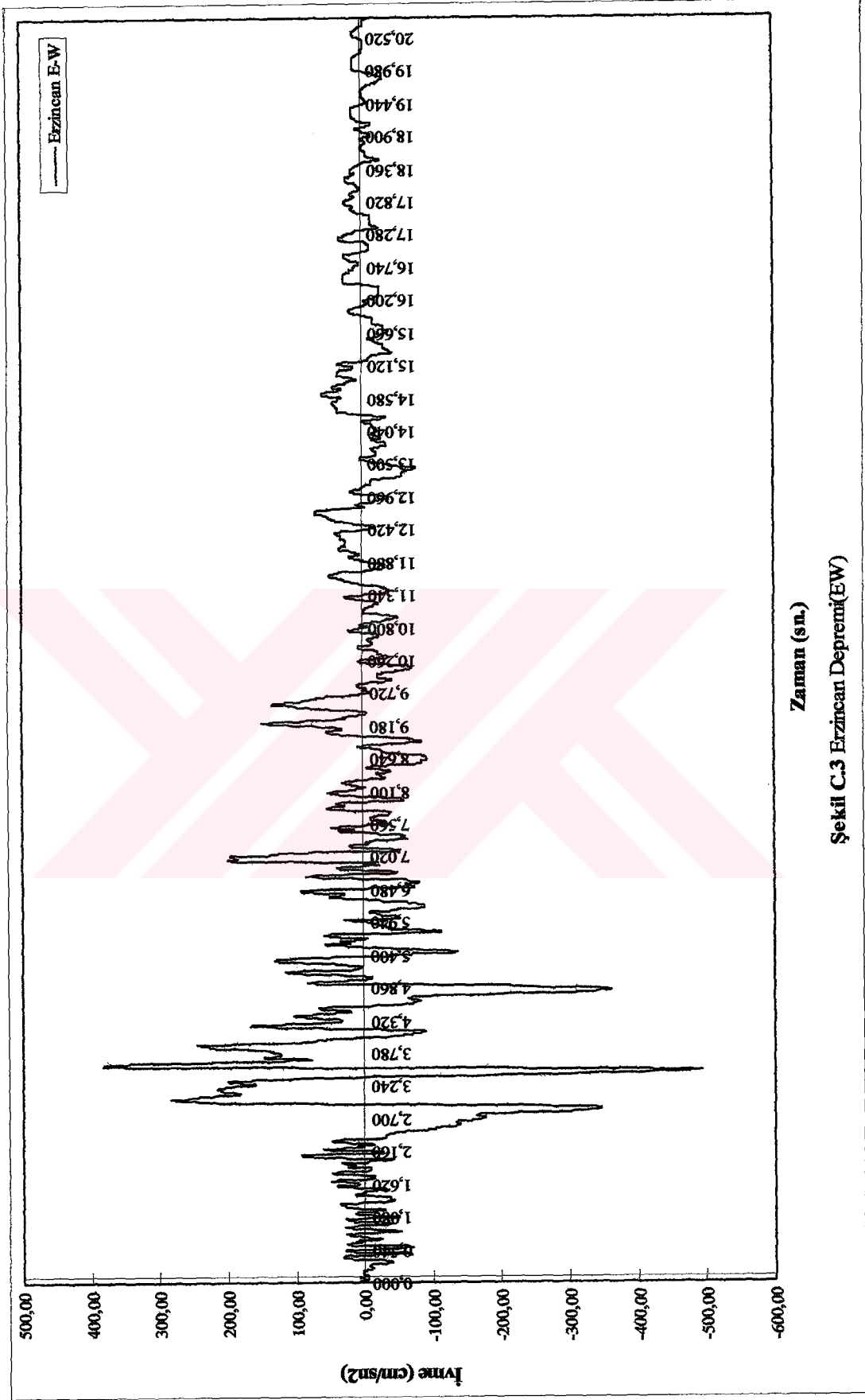
```
END IF
DO I=N-1,1,-1
SS=0
DO J=I+1,N
SS=SS+AG(I,J)*W(J)
END DO
W(I)=1/AG(I,I)*(AG(I,N+1)-SS)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE GAUSS
end program WILSONYONTEMI
```

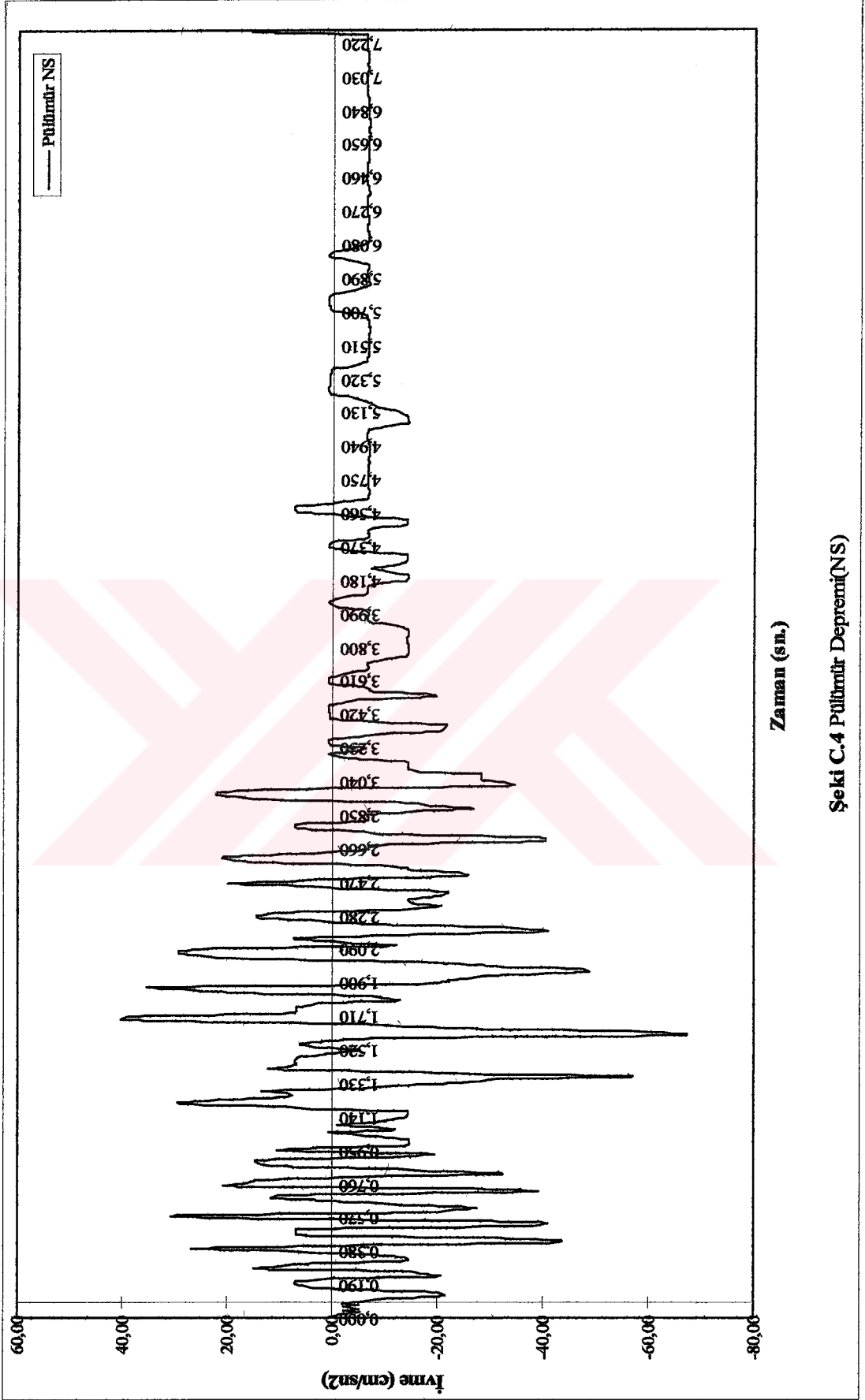




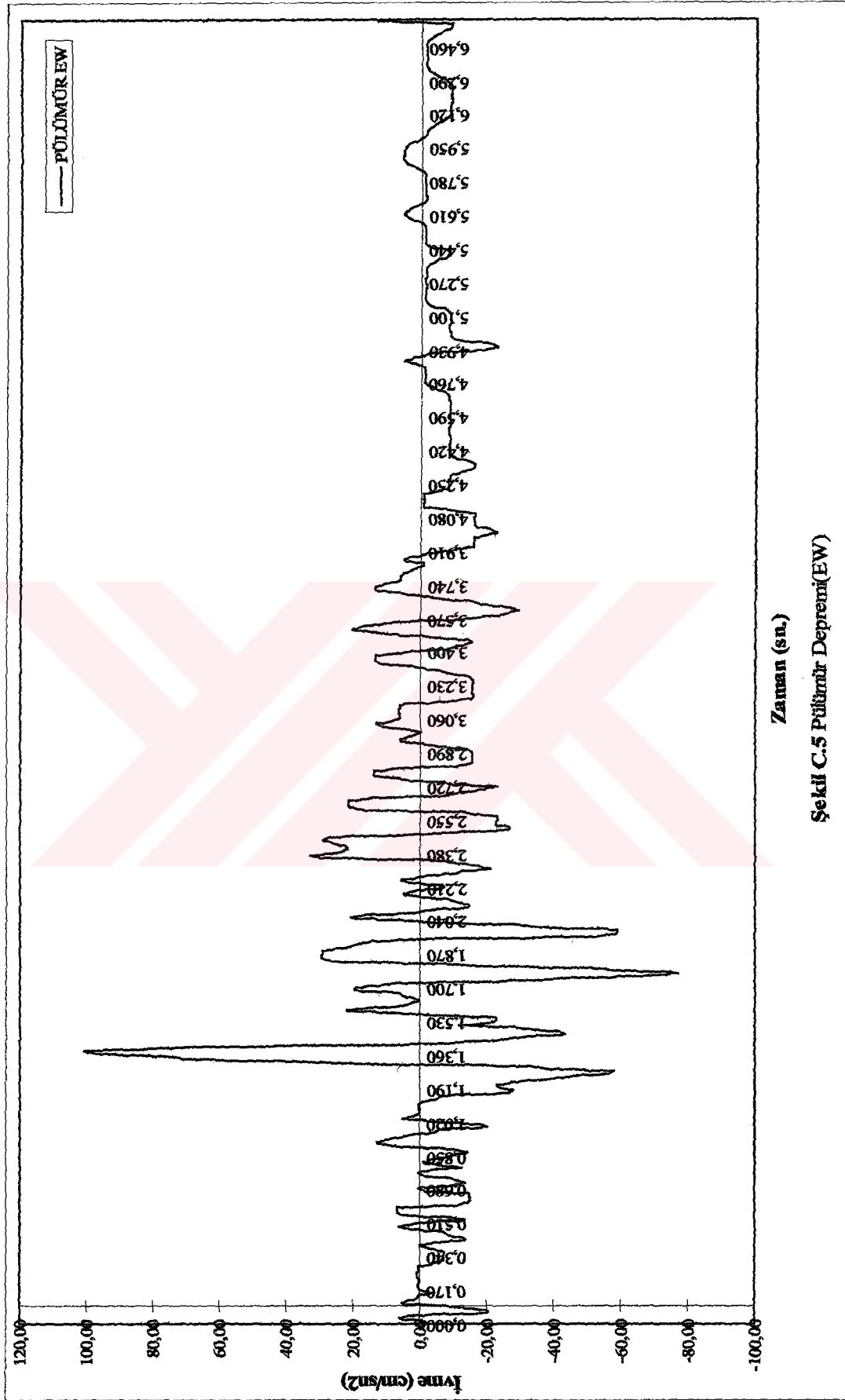
Şekil C.1 Elcentro Depremi



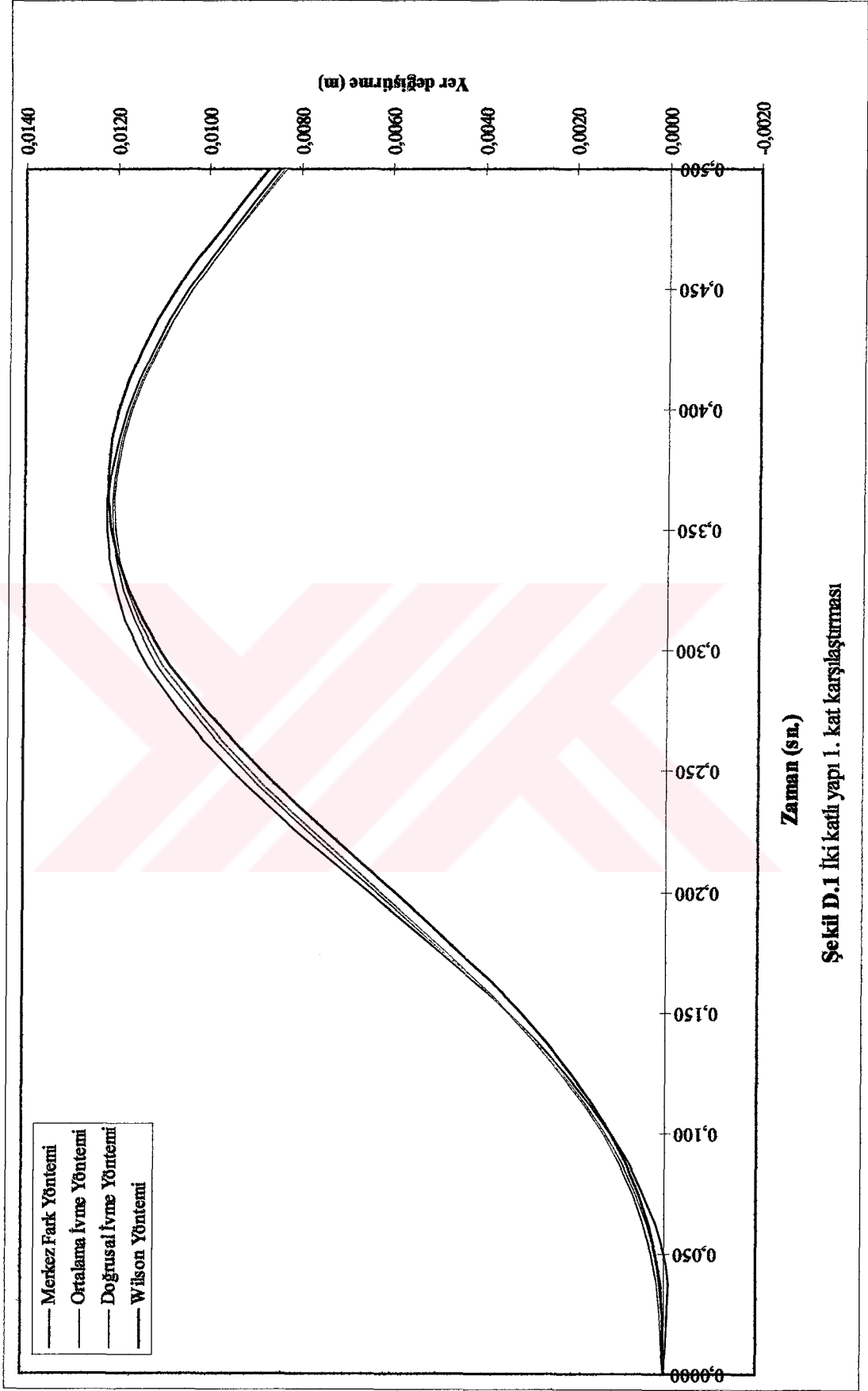




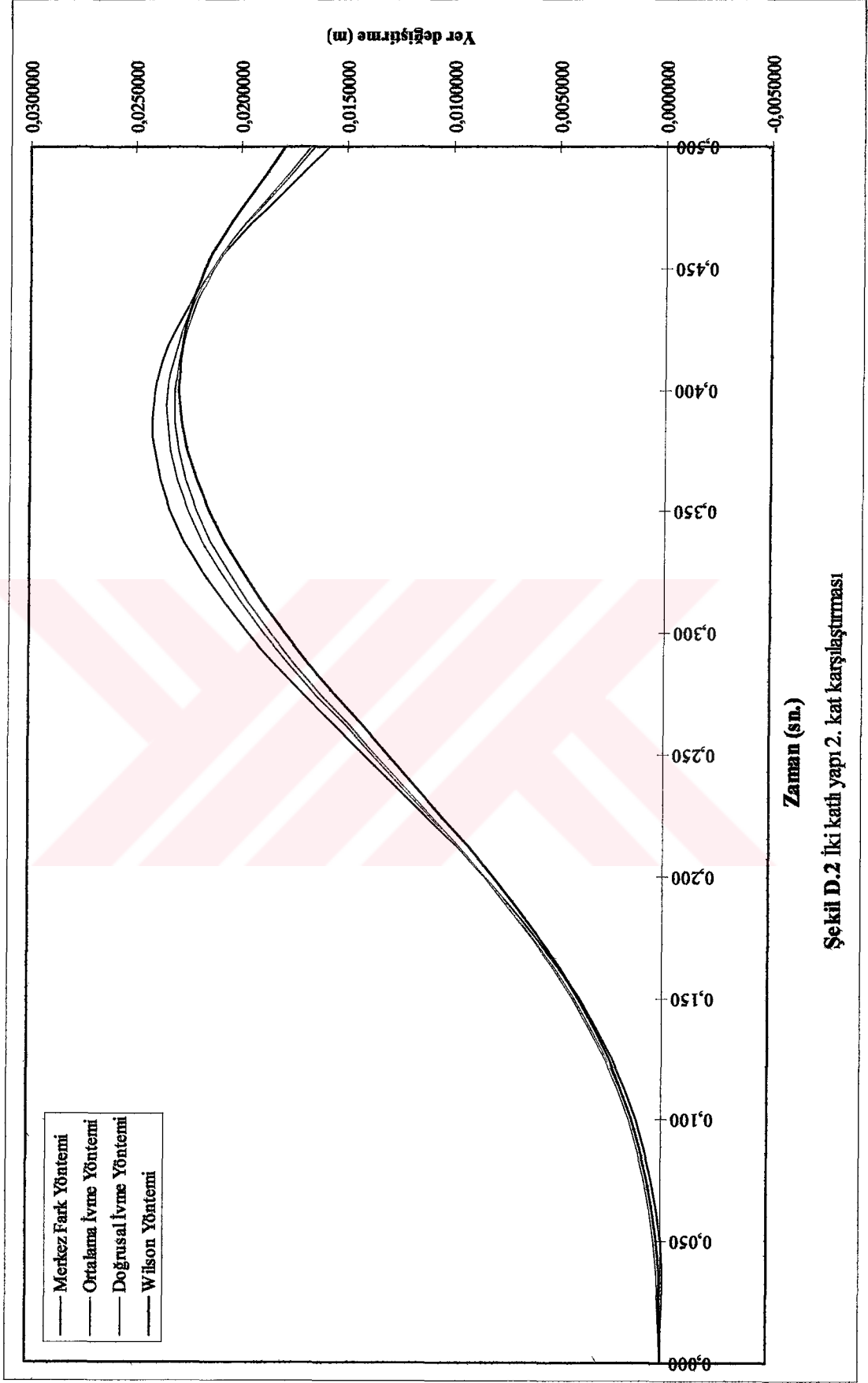
Şekil C.4 Pülhürür Depremi(NS)



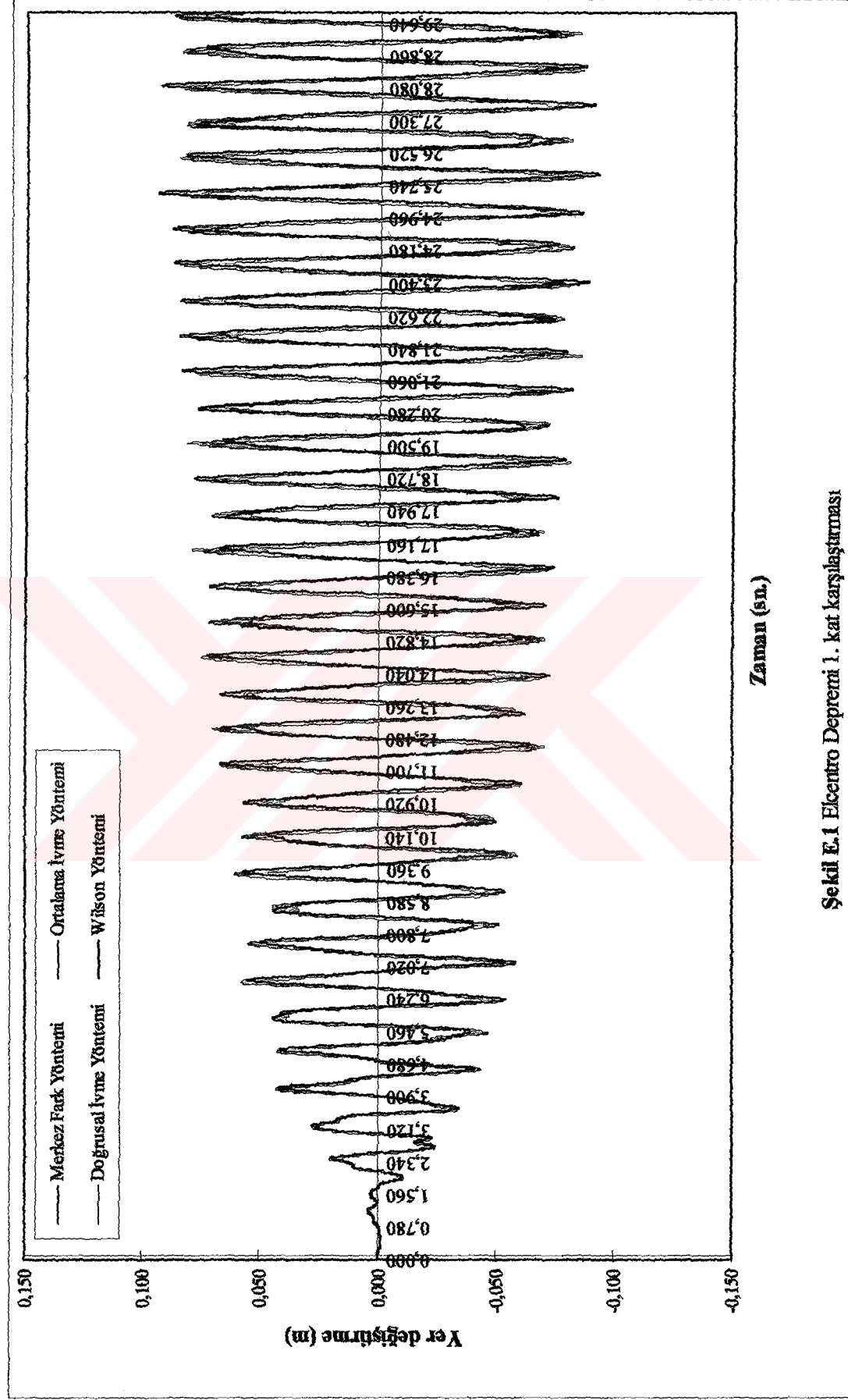
Zaman (sn.)
Şekil C.5 Pütürür Depremi(EW)



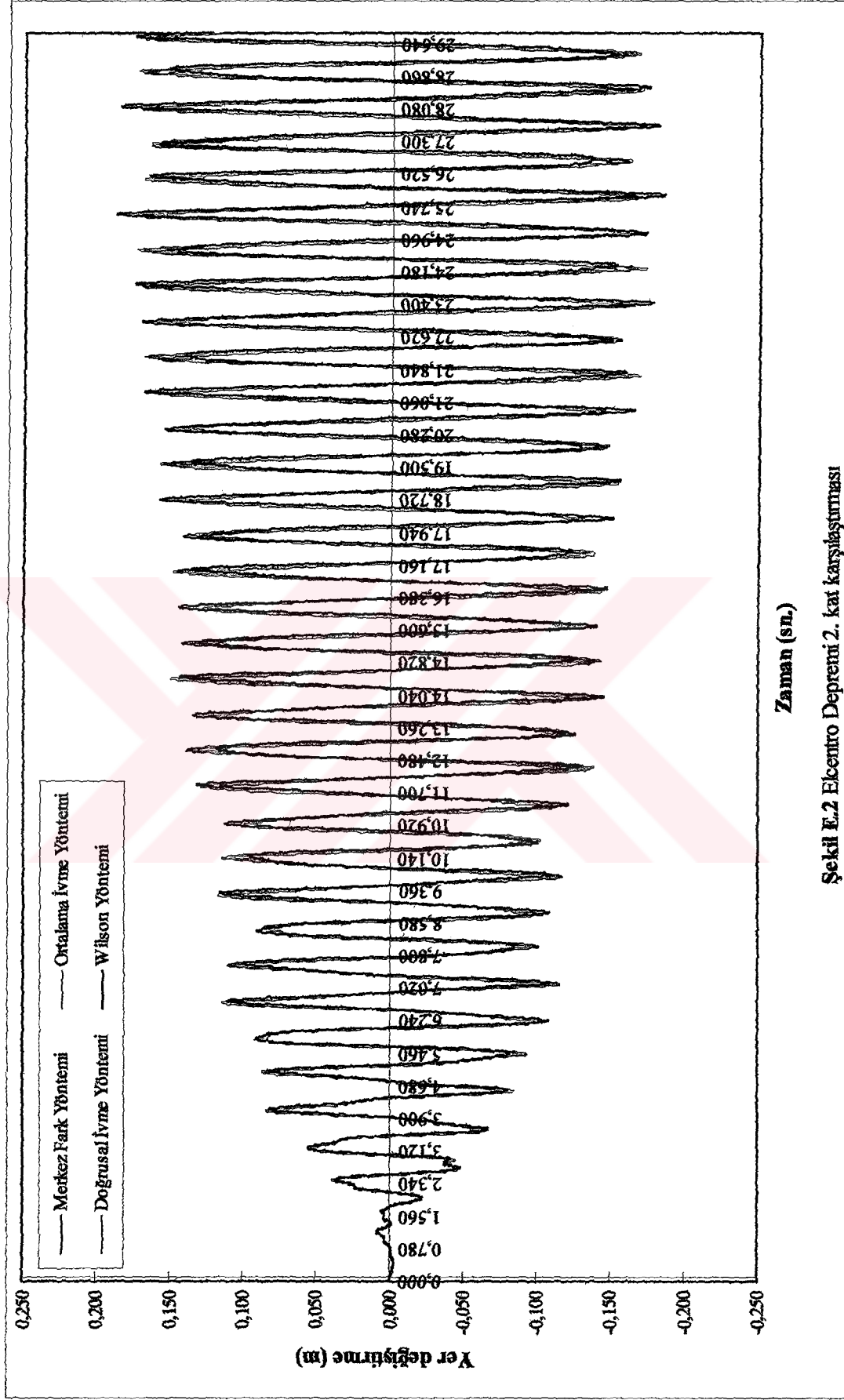
Şekil D.1 İki katlı yapı 1. kat karşılaştırması



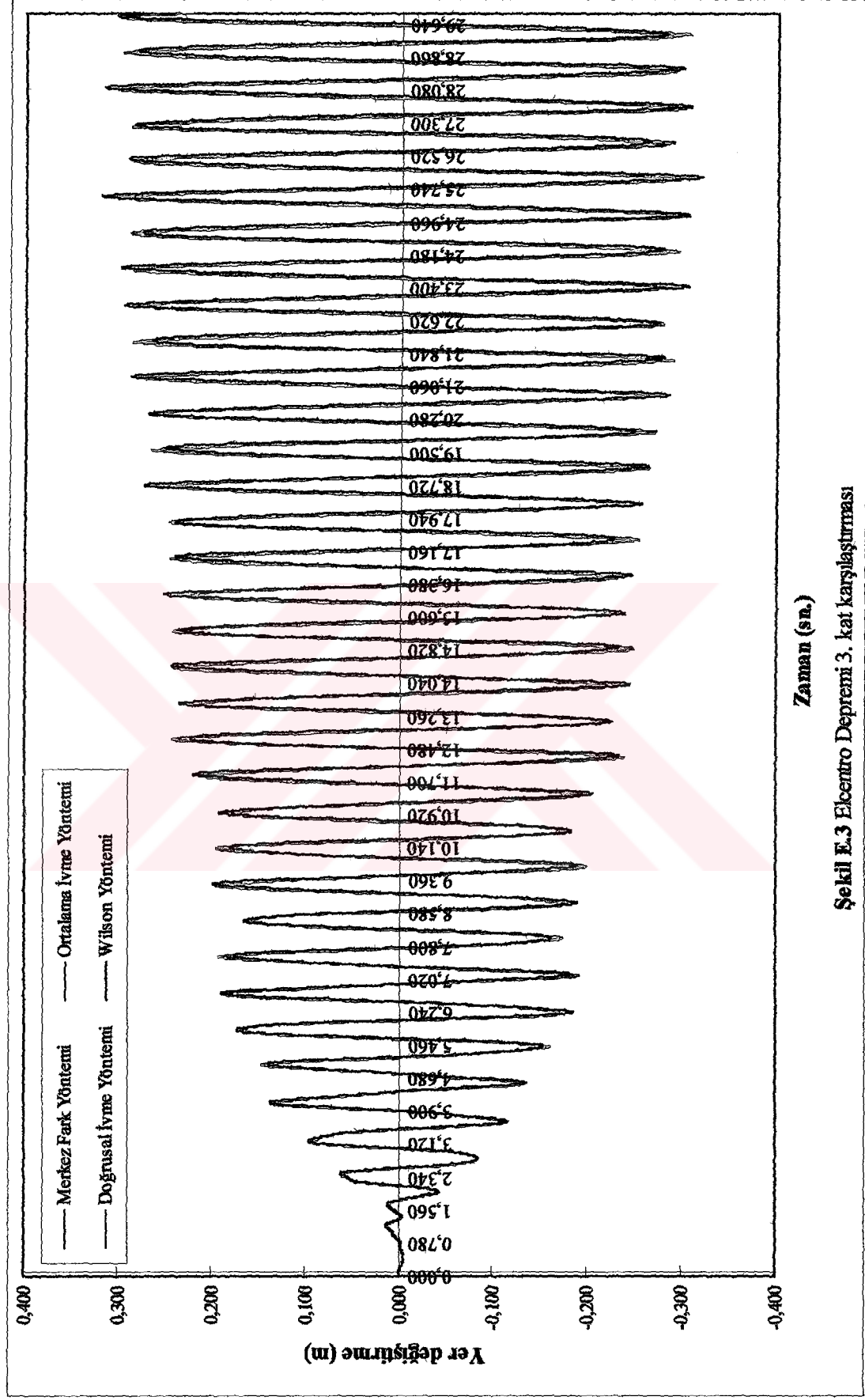
Şekil D.2 İki kath yapı 2. kat karşılaştırması



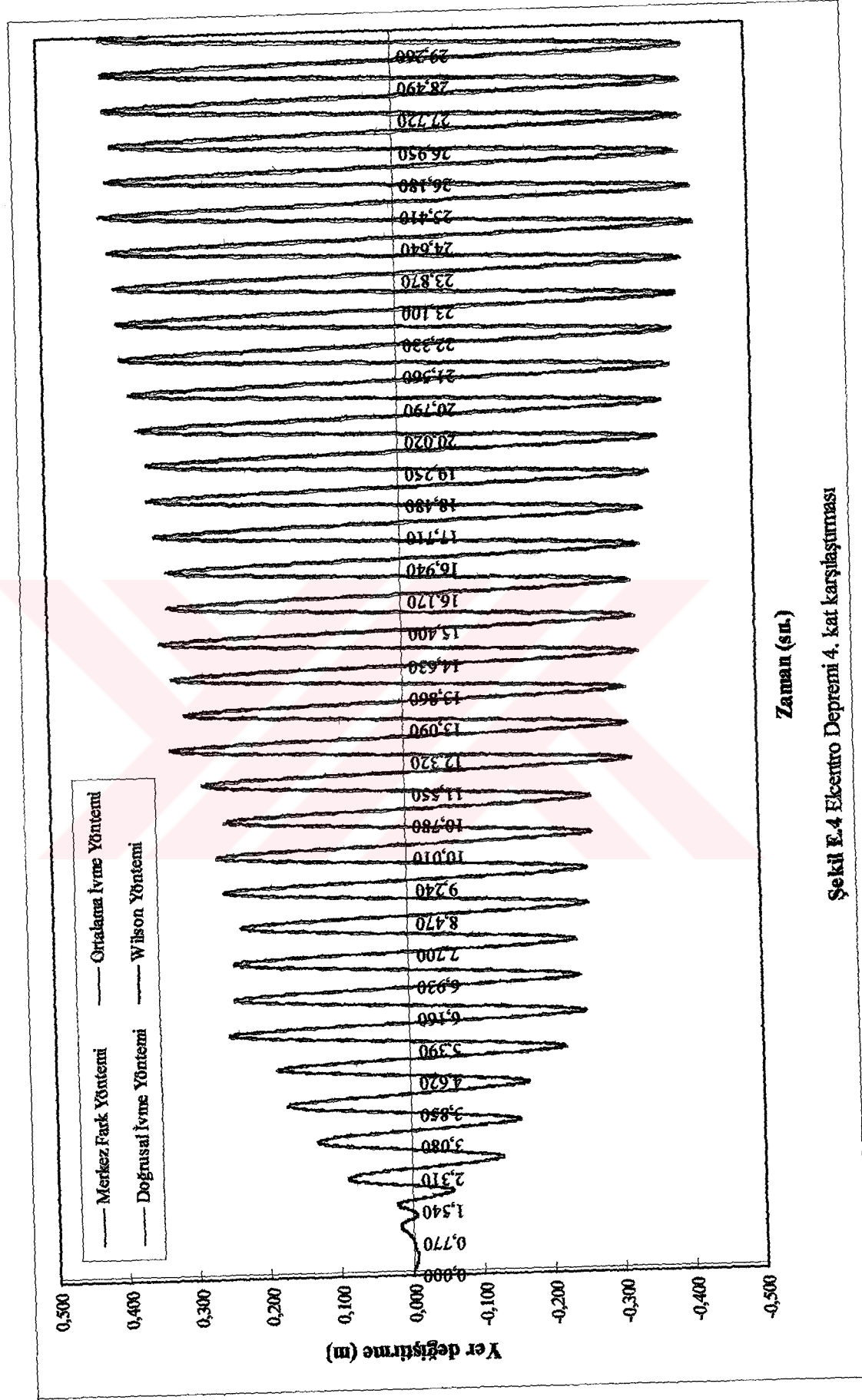
Şekil E.1 Elcentro Depremi 1. kat karşılaştırması



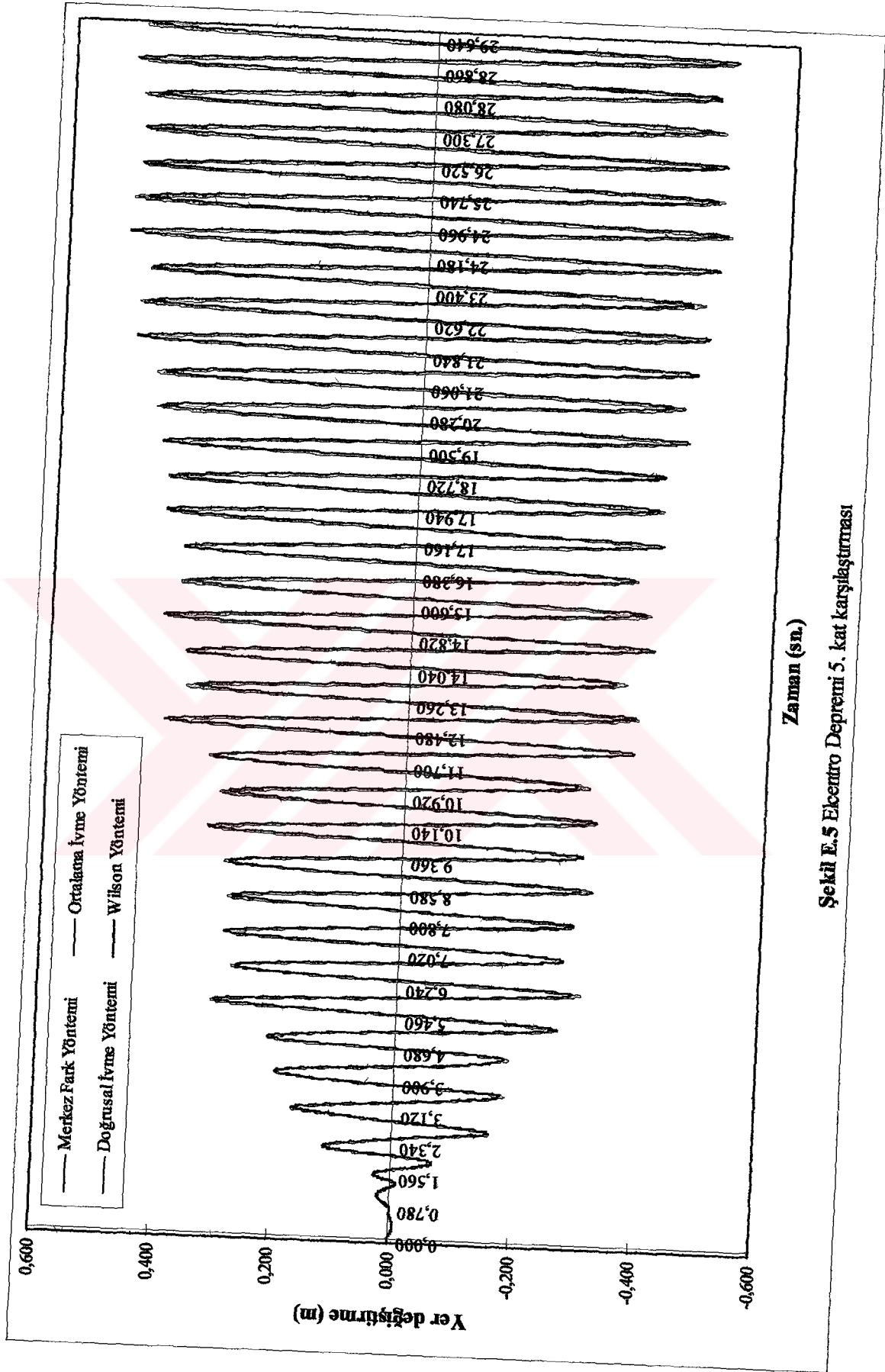
Şekil E.2 E2 Elcentro Depremi 2. kat karşılaştırması



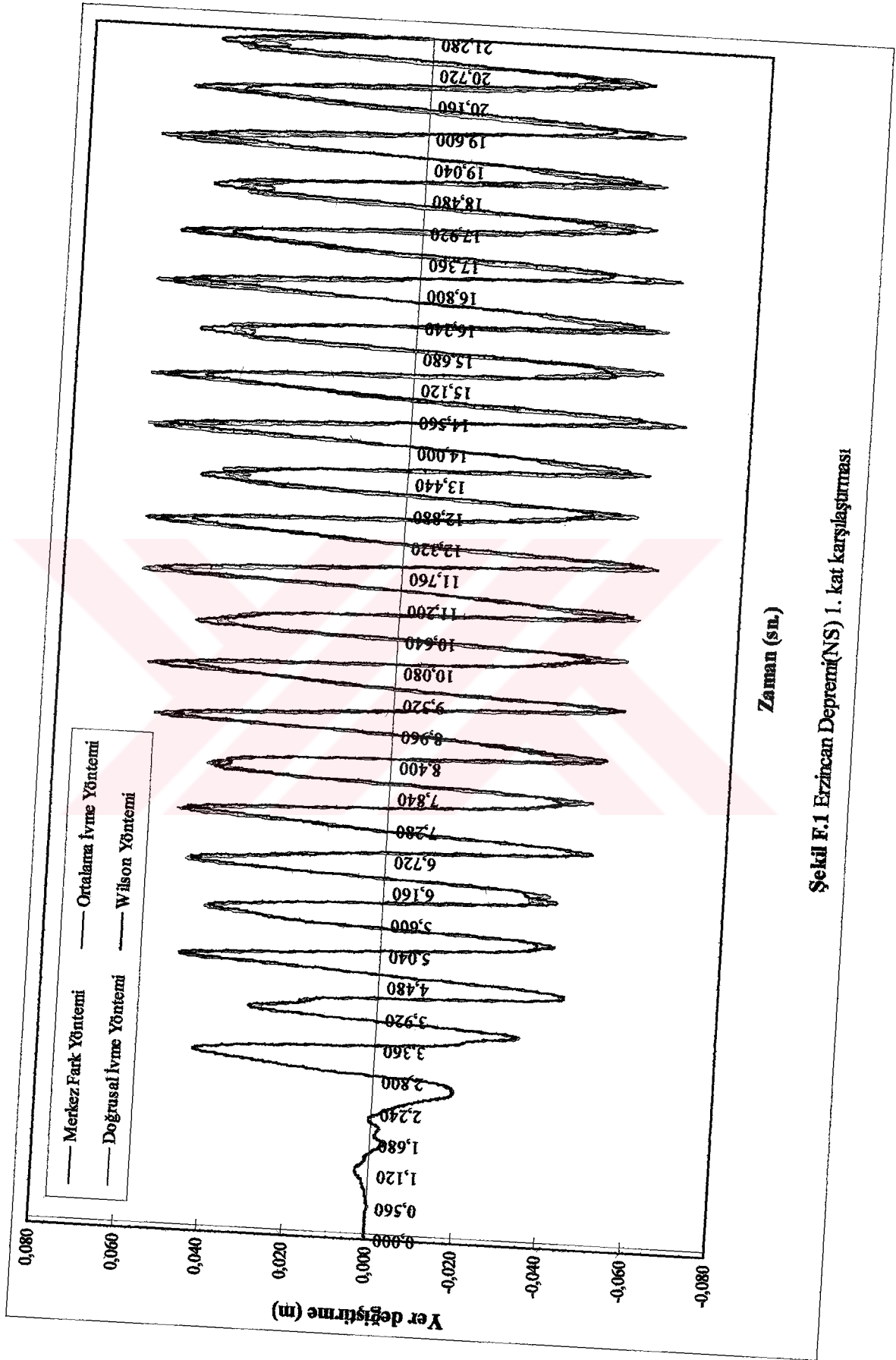
Şekil E.3 Elcentro Depremi 3. kat karşılaştırması



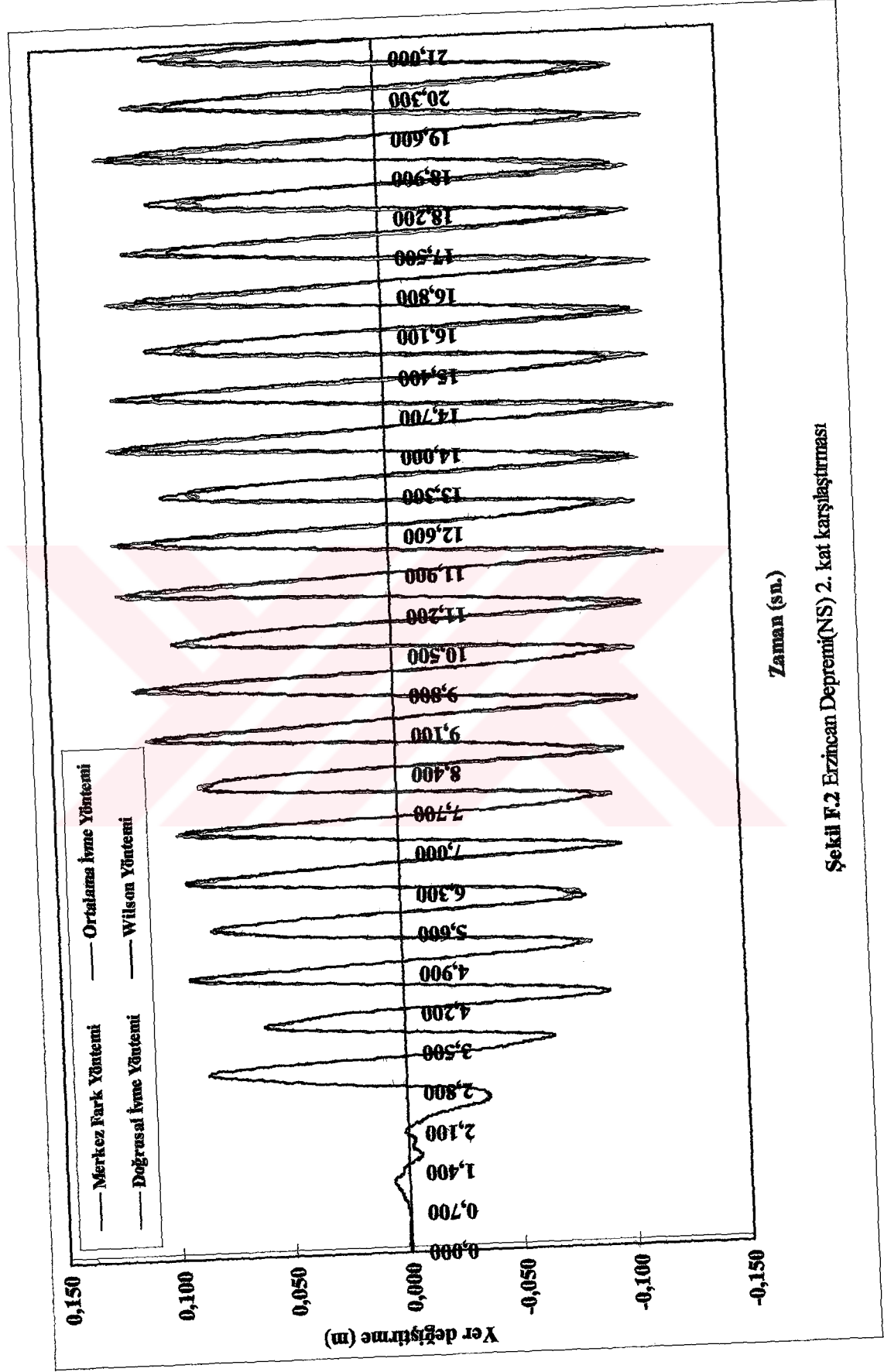
Şekil E.4 Elcentro Depremi 4. kat karşılaştırması



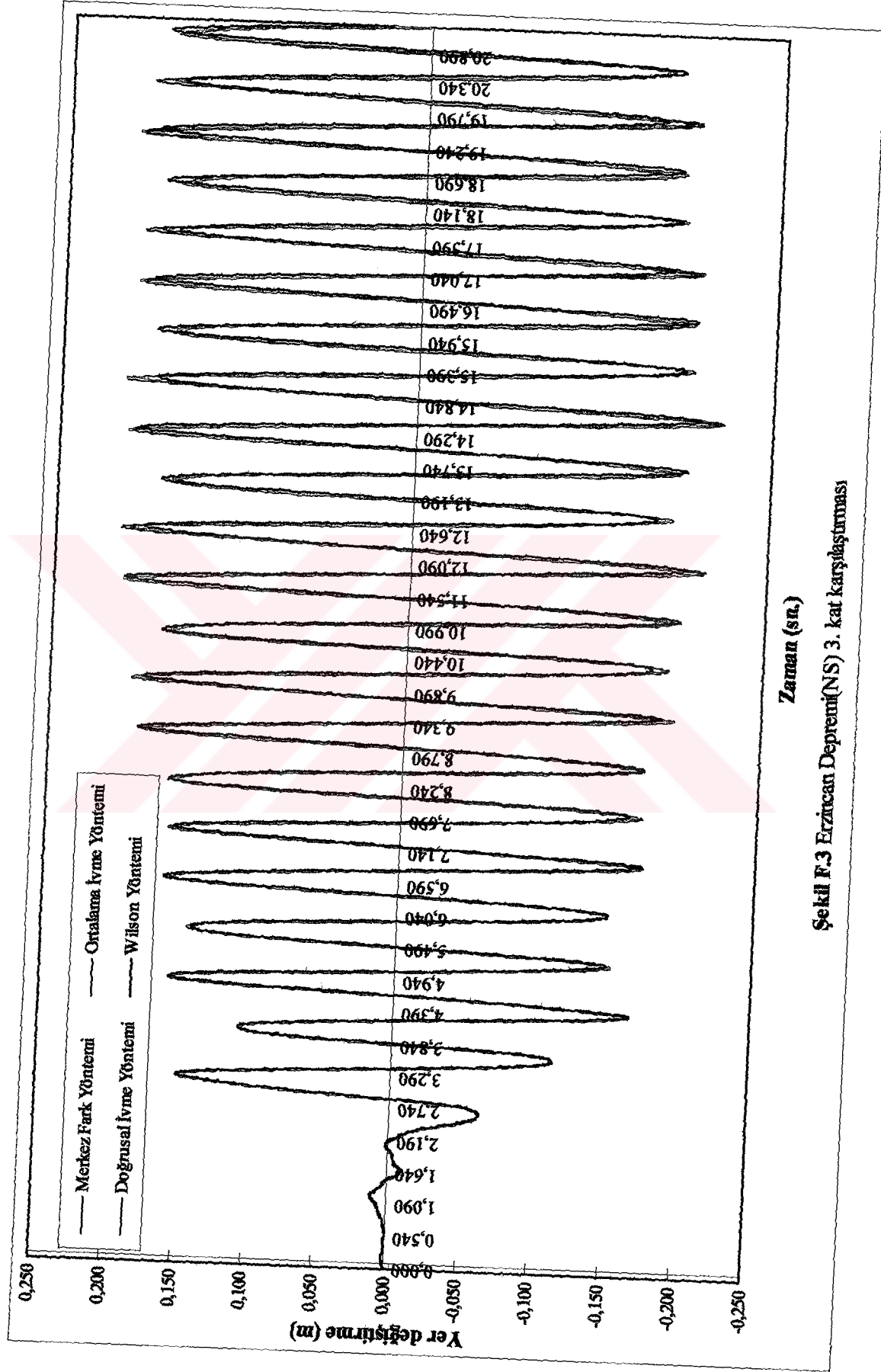
Şekil E.5 Ekcetro Depremi 5. kat karşılaştırması



Şekil F.1 Erzincan Depremi(NS) 1. kat karşılaştırması

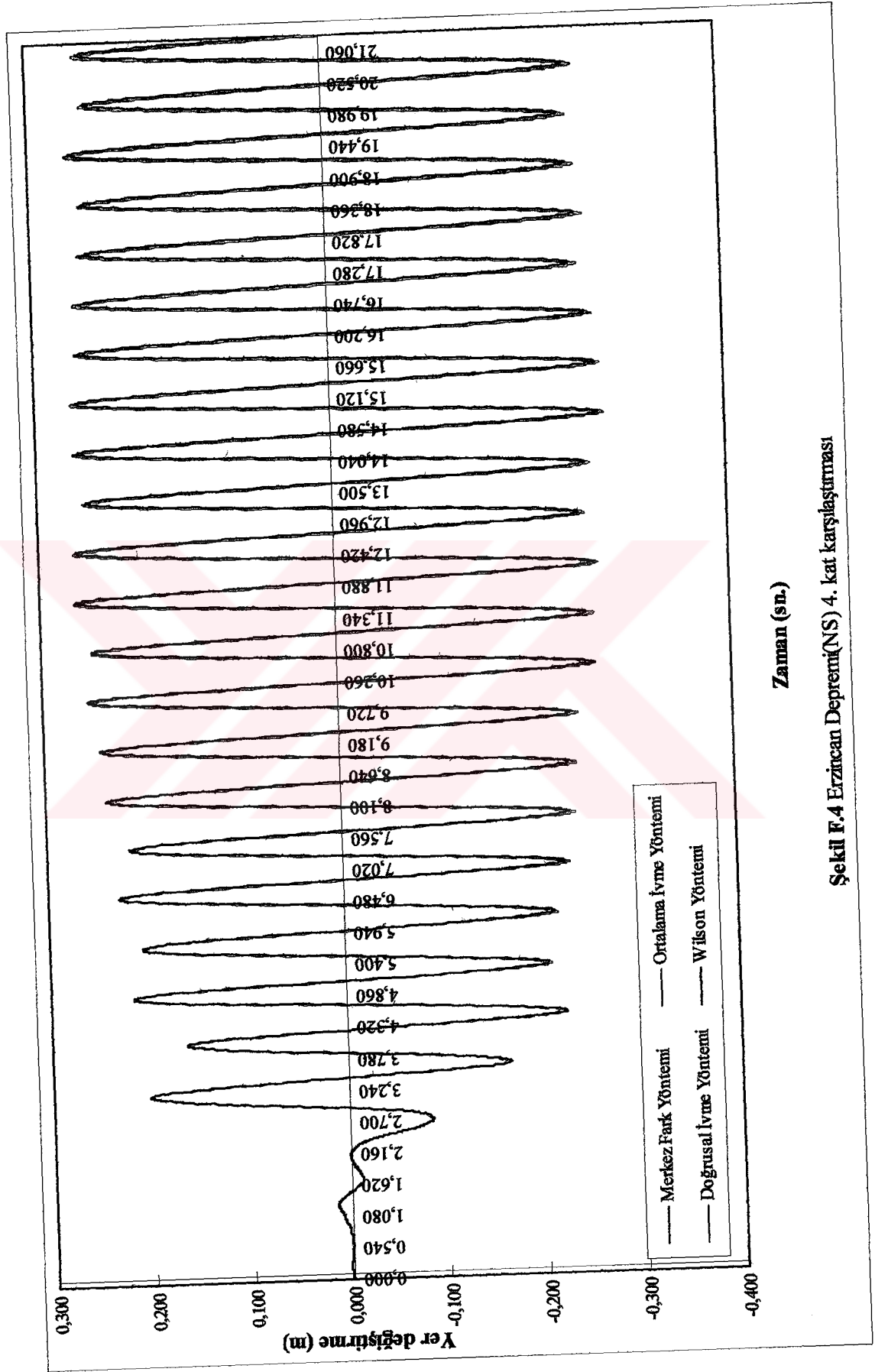


Şekil F.2 Erzincan Depremi(NS) 2. kat karşılaştırması

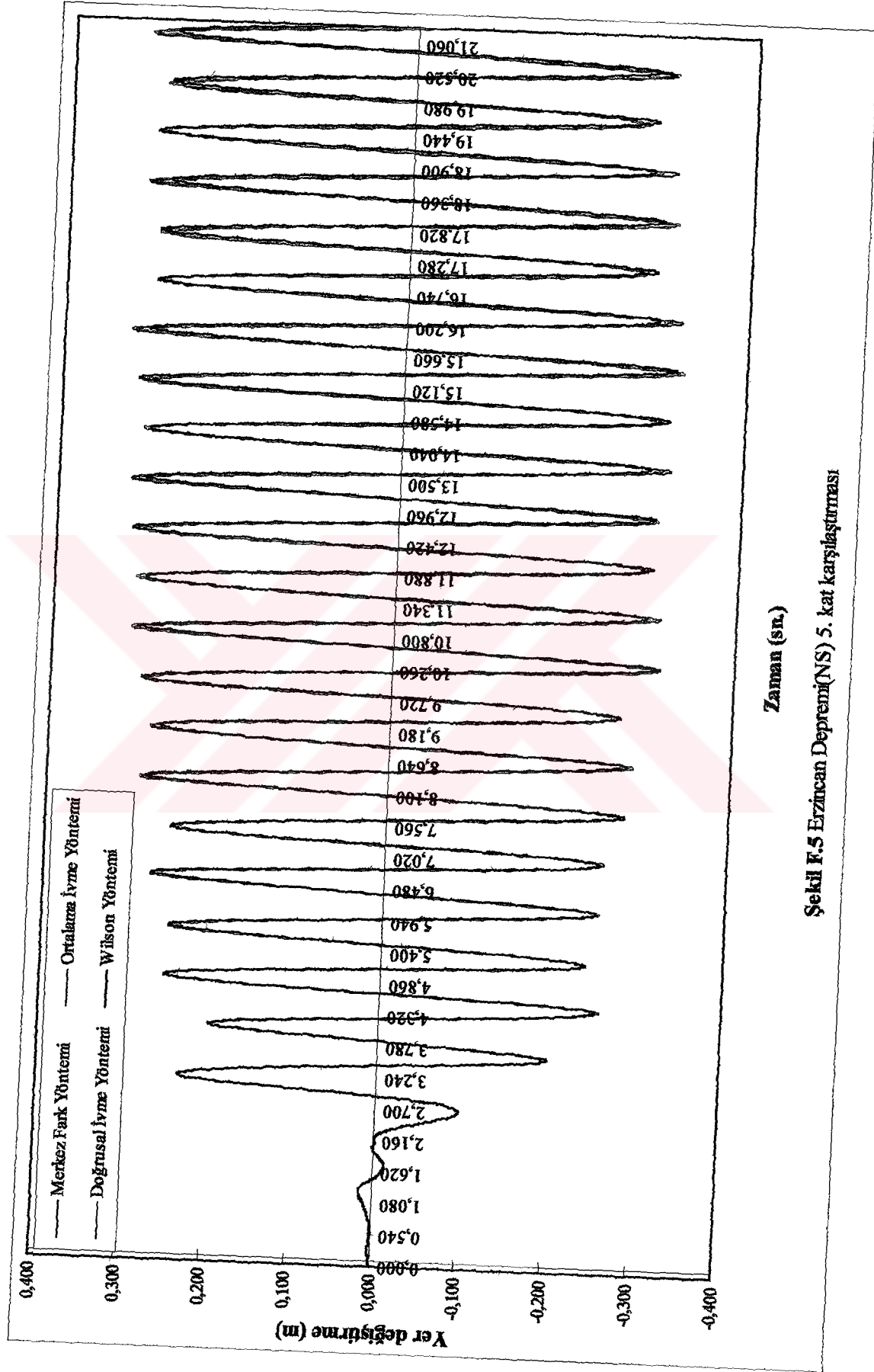


Zaman (sn.)

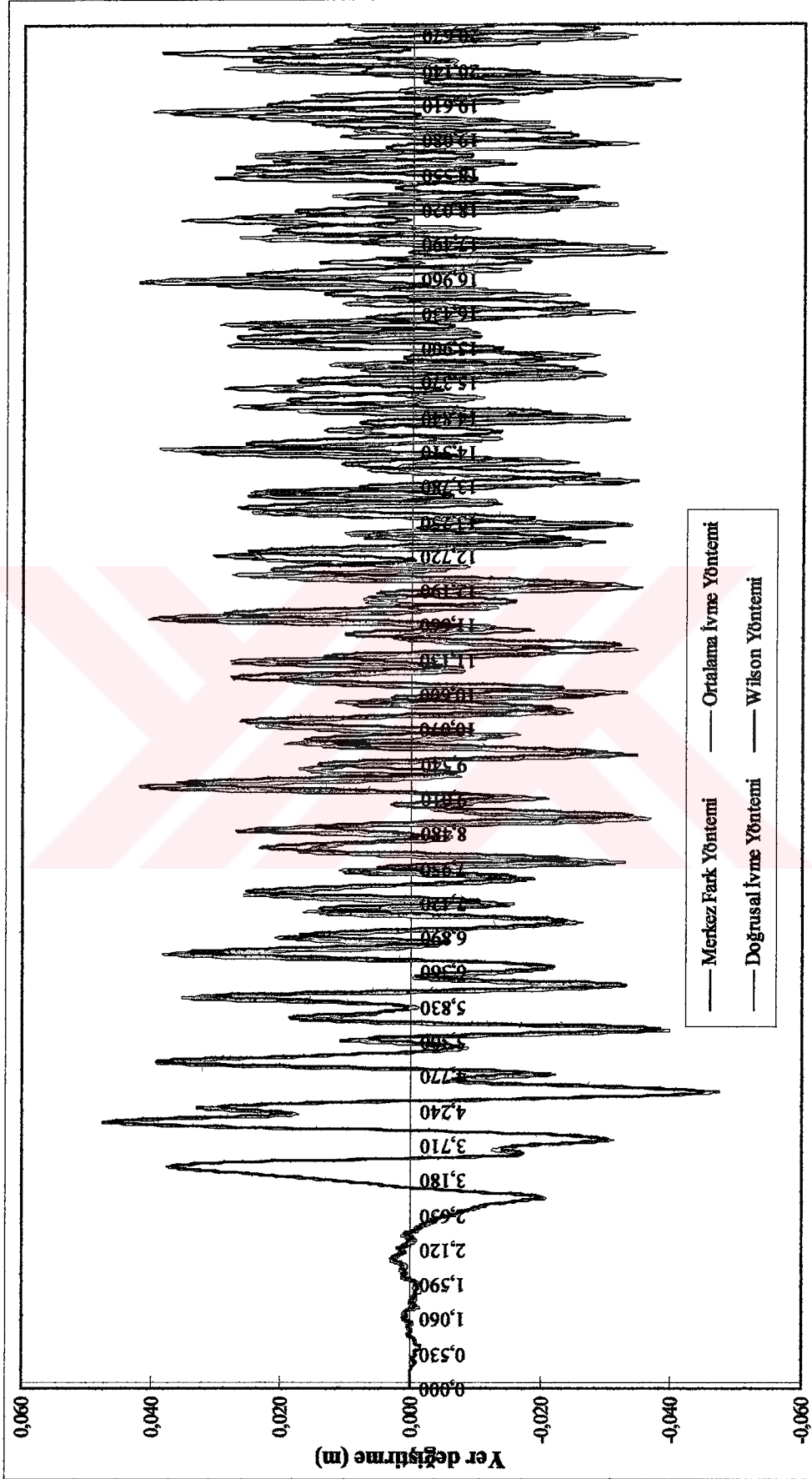
Şekil F.3 Erzincan Deprenim(NS) 3. kat karşılaştırması



Şekil F.4 Erzincan Depremi(NS) 4. kat karşılaştırması

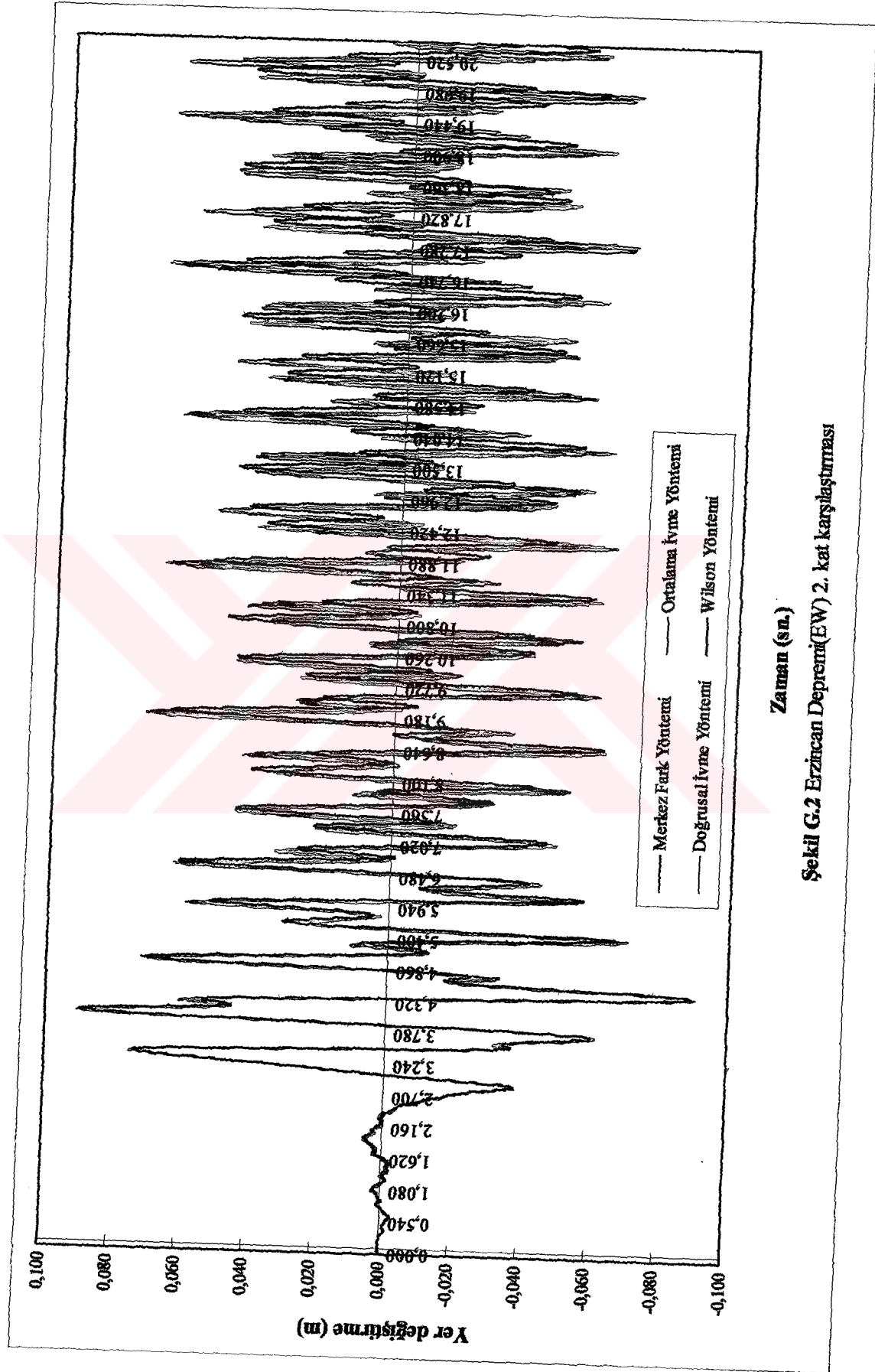


Şekil F.5 Erzincan Depremi(NS) 5. kat karşılaştırması

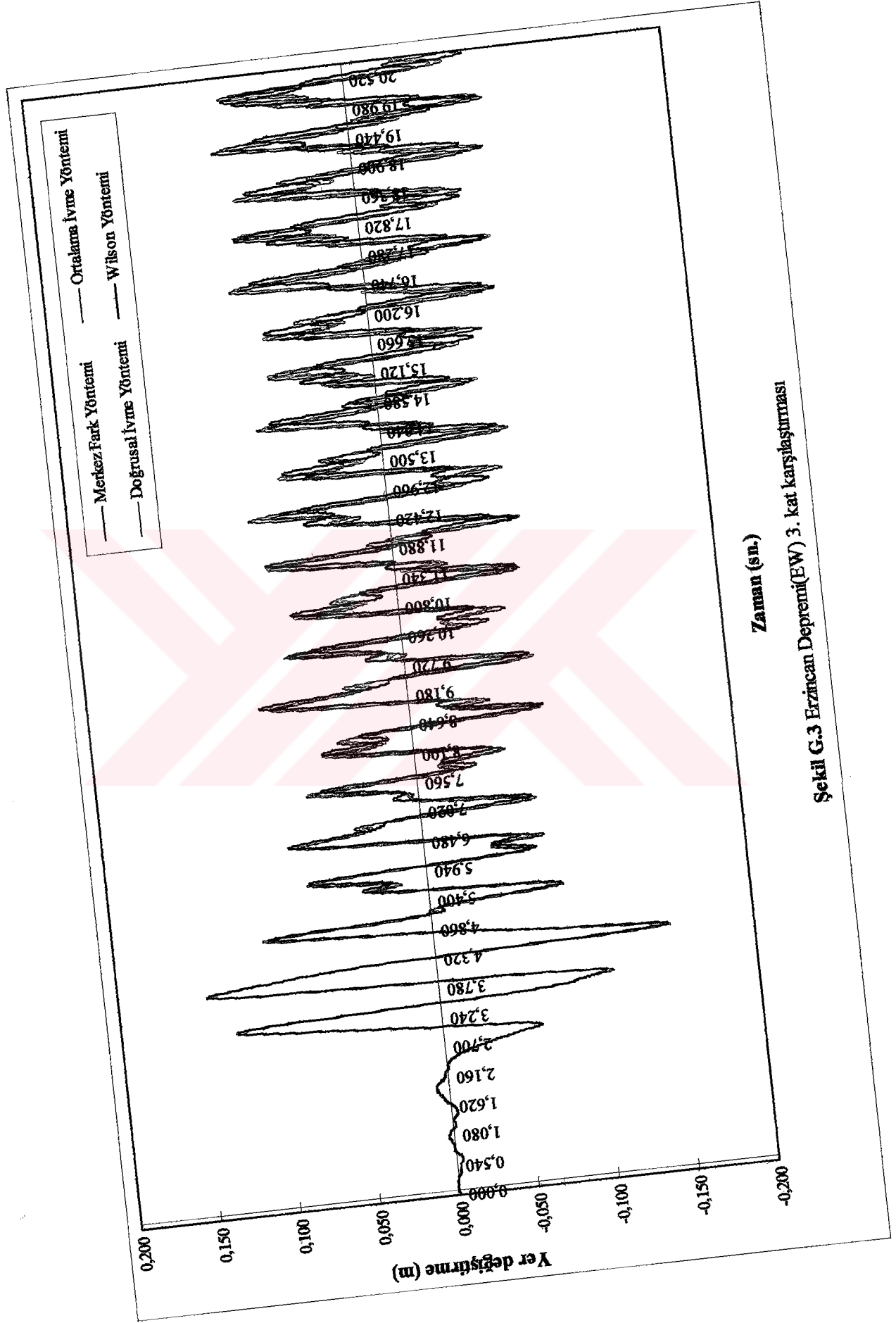


Zaman (sn.)

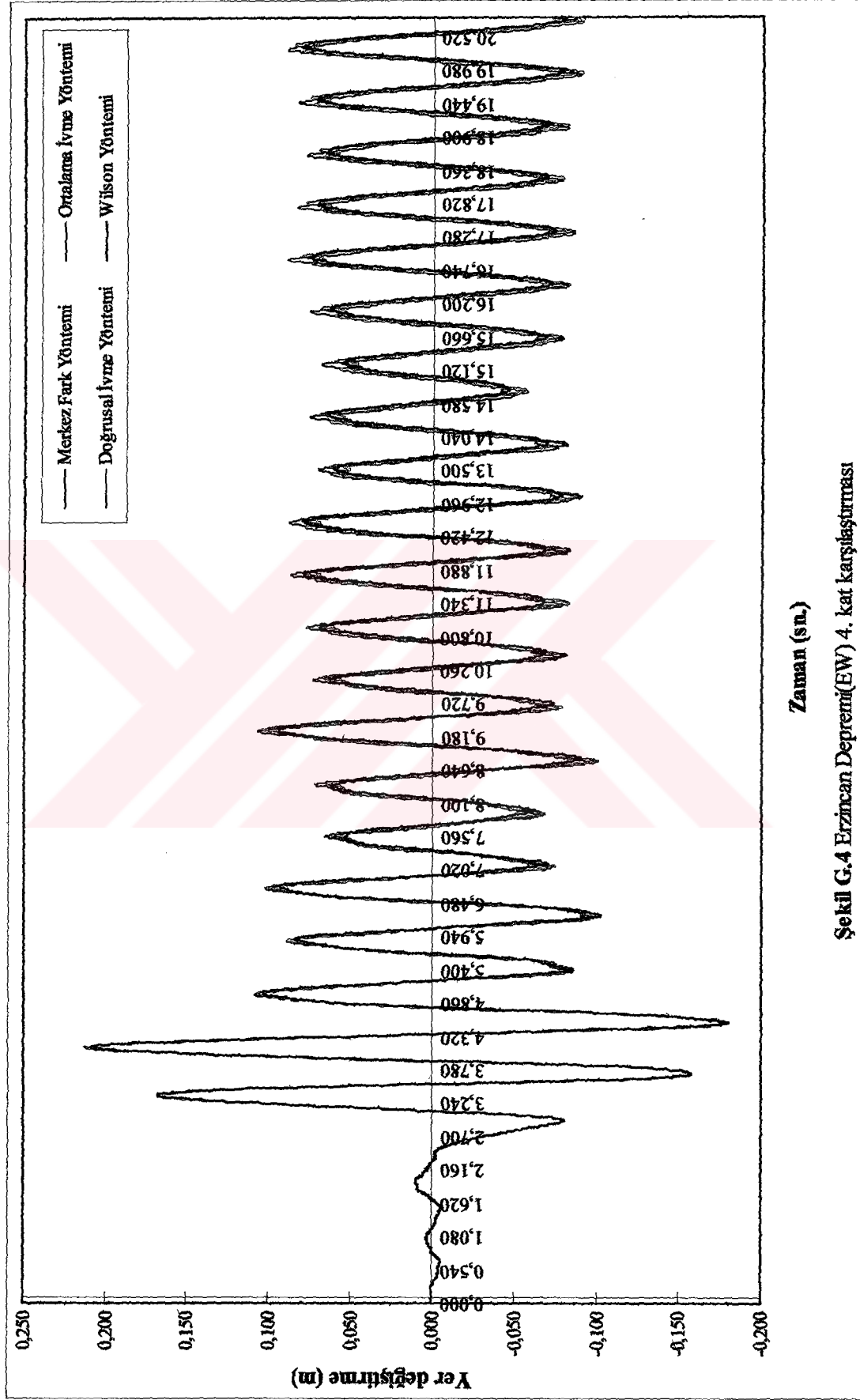
Şekil G.1 Erzincan Depremi(EW) 1. kat karşılaştırması



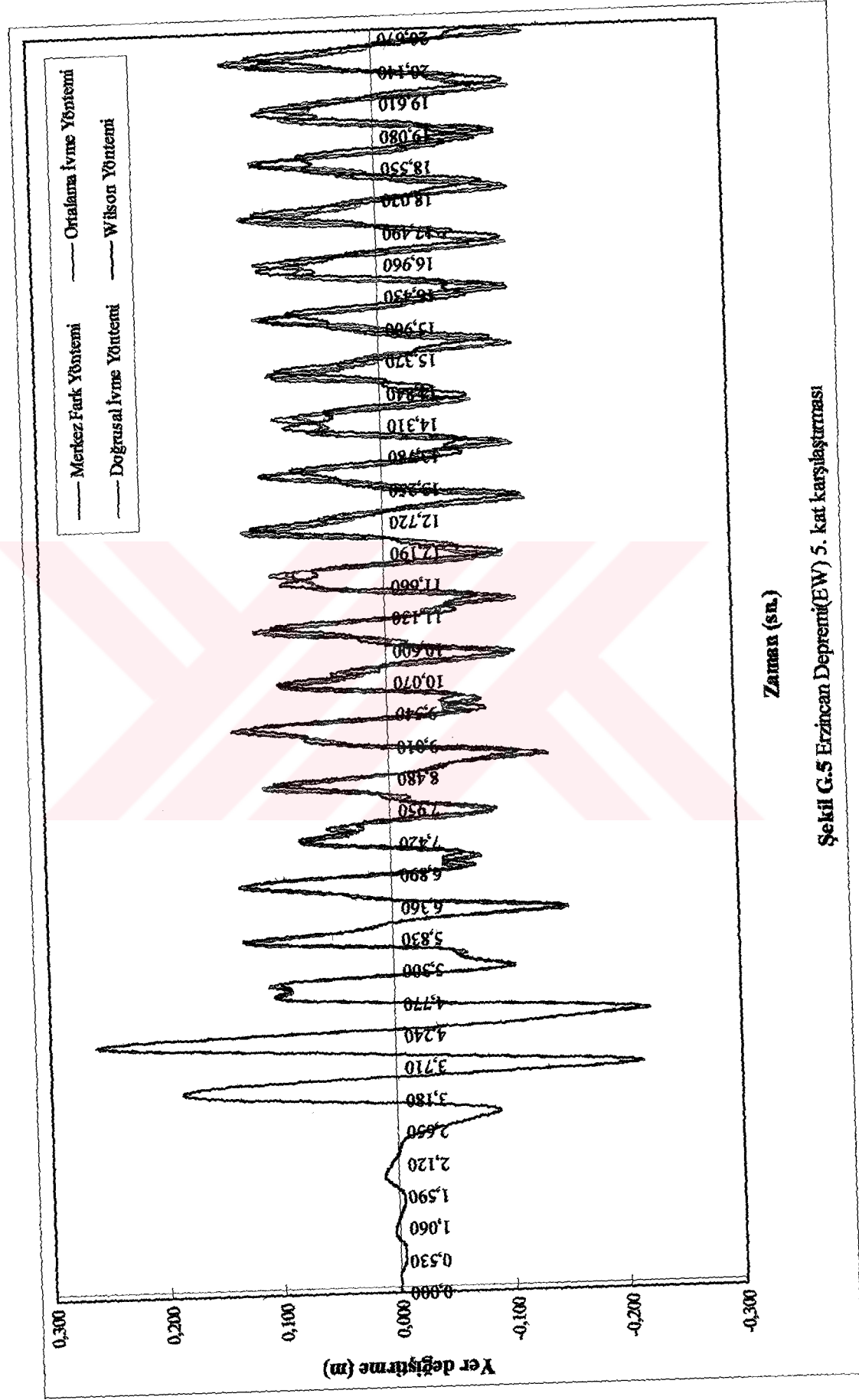
Zaman (sn.)
Şekil G.2 Erzincan Depremi(EW) 2. kat karşılaştırması



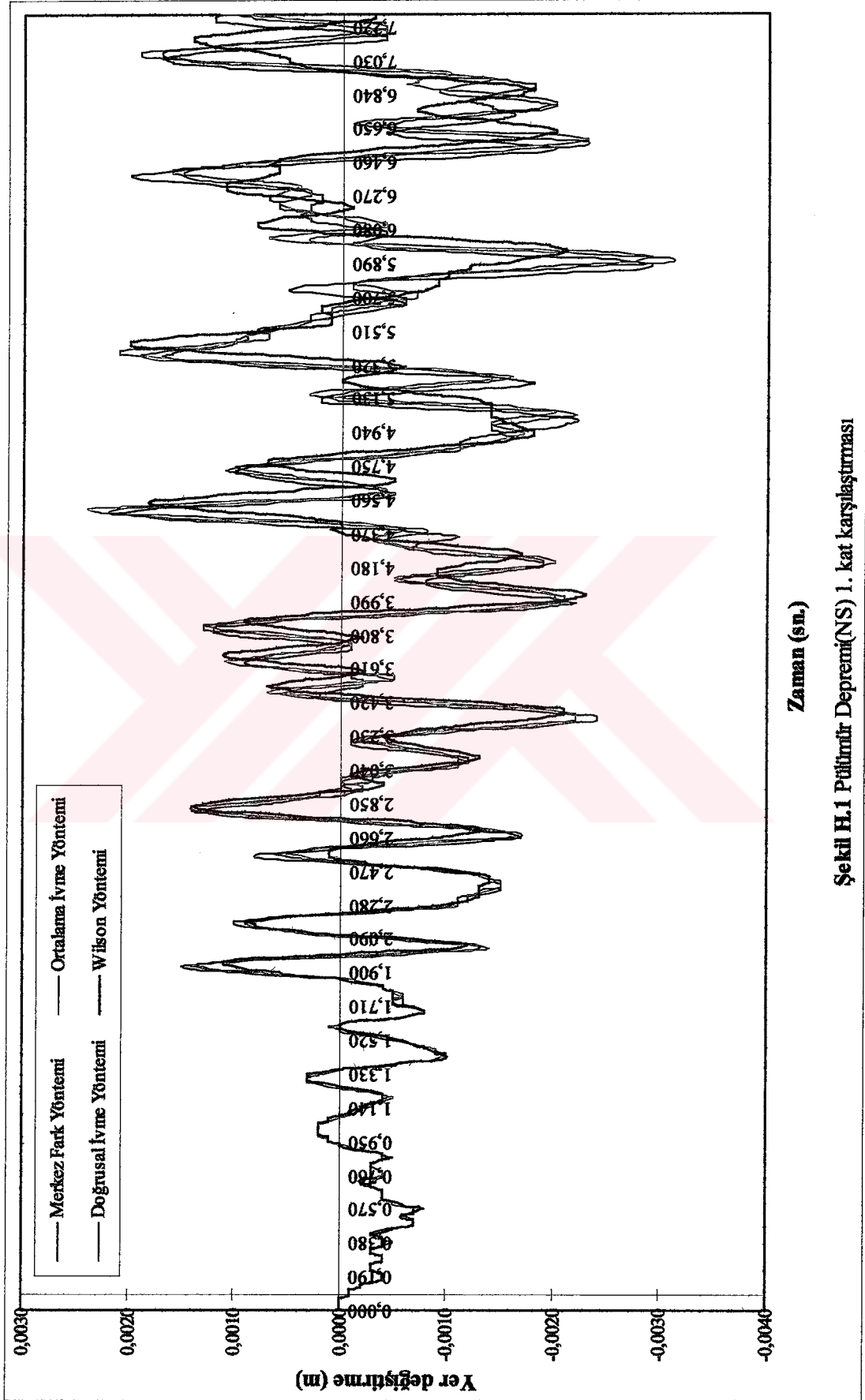
Şekil G.3 Erzincan Depremi(EW) 3. kat karşılaştırması



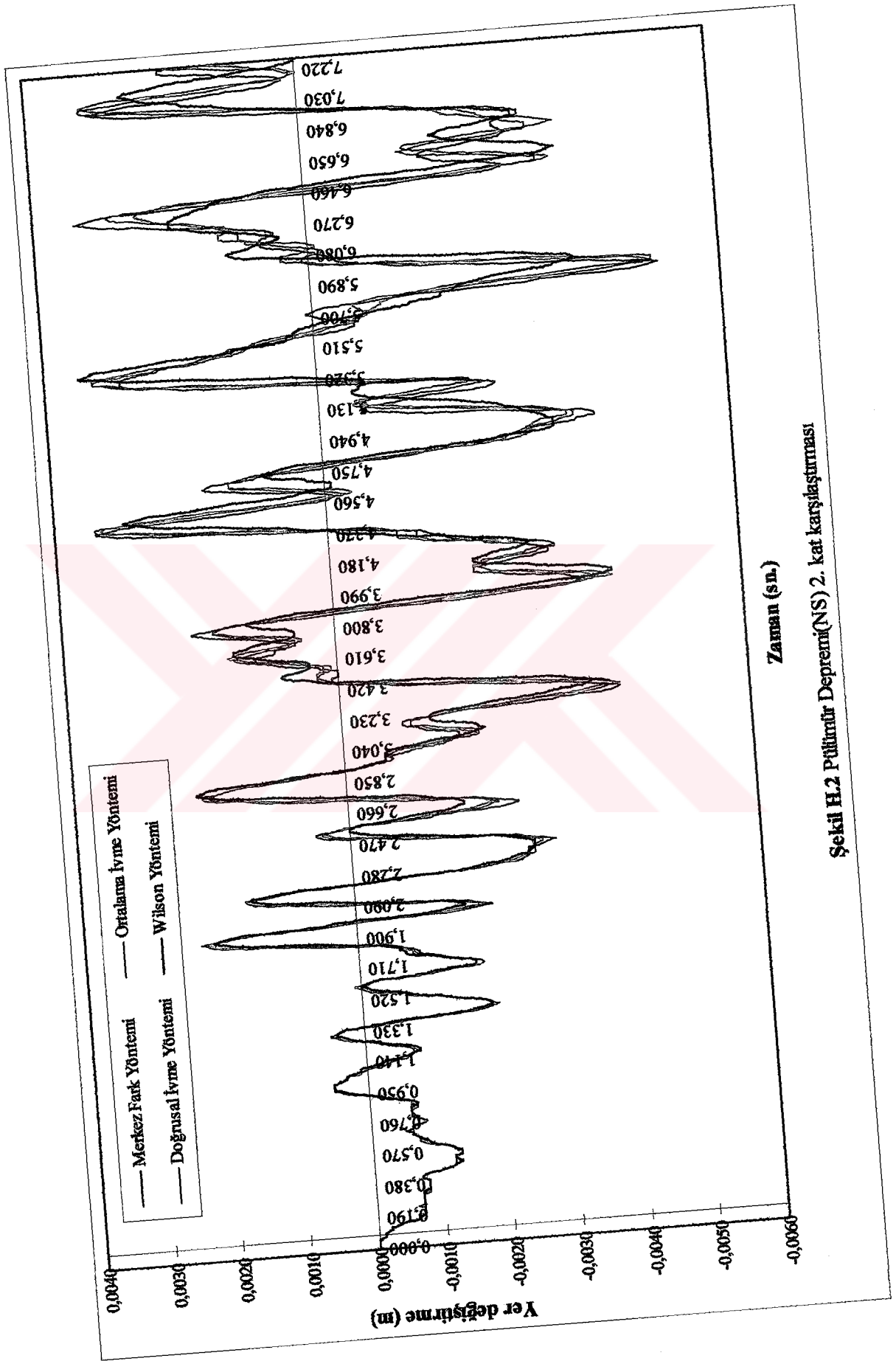
Şekil G.4 Erzincan Depremi(EW) 4. kat karşılaştırması



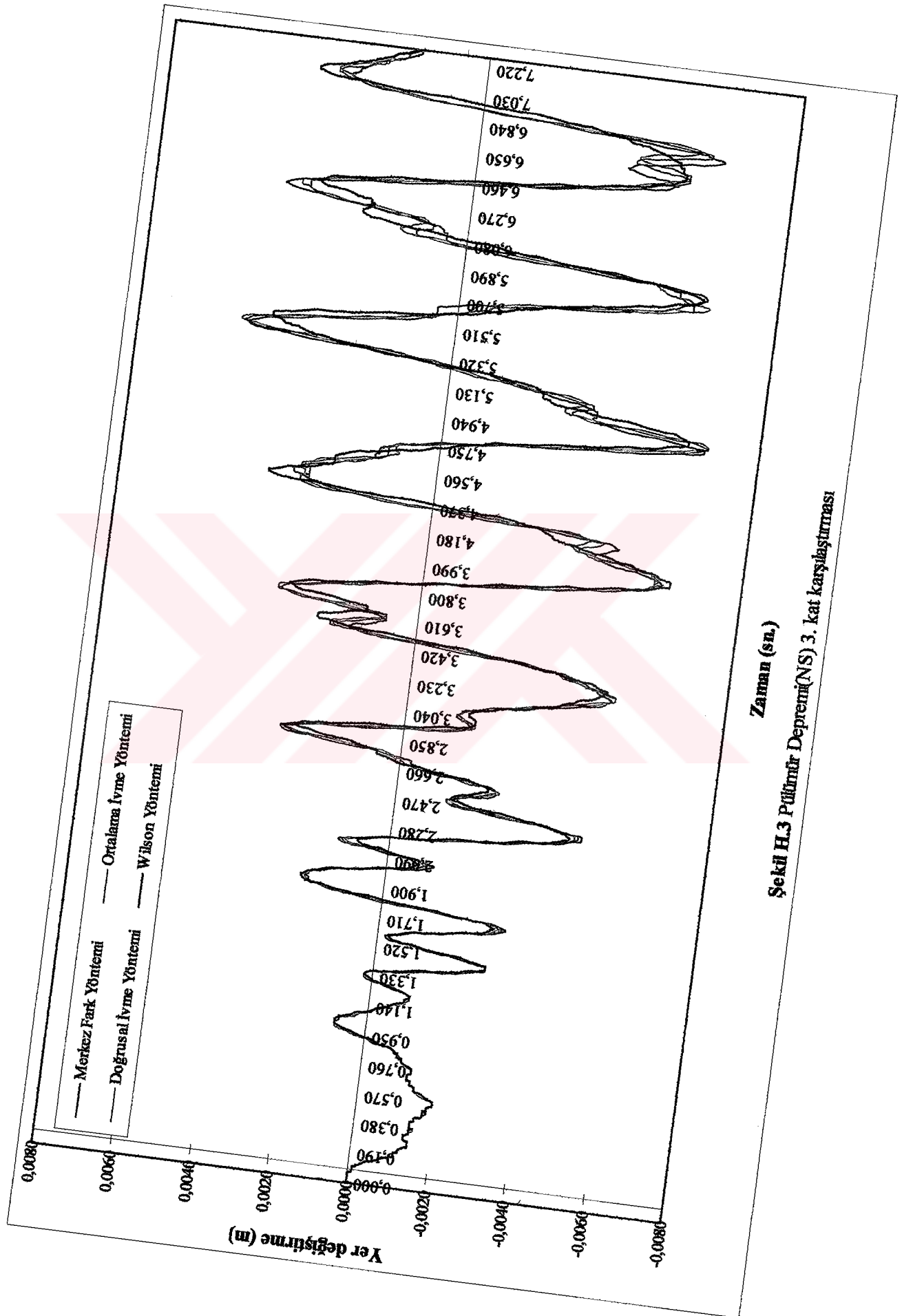
Şekil G.5 Erzincan Depremi(EW) 5. kat karşılaştırması



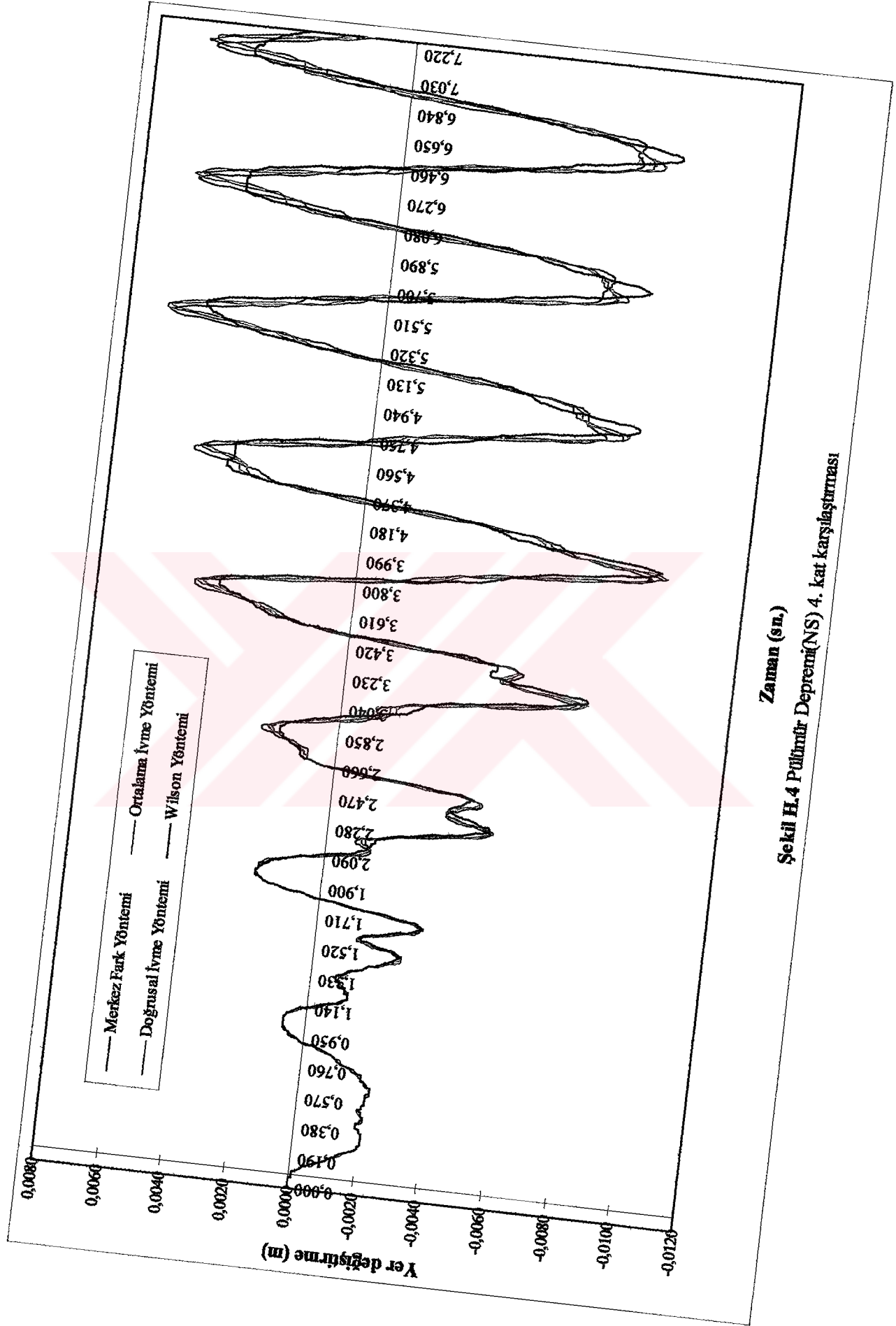
Şekil H.1.1 Püritimr Depremi(NS) 1. kat karşılaştırması



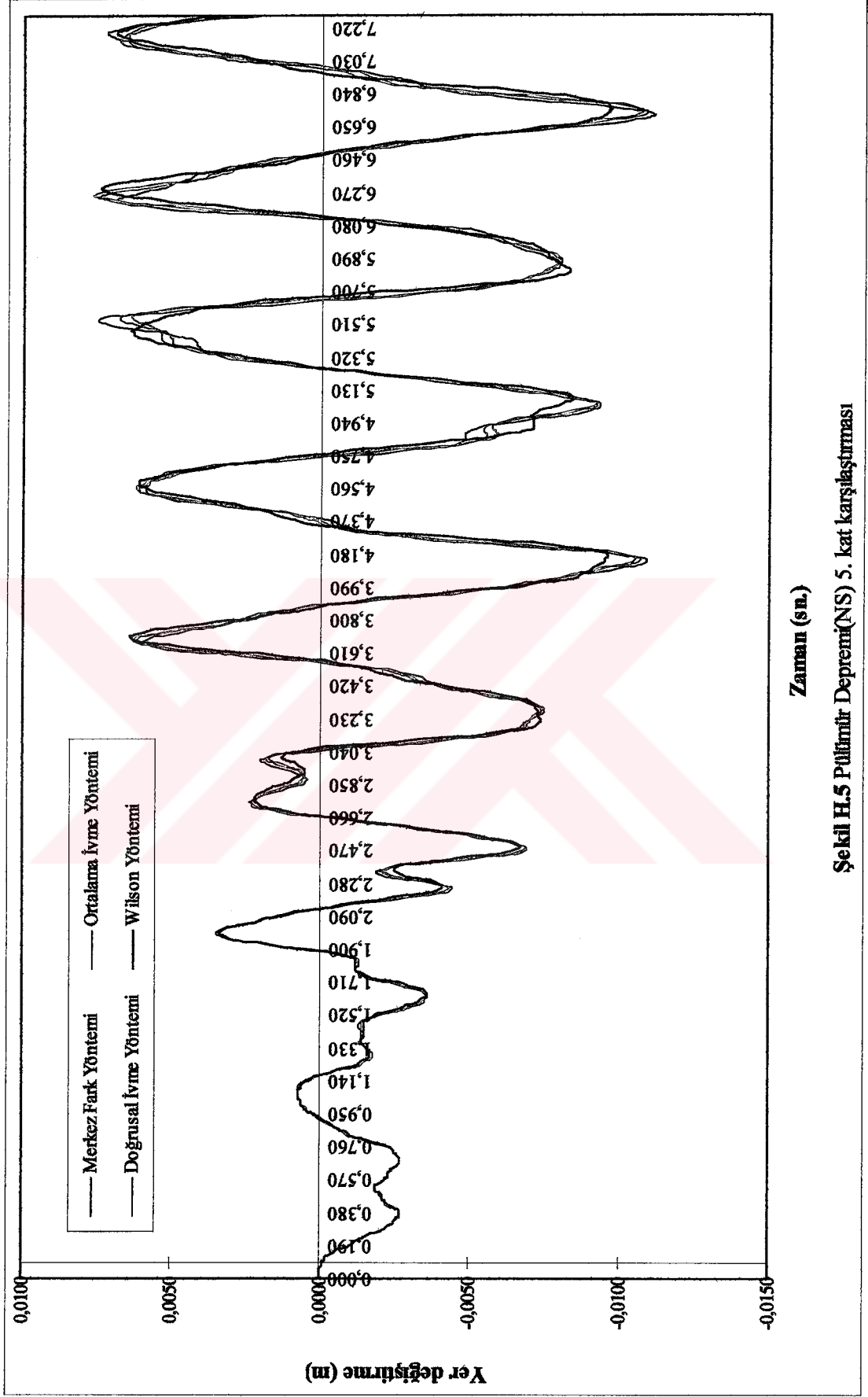
Şekil H.2 Püfütür Depremi(NS) 2. kat karşılaştırması



Şekil H.3 Püfünür Depremi(NS) 3. kat karşılaştırması



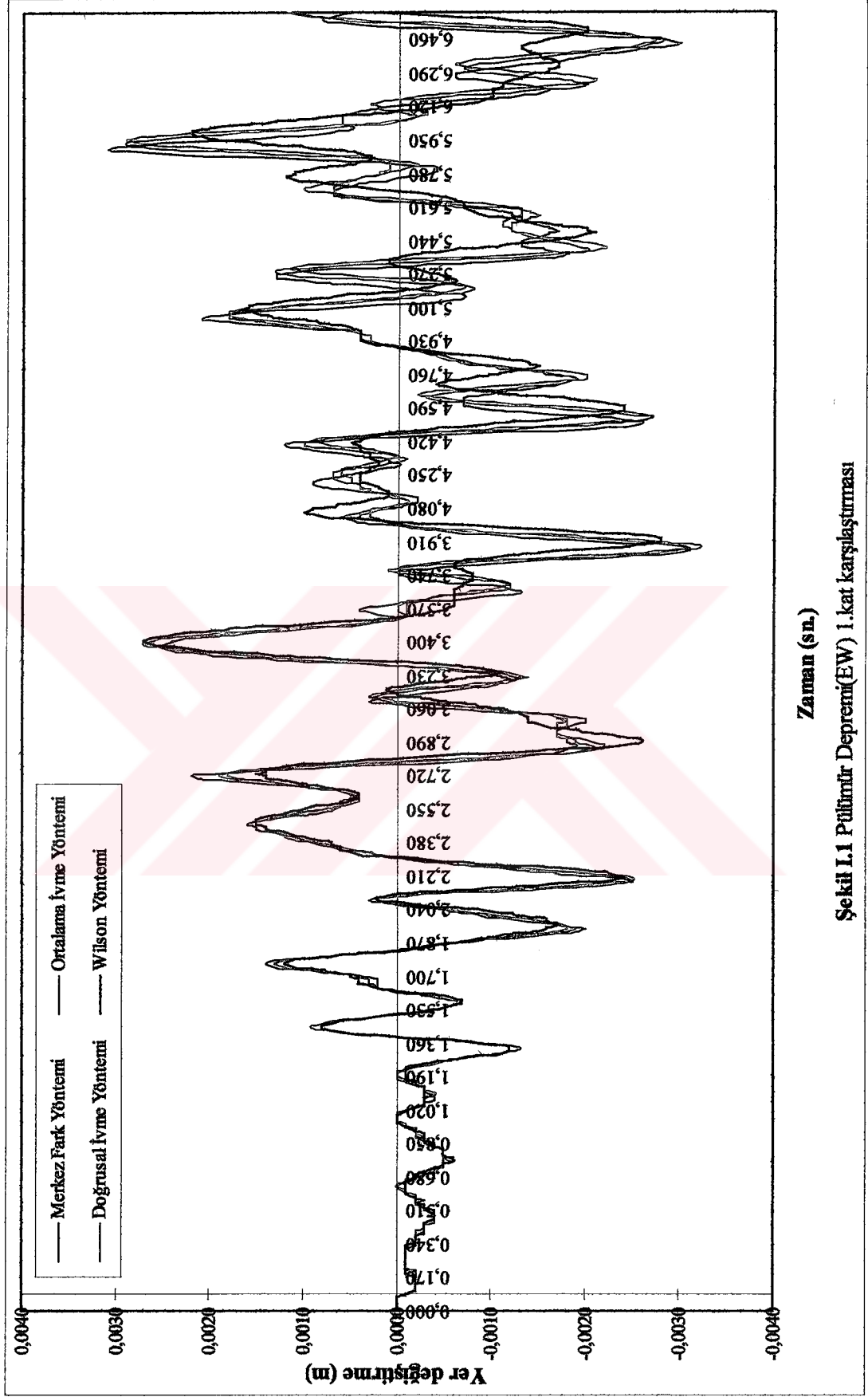
Zaman (sn.)
Şekil H.4 Pülbür Depremi(NS) 4. kat karşılaştırması



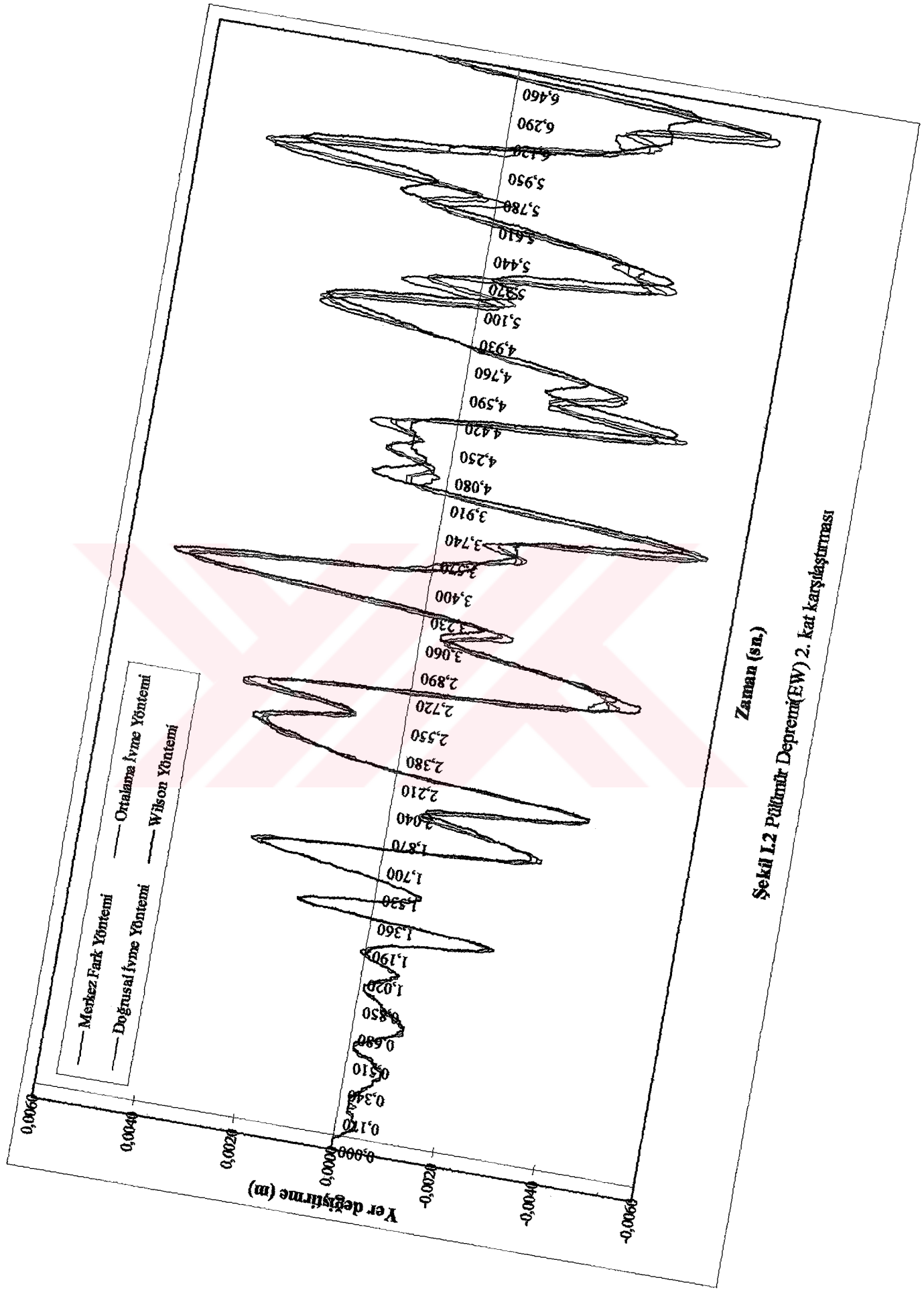
Şekil H.5 Pülitmir Depremi(NS) 5. kat karşılaştırması

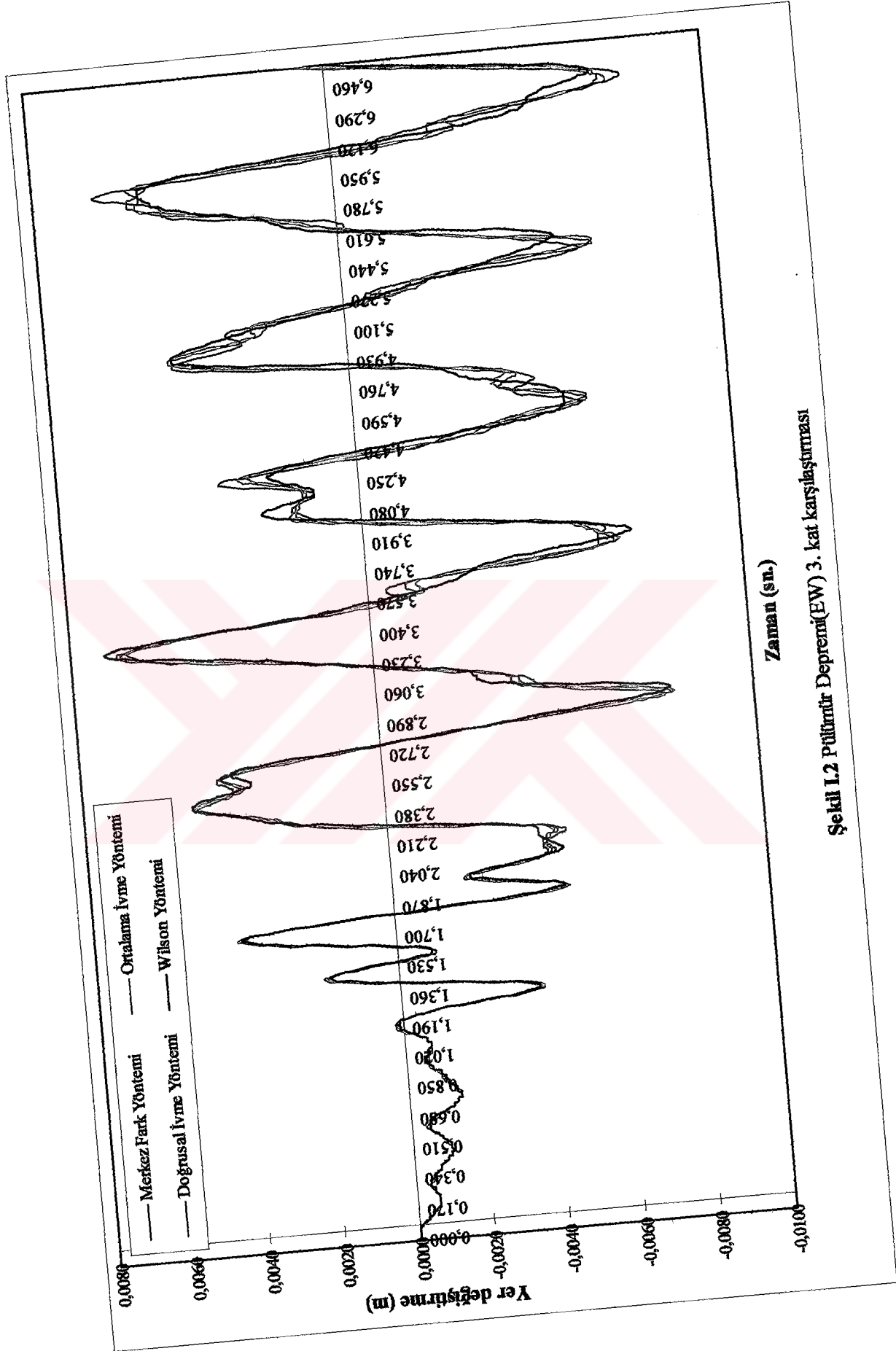
Zaman (sn.)

Yer deyişirme (m)

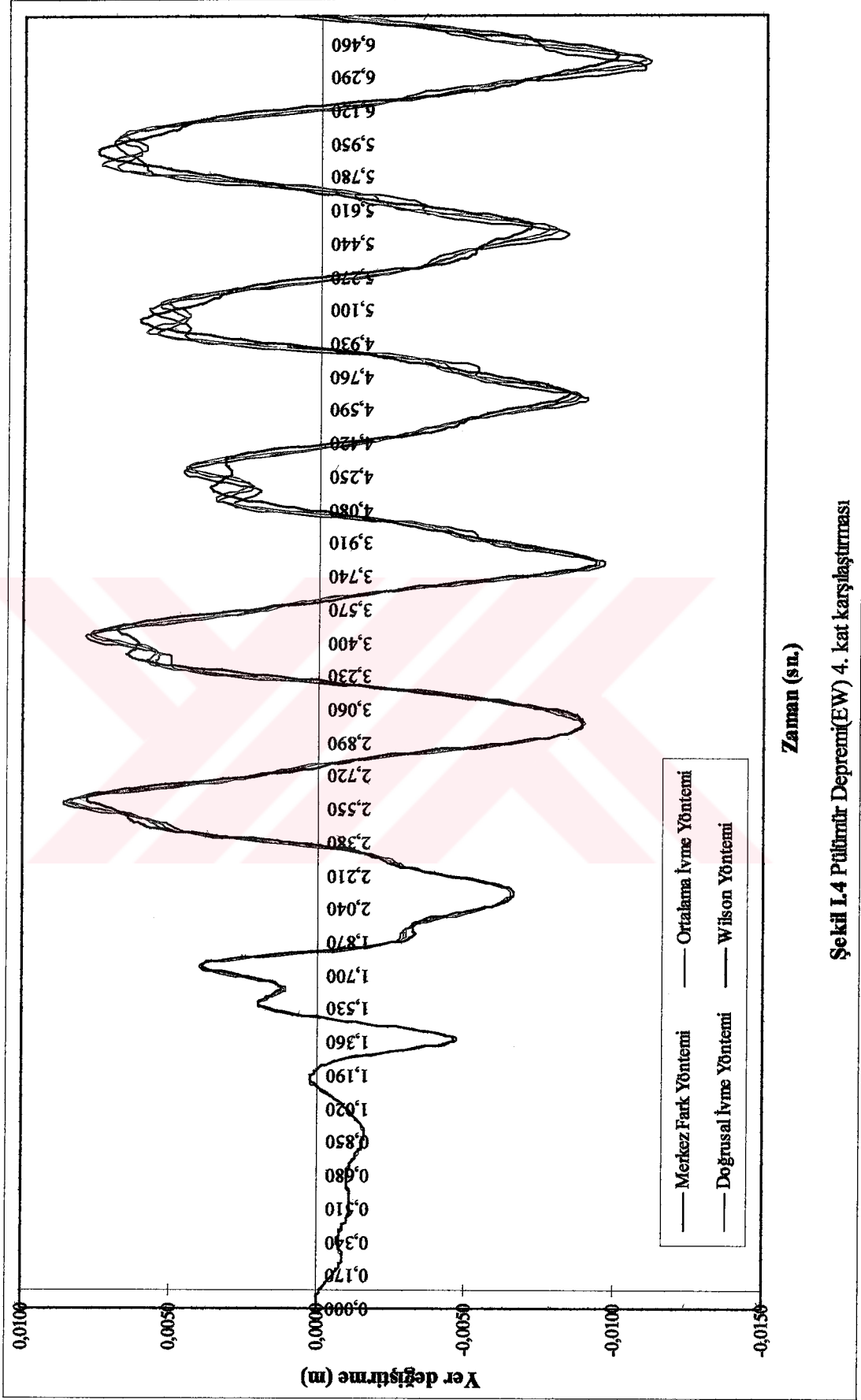


Şekil L.1 Prilimtır Depremi(EW) 1.kat karşılaştırması

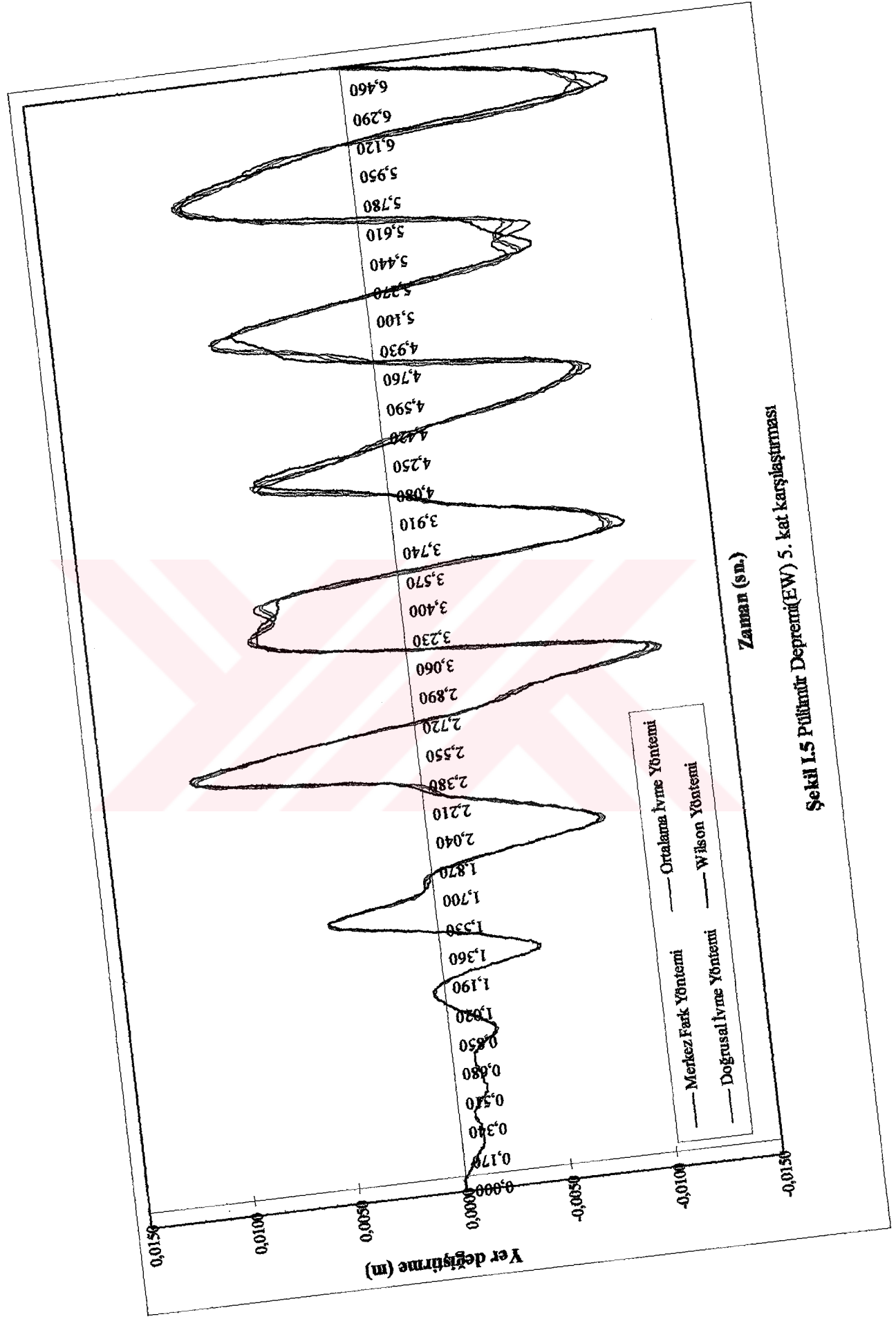




Şekil 1.2 Püfümür Depremi(EW) 3. kat karşılaştırması



Şekil L.4 Pütümlür Depremi(EW) 4. kat karşılaştırması



Zaman (sn.)

Şekil 1.5 Püfütür Depremi(EW) 5. kat karşılaştırması

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Özgür YAYLI, 1977 yılında Uşak'ta doğdu. İlköğrenimini Ankara Bahçelievler Ulubatlı Hasan İlkokulunda, ortaokulu ve liseyi Ankara Yıldırım Bayezit Anadolu Lisesinde tamamladı. 2000 yılında Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden birincilikle mezun oldu. 2000-2002 yılları arasında Marmara Depremi Acil Yeniden Yapılandırma Projesi(MEER) Adapazarı kalıcı konutlarında çalıştı. 2002 yılından bu yana Karabük Köyhizmetleri İl Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır.