

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU ÇERÇEVE SİSTEMLERİN STATİK VE
DİNAMİK ANALİZİ İÇİN BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ALTAY

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ DEPREM MÜHENDİSLİĞİ VE AFET
YÖNETİMİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ BOYUTLU ÇERÇEVE SİSTEMLERİN STATİK VE
DİNAMİK ANALİZİ İÇİN BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur ALTAY
(802161217)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ercan YÜKSEL

HAZİRAN 2019

İTÜ, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü'nün 802161217 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Onur ALTAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÜÇ BOYUTLU ÇERÇEVE SİSTEMLERİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ İÇİN BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ercan YÜKSEL**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Konuralp GİRGIN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan ÖZKAYNAK

Beykent Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **21 Aralık 2009**





Bana her zaman destek olan aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince desteğini ve özverisini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli tez danışmanım Prof. Dr. Ercan YÜKSEL başta olmak üzere bugünlere gelmemde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür eder, en içten saygılarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmalarım süresince beni her zaman destekleyen Gözde ÖGEL, Hüseyin Taylan ALBAYRAK, Yusuf Reşat GÜNER, Işık ATMACA ve Ekin ATMACA ile programlama konusunda bana her zaman yol gösteren Anıl KAYAN ve Serhan AKSOY'a ayrıca tezimin kontrolü sırasında yoğun temposuna rağmen bana yardımcı olan Oğuzhan ÇETİNDEMİR ve Serdar OKUYUCU başta olmak üzere tüm dostlarıma ve eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan aileme çok teşekkür ederim.

Haziran 2019

Onur ALTAY
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Tezin Kapsamı	1
1.3 Çalışmada İzlenen Yöntemler	2
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Giriş	5
2.2 Statik Hesap.....	5
2.2.1 Genel kabuller.....	5
2.2.2 Eleman rijitlik matrisi.....	6
2.2.3 Eleman dönüşüm matrisi	12
2.2.4 Eleman sistem rijitlik matrisi.....	15
2.2.5 Sistem rijitlik matrisi	16
2.2.6 Kütle matrisi	16
2.2.7 DSDC yazılımının akış şeması.....	16
2.2.8 Statik hesap akış diyagramı	17
2.3 Dinamik Hesaplar	19
2.3.1 Serbest titreşim analizi	19
2.3.2 Mod süperpozisyonu yöntemi ile zaman tanım alanında analiz.....	21
2.3.2.1 Modal koordinatlara geçiş	21
2.3.2.2 Genelleştirilmiş kütle, rijitlik ve sönüm matrisi	21
2.3.3 Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı.....	24
2.3.4 Doğrudan integrasyon yöntemi ile zaman tanım alanında analiz.....	26
2.3.5 Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı.....	28
2.3.6 Zaman tanım alanında mod toplama yöntemi	29
2.3.7 Mod toplama yöntemi akış diyagramı.....	31
2.4 Python Programlama Dili ve Kullanılan Kütüphaneler.....	34
3. YAZILIMIN SONUÇLARININ DOĞRULANMASI	35
3.1 Statik Hesap Kontrolleri	35
3.1.1 İki boyutlu basit çerçevede statik yükleme.....	35

3.1.2 Üç boyutlu basit çerçevede statik yükleme	36
3.2 Dinamik Hesap Kontrolleri	37
3.2.1 Titreşim frekansları ve modal kütle katılımlarının kontrolü.....	37
3.2.2 Zaman tanım alanında analiz yöntemlerinin kontrolü.....	38
3.2.2.1 Doğrudan integrasyon yönteminin kontrolü	39
3.2.2.2 Mod süperpozisyonu yönteminin kontrolü	41
3.2.2.3 Mod toplama yönteminin kontrolü	44
4. DİNAMİK HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	49
4.1 Modeller	49
4.1.1 Malzeme özellikleri ve kesitler.....	50
4.1.2 Kat yükseklikleri ve kat yayılı yükleri	51
4.2 Analizler	54
4.2.1 Statik analiz	54
4.2.1.1 2A yapısı.....	54
4.2.1.2 2B yapısı	56
4.2.2 Serbest titreşim analizi	58
4.2.2.1 2A yapısı.....	59
4.2.2.2 2B yapısı	60
4.2.3 Zaman tanım alanında analizler.....	61
4.2.3.1 2A yapısı.....	61
4.2.3.2 2B yapısı	64
4.2.3.3 Eleman iç kuvvetleri	66
4.3 Sonuçlar ve Öneriler.....	67
4.3.1 Sonuçlar.....	67
4.3.2 Öneriler.....	68
4.3.2.1 Veri girişi	68
4.3.2.2 - Analiz süreleri	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER	73
EK A: Deprem Kayıtları.....	75
EK B: Zaman Tanım Alanında Yerdeğiştirmeler ve Dönmeler.....	83
EK C: Zaman Tanım Alanında İçsel Kuvvetleri.....	181
ÖZGEÇMİŞ	215

KISALTMALAR

DI	: Zaman Tanım Alanında Doğrudan İntegrasyon Yöntemi
DS	: Düğüm Noktası Sayısı
MT	: Zaman Tanım Alanında Mod Toplama Yöntemi
MS	: Zaman Tanım Alanında Mod Süperpozisyonu Yöntemi
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği





SEMBOLLER

A	: Çubuk Elemanın En Kesit Alanı
C	: Sönüm Matrisi
$\dot{d}_n^{(X,Y)}(t)$: (X)ve (Y) depremi etkisi altında n'inci titreşim moduna ait modal ivme
$\dot{d}_n^{(X,Y)}(t)$: (X)ve (Y) depremi etkisi altında n'inci titreşim moduna ait modal hız
$d_n^{(X,Y)}(t)$: (X)ve (Y) depremi etkisi altında n'inci titreşim moduna ait modal yerdeğiştirme
E	: Elastisite Modülü
G	: Kayma Modülü
g	: Yerçekimi İvmesi
I_y	: Lokal y Eksenine Göre Eğilme Atalet Momenti
I_z	: Lokal z Eksenine Göre Eğilme Atalet Momenti
J	: Lokal x Eksenine Göre Burulma Atalet Momenti
k	: Çubuk Eksen Takımındaki Çubuk Rijitlik Matrisi
K	: Sistem Eksen Takımındaki Çubuk Rijitlik Matrisi
L	: Çubuk Elemanın Uzunluğu
M	: Kütle Matrisi
R_ix	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global X Etrafında Dönme Miktarı
R_iy	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global Y Etrafında Dönme Miktarı
R_iz	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global Z Etrafında Dönme Miktarı
$\bar{r}_n^{(X)}$: Birim modal davranış büyüklüğü
$r_n^{(X,Y)}$: Modal davranış büyüklüğü
S	: Sistem Rijitlik Matrisi
T	: Dönüşüm Matrisi
T_i	: i Numaralı Mod Periyodu
U_ix	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global X Yerdeğiştirmesi
U_iy	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global Y Yerdeğiştirmesi
U_iz	: i Numaralı Düğüm Noktasının Global Z Yerdeğiştirmesi
u₁, ..., u₁₂	: Çubuk Eksen Takımına Göre Uç Yerdeğiştirmeleri ve Dönmeleri
v₁, ..., v₁₂	: Sistem Eksen Takımına Göre Uç Yerdeğiştirmeleri ve Dönmeleri
x, y, z	: Çubuk Eksen Takımı
X, Y, Z	: Sistem Eksen Takımı
$\alpha_{nR}^{(X,Y)}(t)$: Azaltılmış modal sözde ivme
Γ	: Modal Katkı Çarpanı
$\Gamma_n^{(X)}$: (X) doğrultusu için, n'inci titreşim moduna ait modal katkı çarpanı
$\Gamma_n^{(Y)}$: (Y) doğrultusu için, n'inci titreşim moduna ait modal katkı çarpanı
ξ_i	: i Numaralı Mod Kritik Sönüm Oranı
φ_i	: i Numaralı Mod Vektörü
ω_i	: i Numaralı Mod Açısal Hızı



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: 1A modelinin sonuçları.	36
Çizelge 3.2: 1B modelinin sonuçları.	37
Çizelge 3.3: 1B modelinin titreşim frekansları.....	38
Çizelge 3.4: 1B modelinin kümülatif modal kütle katılımları.....	38
Çizelge 4.1: Kiriş kesit özellikleri.	51
Çizelge 4.2: Kolon kesit özellikleri.	51
Çizelge 4.3: Kat yükseklikleri ve kat yayılı yükleri.	51
Çizelge 4.4: 2A modelinin X doğrultusu statik yükleme sonuçları.....	55
Çizelge 4.5: 2A modelinin Y doğrultusu statik yükleme sonuçları.....	56
Çizelge 4.6: 2B modelinin X doğrultusu statik yükleme sonuçları.....	57
Çizelge 4.7: 2B modelinin Y doğrultusu statik yükleme sonuçları.....	58
Çizelge 4.8: 2A modelinin mod periyotları.	59
Çizelge 4.9: 2A modeli doğrusal modal kütle katılımları.	60
Çizelge 4.10: 2B modelinin mod periyotları.	61
Çizelge 4.11: 2B modeli doğrusal modal kütle katılımları.....	62



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Örnek yapı sistemi.	2
Şekil 2.1 : Analiz eleman ve sistem eksen takımları [6].	5
Şekil 2.2 : Eleman uç serbestlik numaraları [6].	6
Şekil 2.3 : u_1 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	6
Şekil 2.4 : u_2 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	7
Şekil 2.5 : u_3 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	7
Şekil 2.6 : u_4 Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	7
Şekil 2.7 : u_5 Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	8
Şekil 2.8 : u_6 Birim dönmesinden dolayı oluşan mesnet tepkileri [6].	8
Şekil 2.9 : u_7 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	8
Şekil 2.10 : u_8 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	9
Şekil 2.11 : u_9 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	9
Şekil 2.12 : u_{10} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	9
Şekil 2.13 : u_{11} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	10
Şekil 2.14 : u_{12} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].	10
Şekil 2.15 : Eleman rijitlik matrisi [6].	11
Şekil 2.16 : Eleman uç yerdeğiştirmeleri [6].	12
Şekil 2.17 : Eleman x eksenini ile sistem eksenleri arasındaki açılar [6].	13
Şekil 2.18 : Eleman y eksenini ile sistem eksenleri arasındaki açılar [6].	13
Şekil 2.19 : Eleman z eksenini ile sistem eksenleri arasındaki açılar [6].	14
Şekil 2.20 : DSDC yazılımı akış şeması.	17
Şekil 2.21 : Statik hesap akış diyagramı.	18
Şekil 2.22 : Statik hesap akış diyagramı (devam).	19
Şekil 2.23 : Sabit ortalama ivme (solda) ve doğrusal ivme (sağda) [8].	23
Şekil 2.24 : Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı.	25
Şekil 2.25 : Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı (devam).	26
Şekil 2.26 : Rayleigh sönüm modeli [9].	27
Şekil 2.27 : Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı.	28
Şekil 2.28 : Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı (devam).	29
Şekil 2.29 : Mod toplama yöntemi akış diyagramı.	32
Şekil 2.30 : Mod toplama yöntemi akış diyagramı (devam).	33
Şekil 3.1 : 2 Boyutlu Basit Çerçeve - 1A.	36
Şekil 3.2 : 3 Boyutlu basit çerçeve - 1B.	37
Şekil 3.3 : X ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.	39
Şekil 3.4 : Y ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.	39
Şekil 3.5 : Z ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.	40
Şekil 3.6 : X eksenini etrafında dönmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.	40

Şekil 3.7	: Y ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.....	41
Şekil 3.8	: Z ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.	41
Şekil 3.9	: X ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.	42
Şekil 3.10	: Y ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.	42
Şekil 3.11	: Z ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.....	43
Şekil 3.12	: X ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.	43
Şekil 3.13	: Y ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.	44
Şekil 3.14	: Z ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.....	44
Şekil 3.15	: X ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.....	45
Şekil 3.16	: Y ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.....	45
Şekil 3.17	: Z ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.	46
Şekil 3.18	: X ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.	46
Şekil 3.19	: Y ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.	47
Şekil 3.20	: Z ekseninde yerdeğiştirmeler - mod toplama yöntemi.....	47
Şekil 4.1	: 2A modeli kolon ve kule yerleşim planı.....	49
Şekil 4.2	: 2B modeli kolon ve kule yerleşim planı.....	50
Şekil 4.3	: Tipik kesit.	50
Şekil 4.4	: 2A yapısının üç boyutlu modeli.....	52
Şekil 4.5	: 2B yapısının üç boyutlu modeli.....	53
Şekil 4.6	: 2A yapısı X doğrultusu statik yüklemesi.....	55
Şekil 4.7	: 2A yapısı Y doğrultusu statik yüklemesi.....	56
Şekil 4.8	: 2B yapısı X doğrultusu statik yüklemesi.....	57
Şekil 4.9	: 2B yapısı Y doğrultusu statik yüklemesi.....	58
Şekil 4.10	: 2A yapısının zaman tanım alanında analiz sonuçları.	63
Şekil 4.11	: 2A yapısının zaman tanım alanında analiz sonuçları.	65
Şekil 4.12	: 2B modeli Z=18.3 kesiti.	66
Şekil A.1	: Kocaeli depremi doğu-batı yönü ivme kaydı.....	76
Şekil A.2	: Kocaeli depremi kuzey-güney yönü ivme kaydı.	77
Şekil A.3	: Kocaeli depremi düşey ivme kaydı.....	78
Şekil A.4	: Kobe depremi doğu-batı yönü ivme kaydı.	79
Şekil A.5	: Kobe depremi kuzey-güney yönü ivme kaydı.	80
Şekil A.6	: Kocaeli depremi düşey ivme kaydı.....	81
Şekil B.1	: 2A modeli Kocaeli depremi DI X yerdeğiştirmesi.	84
Şekil B.2	: 2A modeli Kocaeli depremi DI Y yerdeğiştirmesi.	85
Şekil B.3	: 2A modeli Kocaeli depremi DI Z yerdeğiştirmesi.	86
Şekil B.4	: 2A modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.	87
Şekil B.5	: 2A modeli Kocaeli depremi DI RY dönmesi.....	88
Şekil B.6	: 2A modeli Kocaeli depremi DI RZ dönmesi.....	89
Şekil B.7	: 2A modeli Kobe depremi DI X yerdeğiştirmesi.....	90
Şekil B.8	: 2A modeli Kobe depremi DI Y yerdeğiştirmesi.....	91
Şekil B.9	: 2A modeli Kobe depremi DI Z yerdeğiştirmesi.	92
Şekil B.10	: 2A modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.	93
Şekil B.11	: 2A modeli Kobe depremi DI RY dönmesi.	94
Şekil B.12	: 2A modeli Kobe depremi D RZ dönmesi.	95
Şekil B.13	: 2A modeli Kocaeli depremi MS X yerdeğiştirmesi.	96

Şekil B.14	: 2A modeli Kocaeli depremi MS Y yerdeğiştirmesi.	97
Şekil B.15	: 2A modeli Kocaeli depremi MS Z yerdeğiştirmesi.	98
Şekil B.16	: 2A modeli Kocaeli depremi MS RX dönmesi.	99
Şekil B.17	: 2A modeli Kocaeli depremi MS RY dönmesi.	100
Şekil B.18	: 2A modeli Kocaeli depremi MS RZ dönmesi.	101
Şekil B.19	: 2A modeli Kobe depremi MS X yerdeğiştirmesi.	102
Şekil B.20	: 2A modeli Kobe depremi MS Y yerdeğiştirmesi.	103
Şekil B.21	: 2A modeli Kobe depremi MS Z yerdeğiştirmesi.	104
Şekil B.22	: 2A modeli Kobe depremi MS RX dönmesi.	105
Şekil B.23	: 2A modeli Kobe depremi MS RY dönmesi.	106
Şekil B.24	: 2A modeli Kobe depremi MS RZ dönmesi.	107
Şekil B.25	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.	108
Şekil B.26	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.	109
Şekil B.27	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.	110
Şekil B.28	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.	111
Şekil B.29	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RY dönmesi.	112
Şekil B.30	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RZ dönmesi.	113
Şekil B.31	: 2A modeli Kobe depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.	114
Şekil B.32	: 2A modeli Kobe depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.	115
Şekil B.33	: 2A modeli Kobe depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.	116
Şekil B.34	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.	117
Şekil B.35	: 2A modeli Kobe depremi MT - MS RY dönmesi.	118
Şekil B.36	: 2A modeli Kobe depremi MT - MS RZ dönmesi.	119
Şekil B.37	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.	120
Şekil B.38	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.	121
Şekil B.39	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.	122
Şekil B.40	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.	123
Şekil B.41	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RY dönmesi.	124
Şekil B.42	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RZ dönmesi.	125
Şekil B.43	: 2A modeli Kobe depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.	126
Şekil B.44	: 2A modeli Kobe depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.	127
Şekil B.45	: 2A modeli Kobe depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.	128
Şekil B.46	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.	129
Şekil B.47	: 2A modeli Kobe depremi MT - DI RY dönmesi.	130
Şekil B.48	: 2A modeli Kobe depremi MT - DI RZ dönmesi.	131
Şekil B.49	: 2B modeli Kocaeli depremi DI X yerdeğiştirmesi.	132
Şekil B.50	: 2B modeli Kocaeli depremi DI Y yerdeğiştirmesi.	133
Şekil B.51	: 2B modeli Kocaeli depremi DI Z yerdeğiştirmesi.	134
Şekil B.52	: 2B modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.	135
Şekil B.53	: 2B modeli Kocaeli depremi DI RY dönmesi.	136
Şekil B.54	: 2B modeli Kocaeli depremi DI RZ dönmesi.	137
Şekil B.55	: 2B modeli Kobe depremi DI X yerdeğiştirmesi.	138
Şekil B.56	: 2B modeli Kobe depremi DI Y yerdeğiştirmesi.	139
Şekil B.57	: 2B modeli Kobe depremi DI Z yerdeğiştirmesi.	140
Şekil B.58	: 2B modeli Kobe depremi DI RX dönmesi.	141

Şekil B.59	: 2B modeli Kobe depremi DI RY dönmesi.....	142
Şekil B.60	: 2B modeli Kobe depremi DI RZ dönmesi.....	143
Şekil B.61	: 2B modeli Kocaeli depremi MS X yerdeğiştirmesi.....	144
Şekil B.62	: 2B modeli Kocaeli depremi MS Y yerdeğiştirmesi.....	145
Şekil B.63	: 2B modeli Kocaeli depremi MS Z yerdeğiştirmesi.....	146
Şekil B.64	: 2B modeli Kocaeli depremi MS RX dönmesi.....	147
Şekil B.65	: 2B modeli Kocaeli depremi MS RY dönmesi.....	148
Şekil B.66	: 2B modeli Kocaeli depremi MS RZ dönmesi.....	149
Şekil B.67	: 2B modeli Kobe depremi MS X yerdeğiştirmesi.....	150
Şekil B.68	: 2B modeli Kobe depremi MS Y yerdeğiştirmesi.....	151
Şekil B.69	: 2B modeli Kobe depremi MS Z yerdeğiştirmesi.....	152
Şekil B.70	: 2B modeli Kobe depremi MS RX dönmesi.....	153
Şekil B.71	: 2B modeli Kobe depremi MS RY dönmesi.....	154
Şekil B.72	: 2B modeli Kobe depremi MS RZ dönmesi.....	155
Şekil B.73	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.....	156
Şekil B.74	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.....	157
Şekil B.75	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.....	158
Şekil B.76	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.....	159
Şekil B.77	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RY dönmesi.....	160
Şekil B.78	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RZ dönmesi.....	161
Şekil B.79	: 2B modeli Kobe depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.....	162
Şekil B.80	: 2B modeli Kobe depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.....	163
Şekil B.81	: 2B modeli Kobe depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.....	164
Şekil B.82	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.....	165
Şekil B.83	: 2B modeli Kobe depremi MT - MS RY dönmesi.....	166
Şekil B.84	: 2B modeli Kobe depremi MT - MS RZ dönmesi.....	167
Şekil B.85	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.....	168
Şekil B.86	: 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.....	169
Şekil B.87	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.....	170
Şekil B.88	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.....	171
Şekil B.89	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RY dönmesi.....	172
Şekil B.90	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RZ dönmesi.....	173
Şekil B.91	: 2B modeli Kobe depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.....	174
Şekil B.92	: 2B modeli Kobe depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.....	175
Şekil B.93	: 2B modeli Kobe depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.....	176
Şekil B.94	: 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.....	177
Şekil B.95	: 2B modeli Kobe depremi MT - DI RY dönmesi.....	178
Şekil B.96	: 2B modeli Kobe depremi MT - DI RZ dönmesi.....	179
Şekil C.1	: 4 numaralı eleman iç kuvvetleri (N,T ₂ ,T ₃).....	182
Şekil C.2	: 4 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N,T ₂ ,T ₃).....	183
Şekil C.3	: 4 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M ₂ , M ₃).....	184
Şekil C.4	: 4 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M ₂ , M ₃).....	185
Şekil C.5	: 16 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T ₂ , T ₃).....	186
Şekil C.6	: 16 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T ₂ , T ₃).....	187
Şekil C.7	: 16 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M ₂ , M ₃).....	188

Şekil C.8	: 16 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	189
Şekil C.9	: 3 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	190
Şekil C.10	: 3 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	191
Şekil C.11	: 3 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	192
Şekil C.12	: 3 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	193
Şekil C.13	: 14 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	194
Şekil C.14	: 14 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	195
Şekil C.15	: 14 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	196
Şekil C.16	: 14 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	197
Şekil C.17	: 8 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	198
Şekil C.18	: 8 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	199
Şekil C.19	: 8 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	200
Şekil C.20	: 8 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	201
Şekil C.21	: 12 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	202
Şekil C.22	: 12 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	203
Şekil C.23	: 12 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	204
Şekil C.24	: 12 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	205
Şekil C.25	: 88 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	206
Şekil C.26	: 88 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	207
Şekil C.27	: 88 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	208
Şekil C.28	: 88 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	209
Şekil C.29	: 90 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).....	210
Şekil C.30	: 90 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).	211
Şekil C.31	: 90 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).	212
Şekil C.32	: 90 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).....	213



ÜÇ BOYUTLU ÇERÇEVE SİSTEMLERİN STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ İÇİN BİR YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Matris yerdeğiştirme yöntemi ile çubuk sistemlerin çözümlenmesinde öncelikle uç yerdeğiştirmeleri hesaplanmakta daha sonra da bu yerdeğiştirmelere bağlı olarak uç kuvvetlerinin hesabı gerçekleştirilmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen statik ve dinamik analizlerde de bu yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemin pek çok yapısal analiz programında tercih ediliyor olmasının ana sebebi, kolay programlanabilir olmasının yanında hem izostatik hem de hiperstatik sistemlerde kullanılabilirliği olmasıdır.

Bu çalışma kapsamında ilk aşamada geniş kütüphaneleri ve kolay kullanımı nedeniyle bilimsel çalışmalarda yoğun olarak kullanılan bir programlama dili olan Python ile "DSDC" adında bir yazılım geliştirilmiştir. DSDC yazılımı üç boyutlu çerçevelerin doğrusal statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirebilmektedir. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen üç boyutlu doğrusal analizler için mod süperpozisyonu yöntemi, doğrudan integrasyon yöntemi ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019 kapsamında tanımlanan mod toplama yöntemleri uygulanmıştır.

Tez çalışmasının birinci bölümünde tezin amacı ve kapsamı ile birlikte çalışmada izlenen yöntemler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde rijitlik matrisi, kütle matrisi, sönüm matrisi ve dönüşüm matrisi gibi statik ve dinamik analiz sırasında kullanılan matrislerin nasıl elde edildiği ve DSDC yazılımının gerçekleştirdiği statik ve dinamik analizler açıklanmıştır. Ayrıca bu analizler sırasında hangi işlem adımlarını takip ettiği akış şemaları ile gösterilmiştir. Ayrıca Python programlama dilinin avantajlarından bahsedilmiş ve DSDC yazılımından elde edilen verilerin görselleştirilmesi, dış ortama aktarılması ve dış ortamdan alınması için kullanılan kütüphaneler hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak, DSDC yazılımının daha kolay kullanılabilir ve kullanıcı dostu olması için izlenebilecek yollardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, DSDC yazılımının sonuçlarının kontrolü için kurulan basit iki boyutlu model (1A) ile basit üç boyutlu modeller (1B) için statik analizden elde edilen yerdeğiştirme ve dönme, serbest titreşim analizinden elde edilen titreşim periyotları ve modal kütle katılım oranları, zaman tanım alanındaki analizlerden elde edilen yerdeğiştirme ve dönme değerleri SAP2000 programından alınan referans değerler ile karşılaştırılarak hesap algoritmasının doğru çalıştığı teyit edilmiştir.

Dördüncü bölümde ise simetrik kuleli (2A) ve eksantrik kuleli (2B) yapılar üzerinde aynı analizler tekrar edilmiş ve eksantrik kuleli model içerisinde rastgele seçilen bazı kolon ve kiriş elemanlarının iç kuvvetleri DSDC ile hesaplanmış ve SAP2000 programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yerdeğiştirme ve dönme grafikleri Ek B bölümünde, iç kuvvet grafikleri de Ek C bölümünde verilmiştir. Ayrıca DSDC yazılımının analiz süreleri ile SAP2000

programının analiz süreleri karşılaştırılmış ve DSDC yazılımının analiz süresinin kısaltılması için uygulanması gereken yöntemlerden bahsedilmiştir.



DEVELOPMENT OF A SOFTWARE FOR STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF THREE DIMENSIONAL FRAME TYPE STRUCTURES

SUMMARY

Matrix displacement method determines joint displacements initially in a frame systems and after that end forces of the members are calculated dependently. Static and dynamic analyzes performed within the scope of this thesis make use of this method. The main reasons why this method is preferred in many structural analysis programs is that it is easily programmable and can be used in both isostatic and redundant systems.

In the first phase of this study, a software called *Linear Static and Dynamic Analyzer* (DSDC) was developed in Python, a programming language which is widely used in scientific studies because of its large libraries and easy usage. DSDC software is able to perform linear static and dynamic analyses of three-dimensional frame type structures. Mode superposition method, direct integration method and the mode collection method that is defined in the newest version of Turkish Earthquake Design Code are applied for 3D linear time history analyses.

In the second part, how to form the variables used during static and dynamic analysis such as stiffness matrix, mass matrix, damping matrix and transformation matrix and which process steps are followed in the static and dynamic analysis performed by DSDC software are explained.

In the first part, general information about the purpose and scope of the thesis are given together with the methods followed in this study.

In the second part, the explanations of how the matrices of stiffness matrix, mass matrix, damping matrix and transformation matrix used in static and dynamic analysis are determined, are given together with the static and dynamic analyses performed by DSDC software. Additionally, the process steps that are followed during these analyses are illustrated by means of flow charts. In addition, the advantages of Python programming language are stated and some information is given about the libraries that are used to visualize, export and import data from the DSDC software. Finally, some suggestions are made as to increase the ease of use of DSDC software and make it more user-friendly.

In the third part, for simple two-dimensional model (1A) and simple three-dimensional model (1B), displacement and rotation values obtained from static analysis, vibration periods and modal mass participation factors obtained from free vibrational analysis, and displacement and rotation values obtained from time domain analysis are compared with values obtained from SAP2000 software to evaluate the correctness of DSDC software.

In the fourth chapter, the same analyzes were performed on two different real scale structures with symmetrical tower (2A) and eccentric tower (2B). Internal forces of the column and beam elements that are randomly selected from the eccentric tower

model were calculated and compared with results obtained from SAP2000 software. From the obtained results, displacement and rotation graphs are given in Appendix B and internal force graphs are given in Appendix C. Finally execution times of DSDC software and SAP2000 software were compared and the possible approaches that should be applied to shorten the execution time of DSDC software are mentioned.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

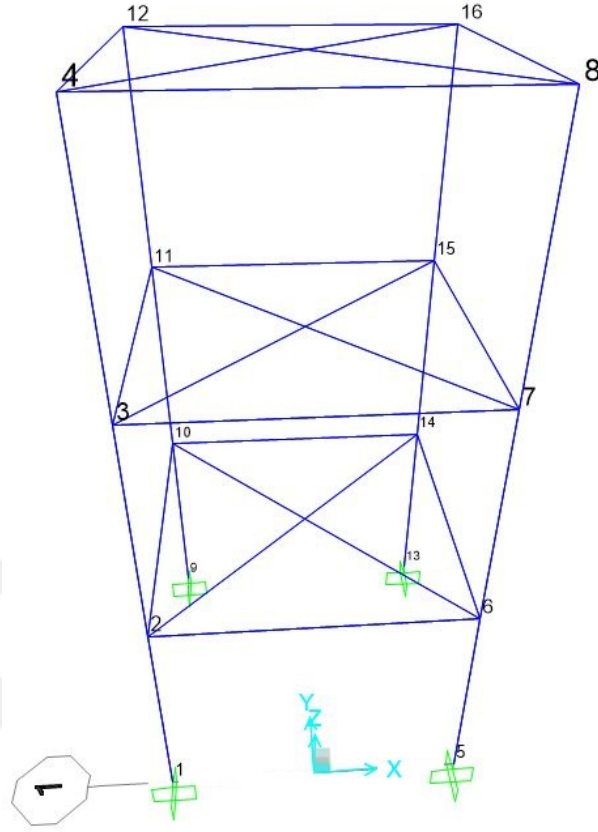
Bu tez çalışması kapsamında üç boyutlu çubuk sistemlerin statik ve dinamik analizleri için gerekli olan algoritmaların Python programlama dilinde matris-yerdeğiştirme yöntemi kullanılarak oluşturulması ve sonrasında seçilen bazı yapıların dinamik analizlerinin bu algoritma yardımıyla, doğrudan integrasyon, mod süperpozisyonu ve zaman tanım alanında mod toplama yöntemi kullanılarak hesaplanması ve sonuçlarının irdelenmesi amaçlanmıştır [1].

1.2 Tezin Kapsamı

Bu çalışma kapsamında rijitlik matrisleri oluşturulurken kayma deformasyonları ihmal edilmiştir. Yapılan analizler kapsamında sistem davranışlarının doğrusal elastik olduğu kabul edilmiştir. Hesap algoritmalarının geliştirilmesi için seçilen örnek yapı, betonarme kolon ve kirişlerden oluşan 4 metre açıklığı olan, kat yüksekliği 3 metre olan ve rijit diyafram etkisini sağlamak için kat seviyesinde düğüm noktalarının mafsallı çapraz bağlantılarla birbirine bağlandığı 3 katlı basit çerçeve sistemdir.

Örnek yapı sisteminde toplamda 30 adet çubuk eleman, 16 adet düğüm noktası ve her bir düğüm noktasının 3 adet ötelenme (U_{ix} , U_{iy} , U_{iz}), 3 adet dönme (R_{ix} , R_{iy} , R_{iz}) olmak üzere toplamda 6 serbestliği bulunduğu için toplam 96 serbestlik dereceli bir model olarak oluşturulmuştur. Kurulan yapı modelinde döşeme düzlem içi rijitliğini hesaba katmak amacıyla, eğilme rijitliği (EI) değeri çok küçük, eksenel rijitliği (EA) değeri çok büyük olan çapraz elemanlar ile Şekil 1.1'deki gibi kat seviyesindeki düğüm noktaları birbirine bağlanmaktadır.

Tez kapsamında 3 boyutlu çerçevenin statik analizinin yapılması, titreşim periyotları ve mod şekillerinin belirlenmesi, doğrudan integrasyon yöntemi ile zaman tanım alanında analiz yapılması (**DI**), mod süperpozisyonu yöntemi ile zaman tanım alanında analiz yapılması (**MS**) ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2019) [2] içerisinde



Şekil 1.1 : Örnek yapı sistemi.

yer alan zaman tanım alanında mod toplama yöntemi (MT) ile analiz yapılması için gerekli olan kodlar Python programlama dili ve onun matematiksel işlem kütüphaneleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen bu yazılım tez içerisinde "DSDC" olarak anılacaktır.

1.3 Çalışmada İzlenen Yöntemler

Bu çalışma kapsamında uygulanan statik analiz için \mathbf{k} eleman rijitlik matrislerinden gerekli dönüşüm işlemleri uygulanarak \mathbf{K} sistem rijitlik matrislerine geçiş sağlanmış, sonrasında her bir düğüm noktasına bağlanan çubuk elemanların ilgili global rijitliklerinin toplanmasıyla \mathbf{S} sistem rijitlik matrisi elde edilmiştir. Düğüm noktalarına etkileyen yük vektörü \mathbf{P} oluşturulduktan sonra denklem 1.1'in çözümü ile \mathbf{d} düğüm noktaları yerdeğiştirme vektörü hesaplanmış ve değerler SAP2000 programında oluşturulan modellerle kontrol edilmiştir [3].

$$[\mathbf{S}][\mathbf{d}] = [\mathbf{P}] \quad (1.1)$$

Dinamik hesaplamalar için öncelikle örnek yapı sisteminin serbest titreşim modları ve açısal frekansları elde edilmiştir.

$$[M][\ddot{u}(t)] + [C][\dot{u}(t)] + [K][u(t)] = [F(t)] \quad (1.2)$$

Serbest titreşim analizinin ardından denklem 1.2’de ifade edilen dinamik denge denkleminin çözümü için farklı yollar izlenmiştir. Kullanılan hesap yöntemleri doğrusal integrasyon, mod süperpozisyonu ve mod toplamadır. Doğrudan integrasyon modelinde **C** sönüm matrisinin oluşturulması için Rayleigh sönüm modeli kullanılmıştır [4]. Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde Newmark- β yöntemi kullanılmıştır [5]. Yapılan analiz sonuçları SAP2000 programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak hesap algoritmasının doğruluğu kontrol edilmiştir.

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

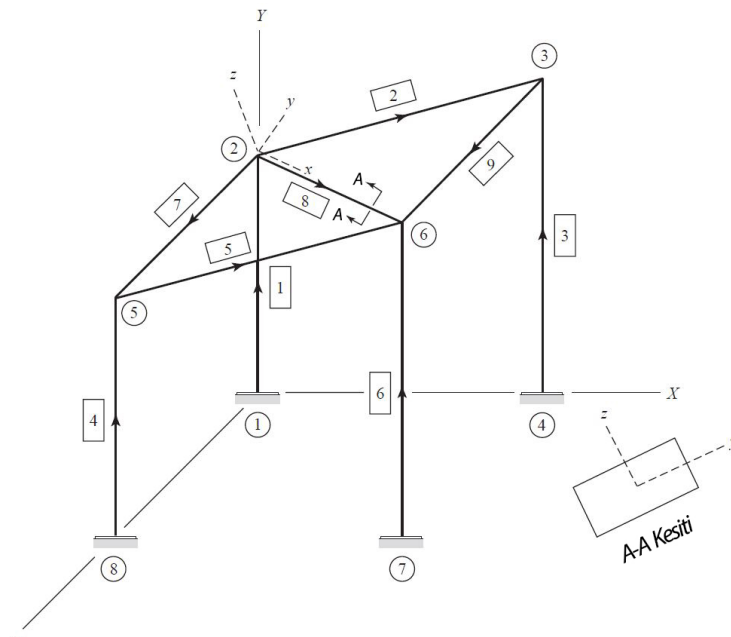
2.1 Giriş

Matris yerdeğiştirme yöntemi çubuk sistemlerde öncelikle uç yerdeğiştirmelerinin hesaplandığı, bu yerdeğiştirme değerlerine bağlı olarak uç kuvvetlerinin bulunduğu bir yöntemdir. Bu yöntemin pek çok paket program tarafından kullanılıyor olmasının ana sebebi, kolay programlanabilir olmasının yanında hem izostatik hem de hiperstatik sistemler için kullanılabilir olmasıdır.

2.2 Statik Hesap

2.2.1 Genel kabuller

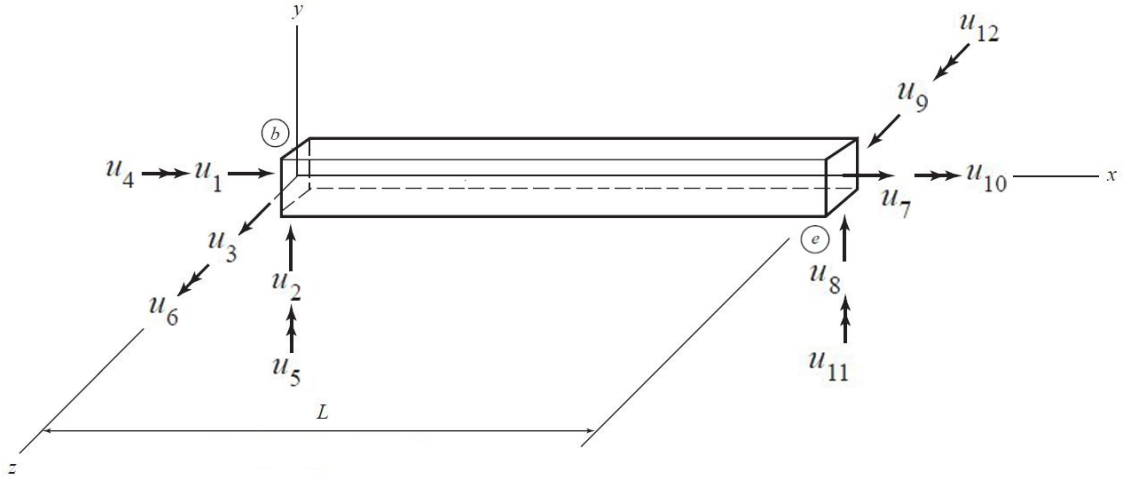
Bu tez çalışması kapsamında kabul edilen eleman eksen takımı (x, y, z) ve sistem eksen takımı (X, Y, Z) Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir. Sonuç kıyaslamalarının yapıldığı SAP2000 programından farklı olarak analiz kodunda yukarı yön Y eksenini olarak alınmıştır. Bu sebepten dolayı yerdeğiştirme ve dönme değerleri için X doğrultusunda sonuçlar ortak, Y ve Z eksenleri ters sıralı olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.1 : Analiz eleman ve sistem eksen takımları [6].

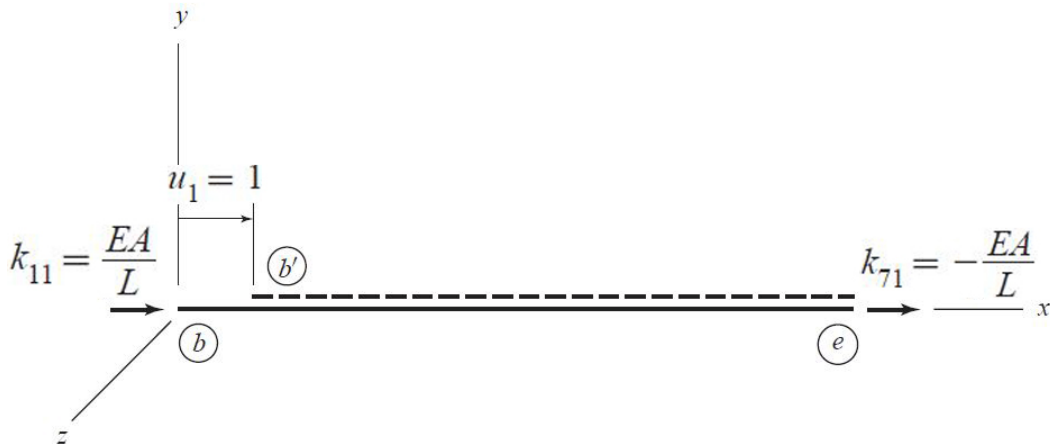
2.2.2 Eleman rijitlik matrisi

Üç boyutlu uzayda bulunan bir çubuğun her bir ucu 3 ötelenme ve 3 dönme serbestliğine sahiptir. Eleman i ve j ucundaki serbestliklerin eleman eksen takımı üzerindeki gösterimi Şekil 2.2'deki gibidir.

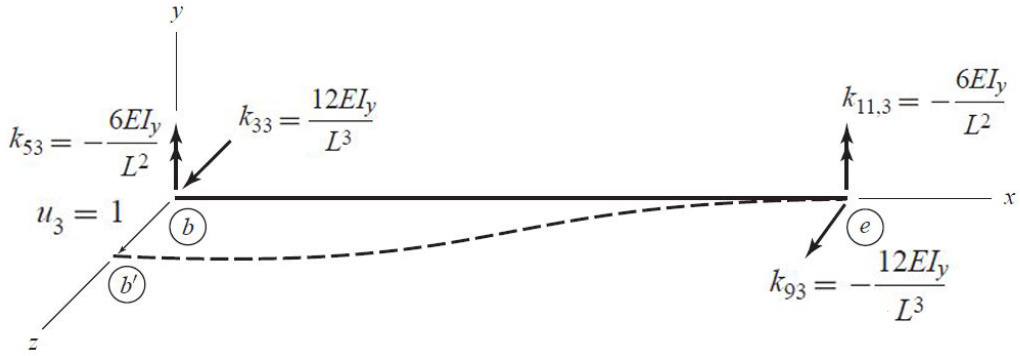
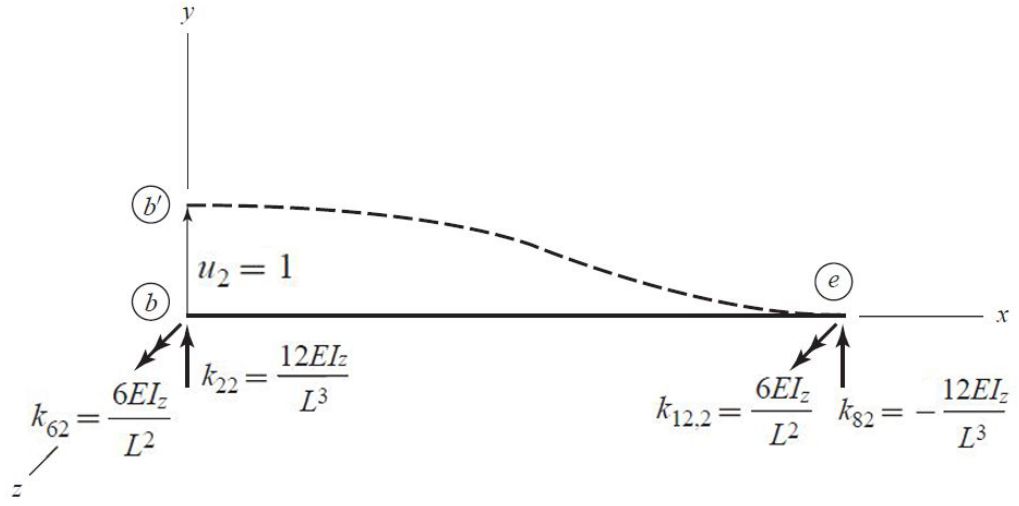


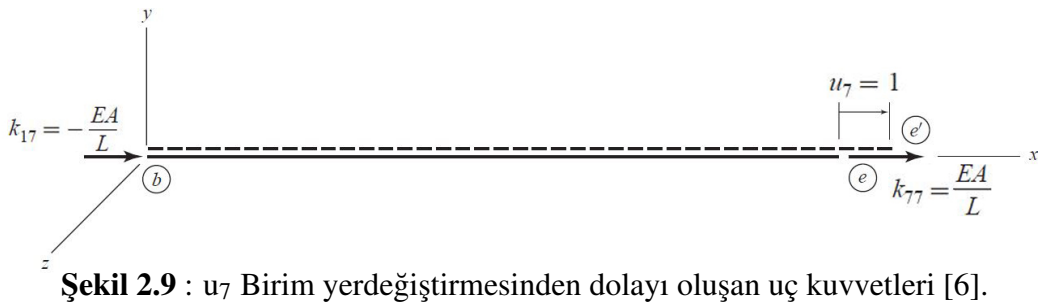
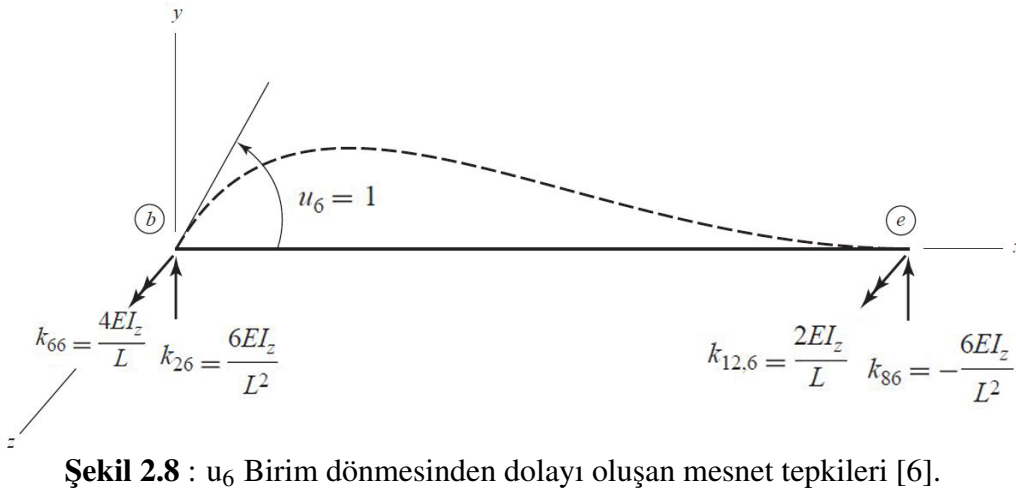
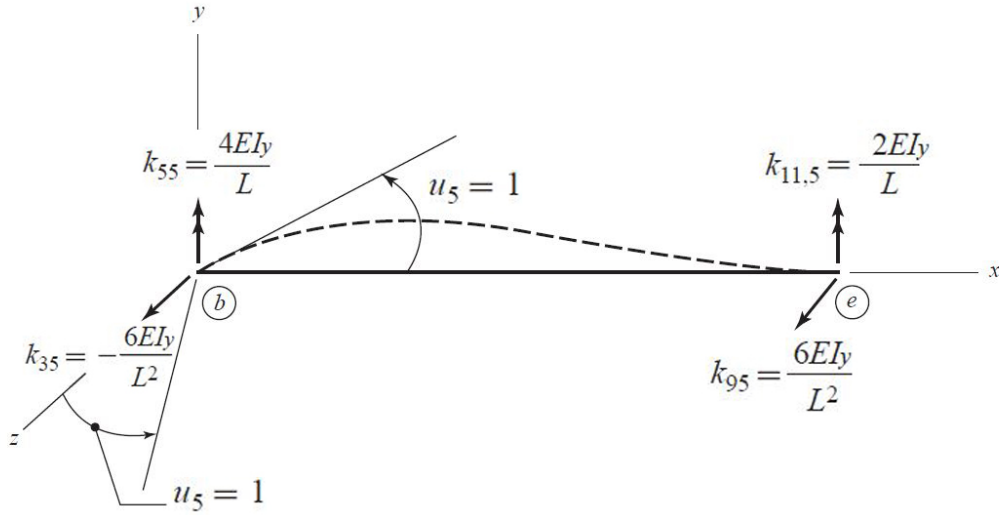
Şekil 2.2 : Eleman uç serbestlik numaraları [6].

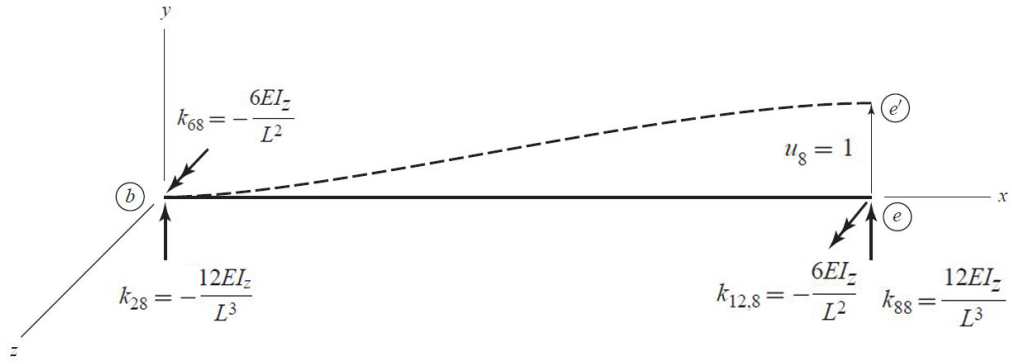
Şekil 2.2'de gösterilen iki ucu ankastre çubuk elemana sırasıyla her bir serbestlik doğrultusunda 1 birim şekil değiştirme uygulanmasıyla mesnetlerde serbestlikler doğrultusunda belirli reaksiyon kuvvetleri oluşacaktır. Örneğin u_1 doğrultusunda 1 birim kısalma oluşması durumunda 1 serbestliği doğrultusunda oluşturacağı reaksiyon kuvveti $k_{11} = \frac{EA}{L}$ iken aynı etkinin 7 serbestliği yönündeki oluşturduğu reaksiyon kuvveti $k_{71} = -\frac{EA}{L}$ olacaktır.



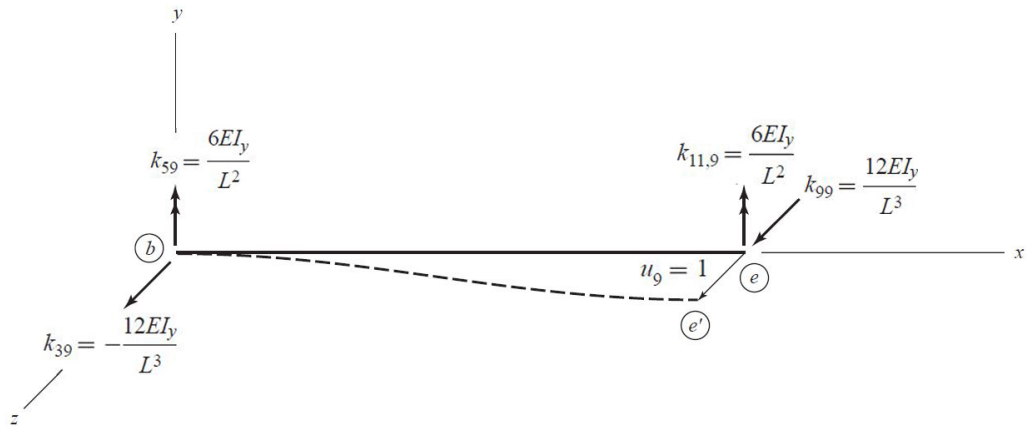
Şekil 2.3 : u_1 Birim yerdeğişirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].



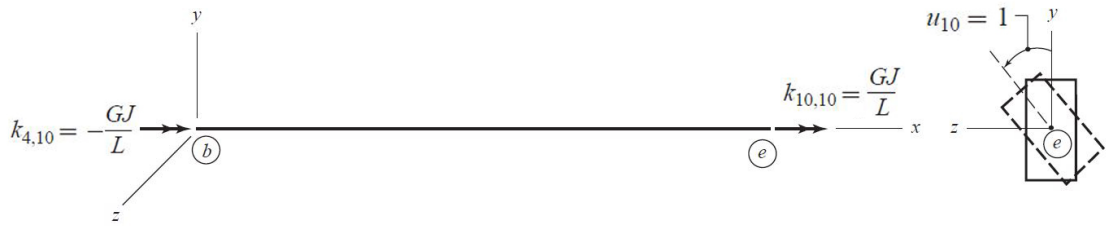




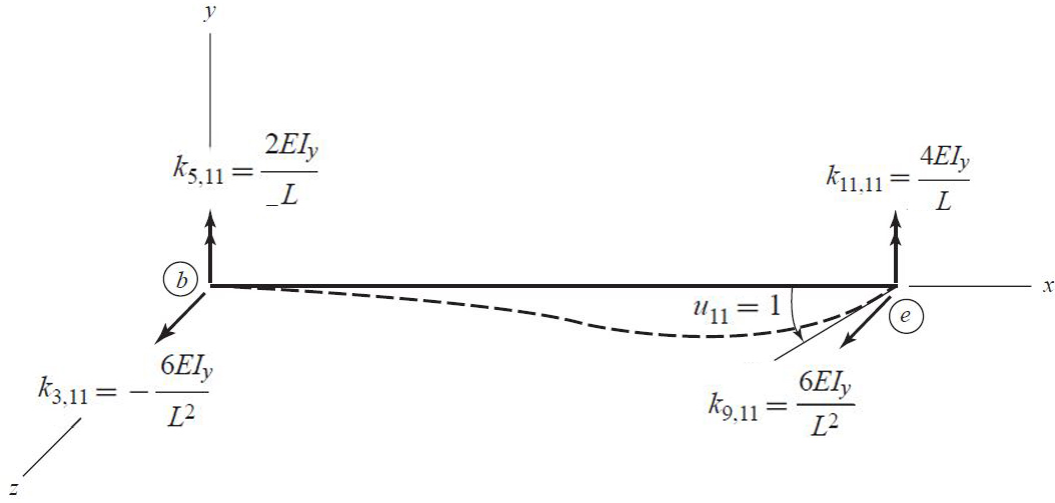
Şekil 2.10 : u_8 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].



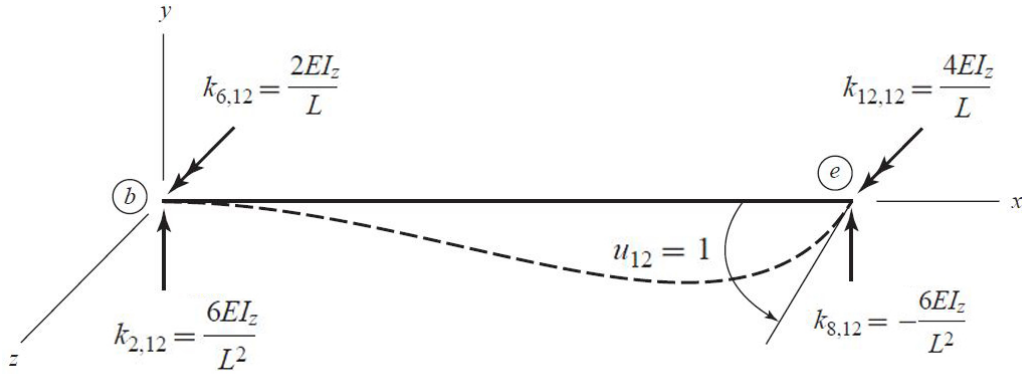
Şekil 2.11 : u_9 Birim yerdeğiştirmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].



Şekil 2.12 : u_{10} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].



Şekil 2.13 : u_{11} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].



Şekil 2.14 : u_{12} Birim dönmesinden dolayı oluşan uç kuvvetleri [6].

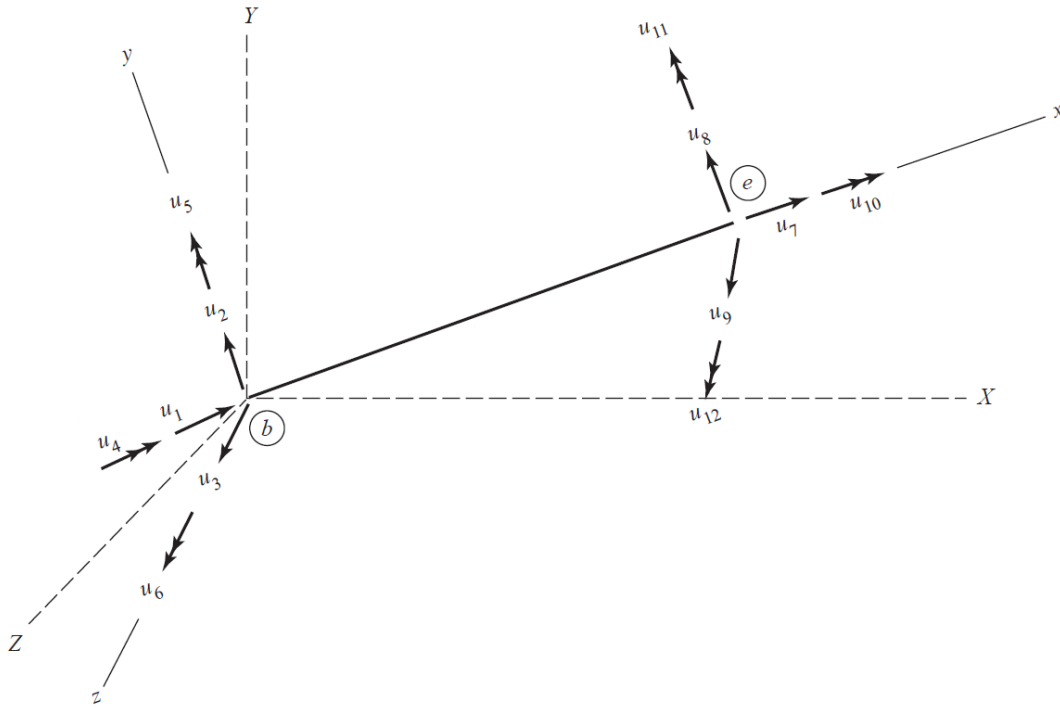
Şekil 2.3'ten 2.14'e kadar gösterildiği şekilde, birim deformasyonlar sonucunda oluşan mesnet reaksiyonlarının matris şeklinde yazılması ile \mathbf{k} eleman rijitlik matrisi Şekil 2.15'te gösterildiği şekilde elde edilmiş olur. Bu matris her iki ucu ankastre çubuk için oluşturulmuştur. Matris içerisinde bulunan değişkenlerden J , I_y , I_z sırasıyla eleman eksen takımına göre x,y,z atalet momentlerini, G kayma modülünü, E elastisite modülünü, A kesit alanını, L ise eleman boyuna karşılık gelmektedir.

$$\mathbf{k} = \frac{E}{L^3} \begin{bmatrix} AL^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -AL^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12I_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 6LI_z & 0 & -12I_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6LI_z \\ 0 & 0 & 12I_y & 0 & 0 & 0 & -6LI_y & 0 & 0 & 0 & 0 & -12I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6LI_y \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJL^2}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJL^2}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6LI_y & 0 & 4L^2I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6LI_y & 0 & 0 & 2L^2I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6LI_z & 0 & 0 & 0 & 4L^2I_z & 0 & 0 & -6LI_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2L^2I_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -AL^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & AL^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12I_z & 0 & 0 & 0 & 0 & -6LI_z & 0 & 12I_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6LI_z \\ 0 & 0 & -12I_y & 0 & 6LI_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 12I_y & 0 & 0 & 0 & 6LI_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJL^2}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJL^2}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6LI_y & 0 & 2L^2I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6LI_y & 0 & 0 & 4L^2I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6LI_z & 0 & 0 & 0 & 2L^2I_z & 0 & 0 & -6LI_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4L^2I_z \end{bmatrix}$$

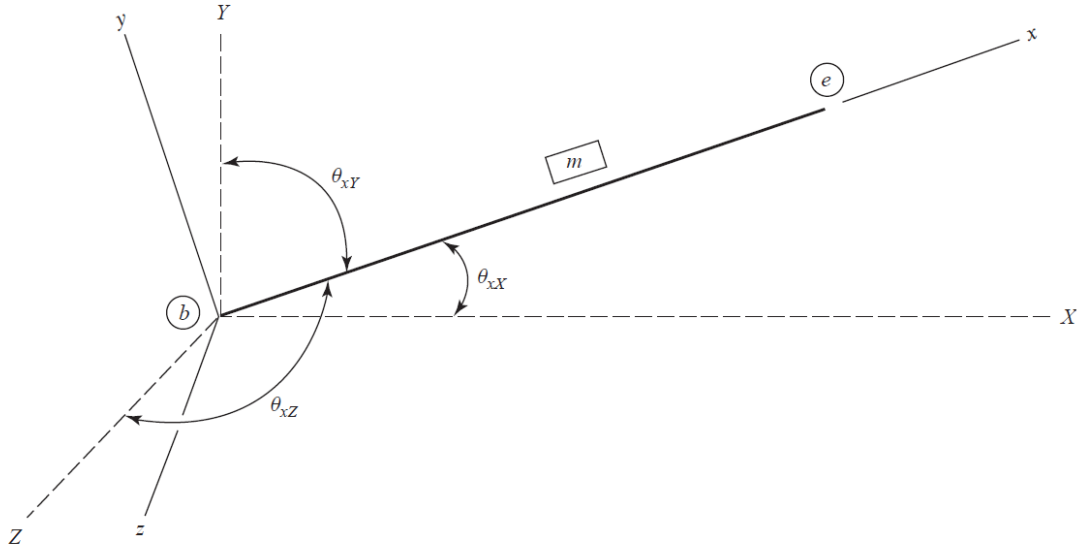
Şekil 2.15 : Eleman rijitlik matrisi [6].

2.2.3 Eleman dönüşüm matrisi

Oluşturulmuş olan k eleman rijitlik matrisinden S sistem rijitlik matrisine geçilebilmesi için eleman rijitlik matrislerinin sistem eksen takımına göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun için her çubuk elemanın eksen takımı ile sistem eksen takımına bağlı olarak oluşturulmuş T dönüşüm matrisiyle çarpılması gerekmektedir. Şekil 2.16'da gösterilen eleman uç yerdeğişikliklerinden sistem uç yerdeğişikliklerine geçiş işlemi için eleman x, y, z eksenleri ile sistem X, Y, Z eksenleri arasında kalan açıların kosinüs değerlerinden faydalanılır.

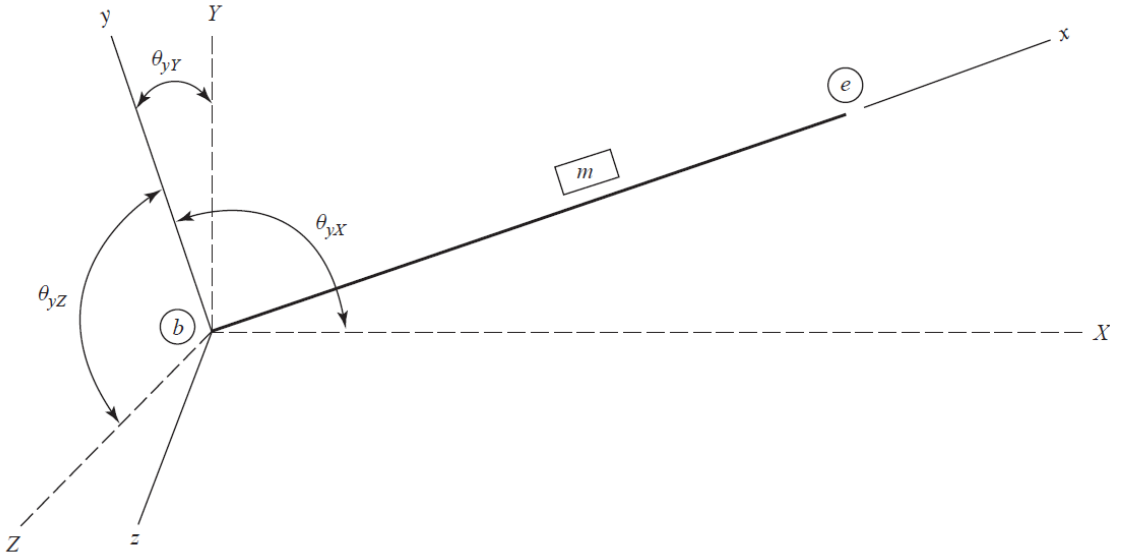


Şekil 2.16 : Eleman uç yerdeğişiklikleri [6].



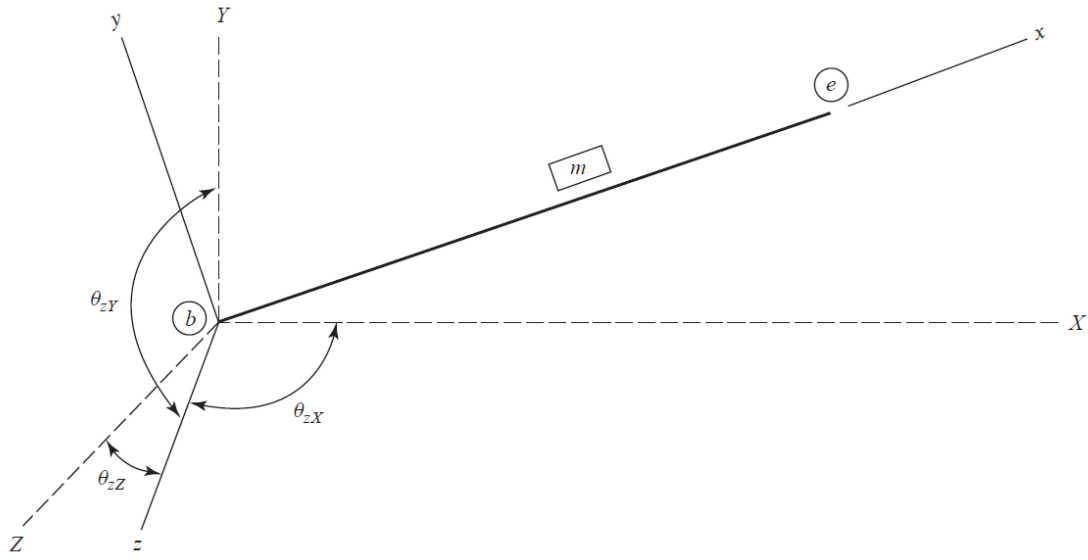
Şekil 2.17 : Eleman x eksenini sistem eksenleri arasındaki açıları [6].

Eleman x ekseninin sistem **X, Y, Z** eksenleriyle yaptığı açıları θ_{xX} , θ_{xY} , θ_{xZ} olarak Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : Eleman y eksenini sistem eksenleri arasındaki açıları [6].

Eleman y ekseninin sistem **X, Y, Z** eksenleriyle yaptığı açıları θ_{yX} , θ_{yY} , θ_{yZ} olarak Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Eleman z eksenini sistem eksenleri arasındaki açıları [6].

Eleman z ekseninin sistem **X, Y, Z** eksenleriyle yaptığı açıları θ_{zX} , θ_{zY} , θ_{zZ} olarak Şekil 2.19’da gösterilmiştir.

Sistem eksen takımına göre uç yerdeğiştirmeleri ve dönmeleri ($\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \dots, \mathbf{v}_{12}$) olmak üzere çubuk eksen takımına göre uç yerdeğiştirmeleri ve dönmeleri ($\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_{12}$) arasındaki ilişki cebirsel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{v}_1 \cos(\theta_{xX}) + \mathbf{v}_2 \cos(\theta_{xY}) + \mathbf{v}_3 \cos(\theta_{xZ}) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{v}_1 \cos(\theta_{yX}) + \mathbf{v}_2 \cos(\theta_{yY}) + \mathbf{v}_3 \cos(\theta_{yZ}) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{u}_3 = \mathbf{v}_1 \cos(\theta_{zX}) + \mathbf{v}_2 \cos(\theta_{zY}) + \mathbf{v}_3 \cos(\theta_{zZ}) \quad (2.3)$$

Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3, $r_{iJ} = \cos \theta_{iJ}$ ve $i = \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ eleman eksen takımı $J = \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ sistem eksen takımı olmak üzere denklemler matris formatında yazılırsa 2.4 numaralı denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

\mathbf{r} dönüşüm matrisi olmak üzere bu eşitlik diğer serbestlikler için de aynı şekilde yazılacaktır.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{u}_5 \\ \mathbf{u}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_4 \\ \mathbf{v}_5 \\ \mathbf{v}_6 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_7 \\ \mathbf{u}_8 \\ \mathbf{u}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_7 \\ \mathbf{v}_8 \\ \mathbf{v}_9 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{10} \\ \mathbf{u}_{11} \\ \mathbf{u}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{10} \\ \mathbf{v}_{11} \\ \mathbf{v}_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

T Eleman dönüşüm matrisi ise 12x12 boyutlarındadır ve **r** dönüşüm matrisinin köşegen üzerine yerleştirilmesi ile elde edilir. Bu dönüşüm matrisi denklem 2.9 ile belirtilen 3x3 boyutlarında bir sıfır matrisi **O** ve denklem 2.5 ile belirtilen **r** dönüşüm matrislerinin alt matrisler olarak kullanılması ile 2.10 şeklinde ifade edilebilir.

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.2.4 Eleman sistem rijitlik matrisi

Çubuk eksen takımındaki rijitlik matrisleri (**k**) ve dönüşüm matrisleri (**T**) elde edildikten sonra sistem eksen takımındaki çubuk rijitlik matrisine (**K**) geçiş denklem 2.11 ile gerçekleştirilir.

$$\mathbf{K} = \mathbf{T}^T \mathbf{k} \mathbf{T} \quad (2.11)$$

2.2.5 Sistem rijitlik matrisi

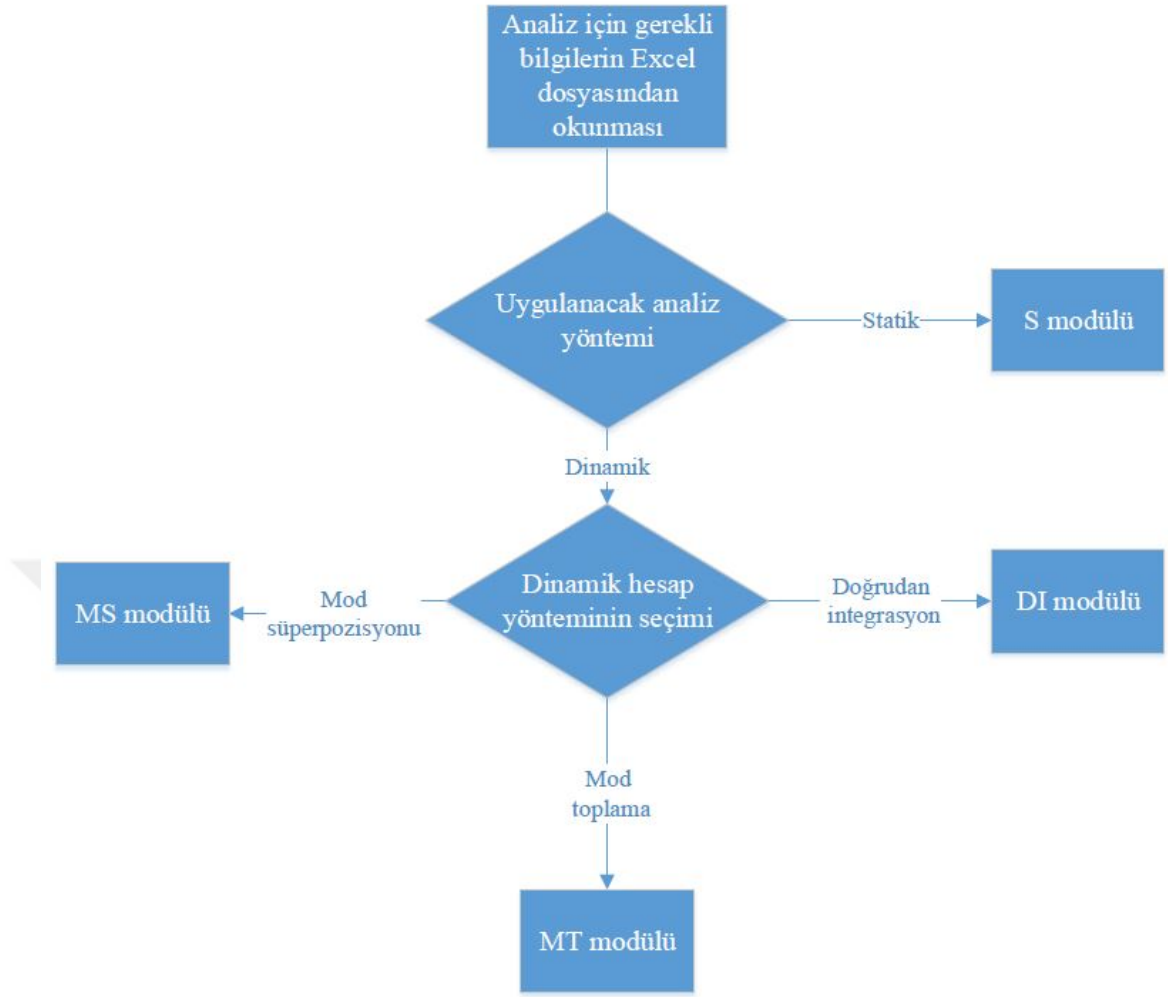
Sistem rijitlik matrisi (**S**) oluşturulurken her bir düğüm noktasının sahip olduğu 6 serbestlik göz önüne alınarak düğüm noktası sayısının (**DS**) 6 katı büyüklüğünde bir kare matris oluşturulur. Bu matris içerisine her bir çubuk elemanın uç düğüm noktalarının numaralarına bağlı olarak belirlenen noktalara sistem eksen takımındaki çubuk rijitlik matrislerinden **K** gelen değerler eklenerek sistem rijitlik matrisi (**S**) elde edilir.

2.2.6 Kütle matrisi

Kütle matrisi (**M**) de sistem rijitlik matrisi (**S**) gibi $(6 * DS) \times (6 * DS)$ boyutlarındadır. Bu tez çalışması kapsamında hesap modelindeki tüm kütlelerin düğüm noktalarında toplanmış olduğu varsayılmıştır. Kütle matrisi (**M**) oluşturulurken düğüm noktalarının numaralandırılma sırasıyla sistem eksen takımına göre doğrusal kütleleri **mX**, **mY**, **mZ** ve açısız kütleleri **mQ_x**, **mQ_y**, **mQ_z** matris köşegeni üzerine yerleştirilmiştir. Kütle matrisinin köşegen elemanları haricindeki tüm elemanları sıfırdır.

2.2.7 DSDC yazılımının akış şeması

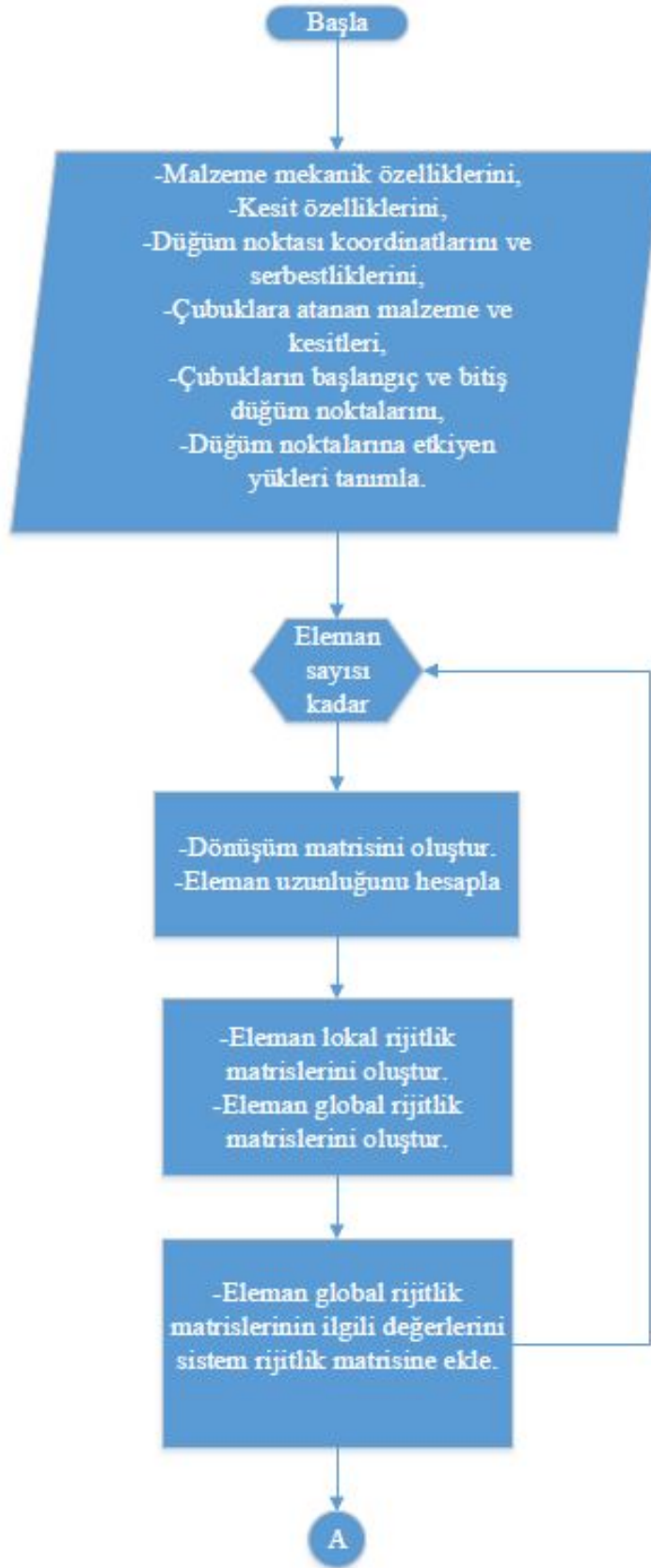
DSDC yazılımı, bir adet statik (**S**) ve üç adet dinamik hesap modülüne sahiptir (**DI**, **MT**, **MS**). DSDC yazılımının genel yapısı alt modülleri ile birlikte Şekil 2.20'da gösterilmektedir. Burada **S** modülü statik hesabını, **MS** modülü mod süperpozisyonu, **DI** modülü doğrudan integrasyonu, **MT** modülü ise mod toplama yöntemini gerçekleştiren modülleri göstermektedir.



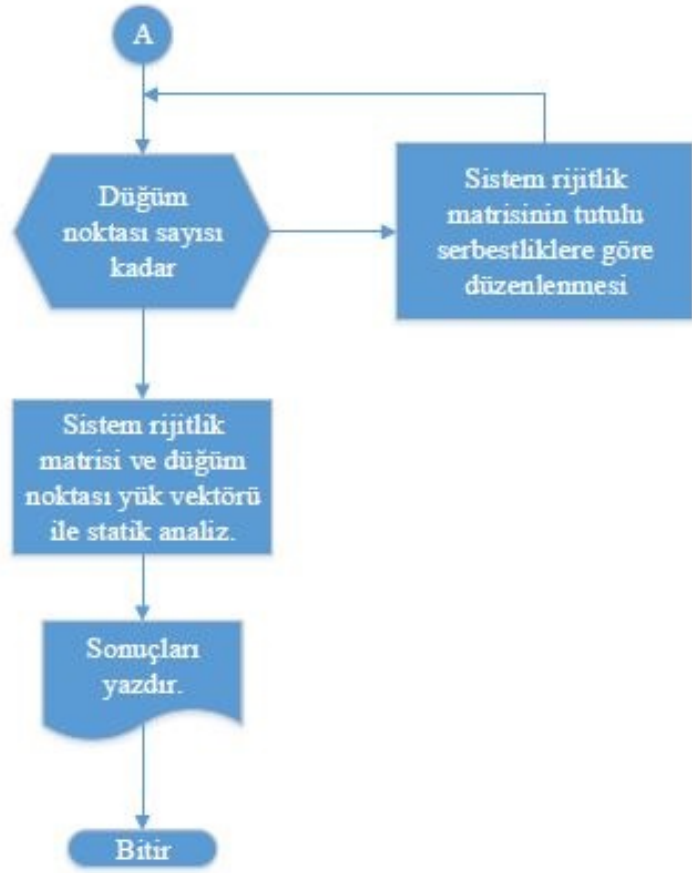
Şekil 2.20 : DSDC yazılımı akış şeması.

2.2.8 Statik hesap akış diyagramı

Bölüm 2.2 ve alt başlıkları içerisinde nasıl elde edildiği açıklanan eleman rijitlik matrisi, dönüşüm matrisi, sistem rijitlik matrisi ve düğüm noktalarına etkiyen yük vektörü ile gerçekleştirilen statik hesabın DSDC yazılımı içerisinde çalışırken takip ettiği adımlar Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de yer alan akış diyagramları ile açıklanmıştır.



Şekil 2.21 : Statik hesap akış diyagramı.



Şekil 2.22 : Statik hesap akış diyagramı (devam).

2.3 Dinamik Hesaplar

2.3.1 Serbest titreşim analizi

Çok serbestlik dereceli elastik çerçevelerin sönümsüz serbest titreşim hareketi, sisteme dışarıdan zamana bağlı bir $F(t)$ zorlaması ya da çerçeveye herhangi bir deprem ivmesine maruz kalmaksızın sistemin başlangıç koşullarından kaynaklanan hareketidir. Sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi olan 2.12'nin çözümü ile sistemin doğal modları ve doğal titreşim frekansları bulunabilmektedir.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{0}\} \quad (2.12)$$

Diferansiyel denklemin çözümünde $\mathbf{u}(t) = \bar{\mathbf{u}} \cos(\omega t - \theta)$ şeklindeki basit bir harmonik hareket denklemi olduğu kabul edilirse $(\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m})\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$ denklemi elde edilir. Bu denklem sistemi, $\bar{\mathbf{u}}$ vektörünün bilinmeyenlerine göre homojen lineer denklem sistemini gösterir. Bu homojen lineer sistemin açık çözümü $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$ olup, sistemin

sükûnette olmasına karşı gelir. Sıfırdan farklı bir çözüm ise, lineer denklemin katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması ile mümkündür [7]:

$$|\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}| = 0 \quad (2.13)$$

Bu ifade sistemin *Frekans Denklemi* olarak bilinir. Bu frekans denkleminin n adet serbestlikli bir sistem için $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ şeklinde n adet kökü bulunmaktadır. Bu değerler küçükten büyüğe sıralandığında sistemin serbest titreşim frekansları sırasıyla elde edilmiş olur. Herhangi bir ω_i kökü için $\bar{u} = \phi_i$ kabul ederek 2.13 denkleminde yerine yazıldığında, $|\mathbf{k} - \omega_i^2 \mathbf{m}| \phi_i = 0$ denklemi elde edilir. Bu lineer denklem sisteminde katsayılar determinantı sıfır olduğu için, denklemlerden biri diğerlerine lineer bağımlıdır. Denklem sisteminde (n-1) adet lineer bağımsız denklem varken, bilinmeyen olarak ϕ_i vektörünün n tane bileşeni vardır. Bu durumda ϕ_i vektörünün değerlerinden biri keyfi olarak seçilir. Böylece homojen denklem sistemi lineer bağımlı n-1 homojen olmayan denklem takımına dönüşürken, bilinmeyen sayısı (n-1) olur. Böylece elde edilen ϕ_i vektörü ω_i serbest açısal titreşim frekansına karşı gelen mod şekli olarak elde edilmiş olur [7].

Bu tez çalışması kapsamında mod şekilleri ve açısal frekansların hesaplanması için Python programlama dilinin matematik kütüphanelerinden biri olan NumPy kullanılmıştır. Kütüphane içerisinde tanımlanmış olan ve özdeğer özvektör hesapları yapmak için hazırlanan fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon çıktısı olarak elde edilen mod vektörleri en büyük değeri 1 olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Daha sonrasında elde edilen mod şekillerinin SAP2000 programında oluşturulan referans modelle kontrolünün yapılabilmesi için 2.14 denkleminde ifade edildiği şekilde kütle matrisine göre normalize edilmiştir.

$$\phi_i = \frac{\phi_i}{\sqrt{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i}} \quad (2.14)$$

Bu normalizasyon işleminden sonra tüm mod vektörleri için $\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i = 1$ olacaktır. Ayrıca elde edilen serbest titreşim modları **M kütle matrisi** ve **S sistem rijitlik matrisine** göre ortogonaldır.

$$\phi_i^T \mathbf{M} \phi_j = 0 \quad i \neq j$$

$$\phi_i^T \mathbf{S} \phi_j = 0 \quad i \neq j$$

2.3.2 Mod süperpozisyonu yöntemi ile zaman tanım alanında analiz

Bu yöntemin temeli, mod vektörlerinin kütle ve rijitlik matrisine göre ortogonal olma özelliğinden yararlanarak, N serbestlikli tek bir sistemin n adet tek serbestlik dereceli modal alt sistemlere dönüştürülerek çözümlenmesine dayanmaktadır. Buradan elde edilen modal yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinden mod vektörleri yardımıyla gerçek yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerine geçilir, sonrasında ise bu değerler modal katılımları oranlarıyla çarpılarak her bir modun katkısı hesaplandıktan sonra hesaba katılması istenilen mod sayısına değerlerin toplanması ile aranan yerdeğiştirme ve dönme değerleri elde edilmiş olur.

2.3.2.1 Modal koordinatlara geçiş

Çok serbestlik dereceli bir sistemin tek serbestlik dereceli alt eş sistemlere dönüştürülmesi için gerçek koordinat sisteminden modal koordinat sistemine geçiş yapılması gerekmektedir. Bu bölümde yapılacak açıklamalarda çok serbestlik dereceli sistem 3 serbestlikli olarak kabul edilerek işlem adımları gösterilecektir. Φ denklem 2.15 ve denklem 2.16'da gösterildiği gibi kütle matrisine göre normalize edilmiş mod vektörlerinden oluşan mod matrisidir.

$$[\Phi] = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3] \quad (2.15)$$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \phi_{1,3} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \phi_{2,3} \\ \phi_{3,1} & \phi_{3,2} & \phi_{3,3} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Gerçek koordinatlar ile modal koordinatlar arasındaki ilişki denklem 2.17'de gösterildiği gibidir. Burada $[U]$ vektörü gerçek koordinatları $[y]$ vektörü ise modal koordinatları göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,1} & \phi_{1,2} & \phi_{1,3} \\ \phi_{2,1} & \phi_{2,2} & \phi_{2,3} \\ \phi_{3,1} & \phi_{3,2} & \phi_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.3.2.2 Genelleştirilmiş kütle, rijitlik ve sönüm matrisi

Hareket denkleminde yer alan $[M]$, $[C]$ ve $[S]$ matrislerinin ve $[F]$ yük vektörünün $[\Phi]$ mod matrisi yardımıyla genelleştirilmesi işlemi aşağıda denklem 2.18 ile denklem 2.20 arasında gösterildiği şekilde gerçekleştirilir.

$$[\Phi^T][M][\Phi] = \begin{bmatrix} m_1^* & 0 & 0 \\ 0 & m_2^* & 0 \\ 0 & 0 & m_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Kütle matrisinin geliştirilmesinde kullanılan mod matrisi kütle matrisine göre normalize edilmiş ise geliştirilmiş kütle matrisi birim matris olacaktır.

$$[\Phi^T][S][\Phi] = \begin{bmatrix} k_1^* & 0 & 0 \\ 0 & k_2^* & 0 \\ 0 & 0 & k_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sistem rijitlik matrisinin geliştirilmesinde kullanılan mod matrisi kütle matrisine göre normalize edilmiş ise geliştirilmiş rijitlik matrisi köşegen elemanları hariç tüm elemanları sıfır olan ve köşegen üzerindeki elemanlar ise açısal titreşim frekanslarının kareleri olan bir matris olacaktır.

$$[\Phi^T][C][\Phi] = \begin{bmatrix} c_1^* & 0 & 0 \\ 0 & c_2^* & 0 \\ 0 & 0 & c_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2\zeta_2\omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & 2\zeta_2\omega_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Sönüm matrisinin geliştirilmesinde kullanılan mod matrisi kütle matrisine göre normalize edilmiş ise geliştirilmiş sönüm matrisi köşegen elemanları hariç tüm elemanları sıfır olan ve köşegen üzerindeki elemanlar ise açısal titreşim frekansları ve o moda ait olan kritik sönüm oranının iki katı olan bir matris olacaktır.

$$[M][\ddot{u}(t)] + [C][\dot{u}(t)] + [K][u(t)] = [F(t)] \quad (2.21)$$

Denklemler 2.21 ile verilen hareket denklemleri genel koordinat sistemi için yazılmıştır. Bu denklemleri modal koordinat sistemine taşımak için 2.17 hareket denkleminde yerine yazılırsa denklem 2.22 elde edilir.

$$[M][U][\ddot{y}(t)] + [C][U][\dot{y}(t)] + [K][U][y(t)] = [F(t)] \quad (2.22)$$

Bu denklem de soldan $[\Phi]^T$ mod matrisinin transpozunu ile çarpıldığında denklem 2.23 elde edilmiş olur. Hareket denkleminin içerisinde yer alan kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri bu şekilde geliştirilmiş olur. Geliştirilmiş bu büyüklükler ile hareket denklemleri 2.24'teki şekilde ifade edilebilir. Bu işlemden sonra denklem 2.25'te görülebileceği gibi çok serbestlikli sistem n adet tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülmüş olur.

$$[U^T][M][U][\ddot{y}(t)] + [U^T][C][U][\dot{y}(t)] + [U^T][K][U][y(t)] = [U^T][F(t)] \quad (2.23)$$

$$[\bar{M}][\ddot{y}(t)] + [\bar{C}][\dot{y}(t)] + [\bar{K}][y(t)] = [U^T][F(t)] \quad (2.24)$$

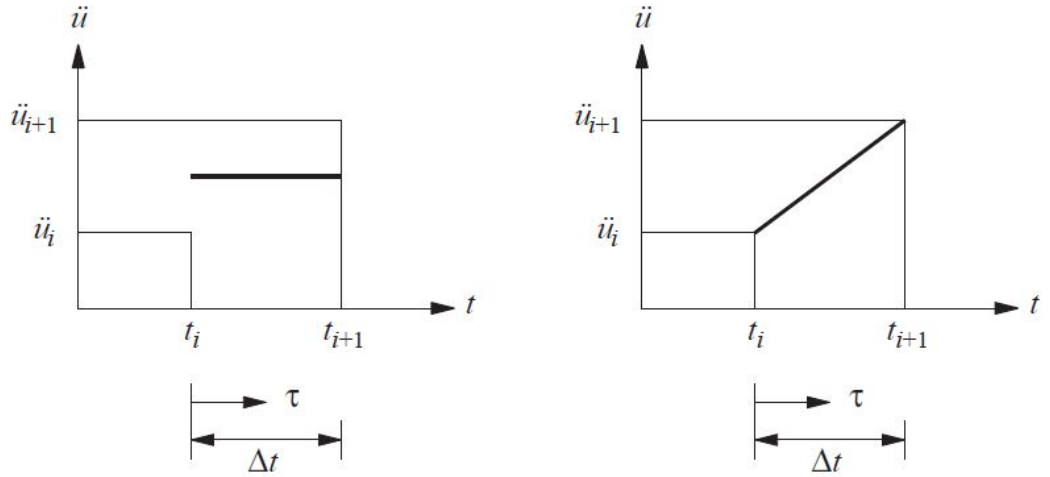
$$\begin{bmatrix} m_1^* & 0 & 0 \\ 0 & m_2^* & 0 \\ 0 & 0 & m_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{y}_2(t) \\ \ddot{y}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1^* & 0 & 0 \\ 0 & c_2^* & 0 \\ 0 & 0 & c_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \dot{y}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1^* & 0 & 0 \\ 0 & k_2^* & 0 \\ 0 & 0 & k_3^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\phi_1^T][F(t)] \\ [\phi_2^T][F(t)] \\ [\phi_3^T][F(t)] \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Düzenlenen bu hareket denkleminin çözümü için sayısal integrasyon yöntemlerinden Newmark- β kullanılmıştır. Bu sayısal integrasyon yöntemi aşağıda belirtilen 2.26 ve 2.27 numaralı denklemlerin hesaplanması ile uygulanır.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (2.26)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{i+1} \quad (2.27)$$

Bu denklemlerde yer alan β ve γ değişkenleri t_i ve Δt adım aralığı sonrasında yer alan t_{i+1} anlarındaki ivme değerlerinin birleştirilme yöntemine göre değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.23 : Sabit ortalama ivme (solda) ve doğrusal ivme (sağda) [8].

(i) $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ sabit ortalama ivme

(ii) $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ doğrusal ivme

Sayısal stabiliteyi iyi sağladığı için bu yöntemlerden sabit ortalama ivme yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Zaman aralığının değeri sayısal analiz ile çözüm yapılırken

çözüm duyarlılığını etkilemektedir. Bu hesaplama yöntemi için zaman aralığı (Δt) yapı periyodunun $1/10$ 'undan daha küçük ($\Delta t < T/10$) olması durumunda oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Bu yöntem uygulanırken aşağıda sıralanan adımlar izlenir:

1. Başlangıç Hesapları

$$(a) \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - k u_0}{m}$$

(b) Δt adım aralığı seçilir.

$$(c) a_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c$$

$$a_2 = \frac{1}{\beta(\Delta t)}m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)c$$

$$a_3 = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c$$

$$(d) \hat{k} = k + a_1$$

2. Her Adımında [$i = 1, 2, 3, \dots$] Gerçekleştirilecek Hesaplamalar

$$(a) \hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i$$

$$(b) u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}}$$

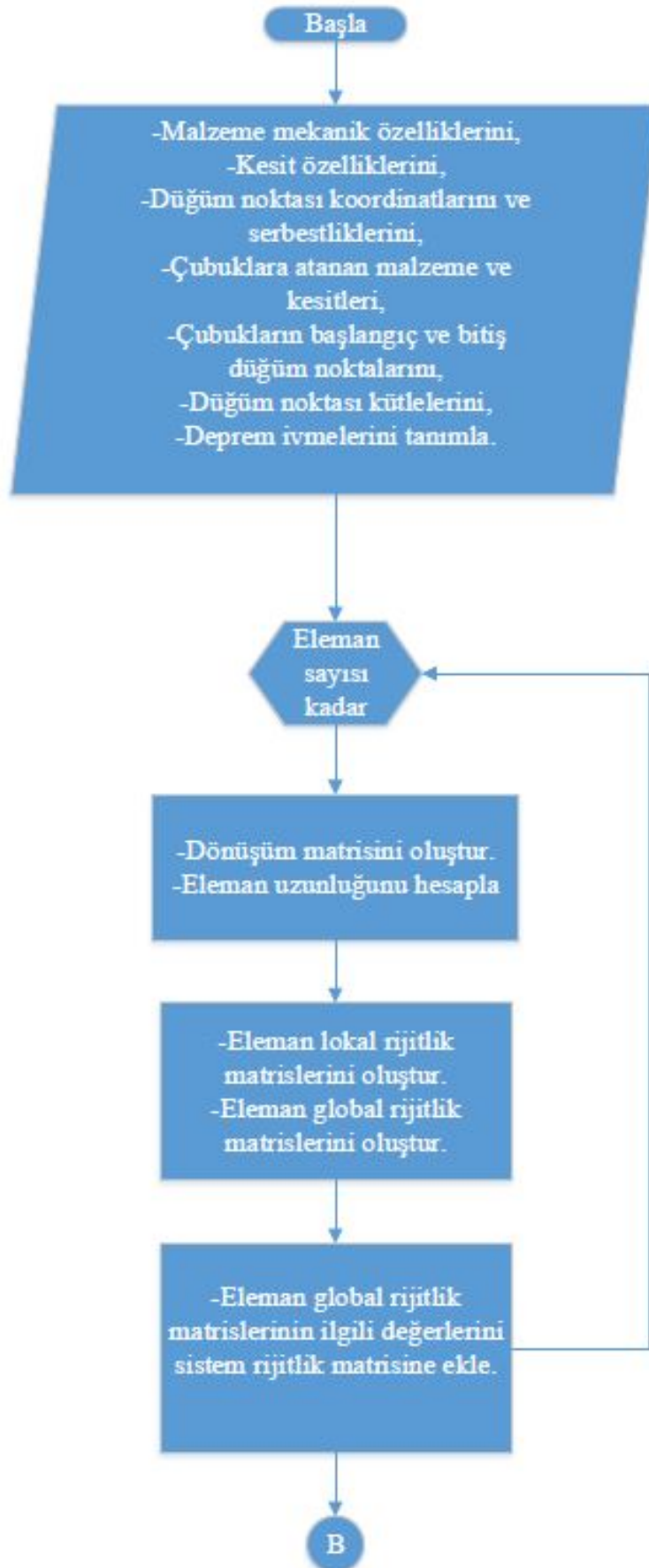
$$(c) \dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}(u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right)\dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{u}_i$$

$$(d) \ddot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\ddot{u}_i$$

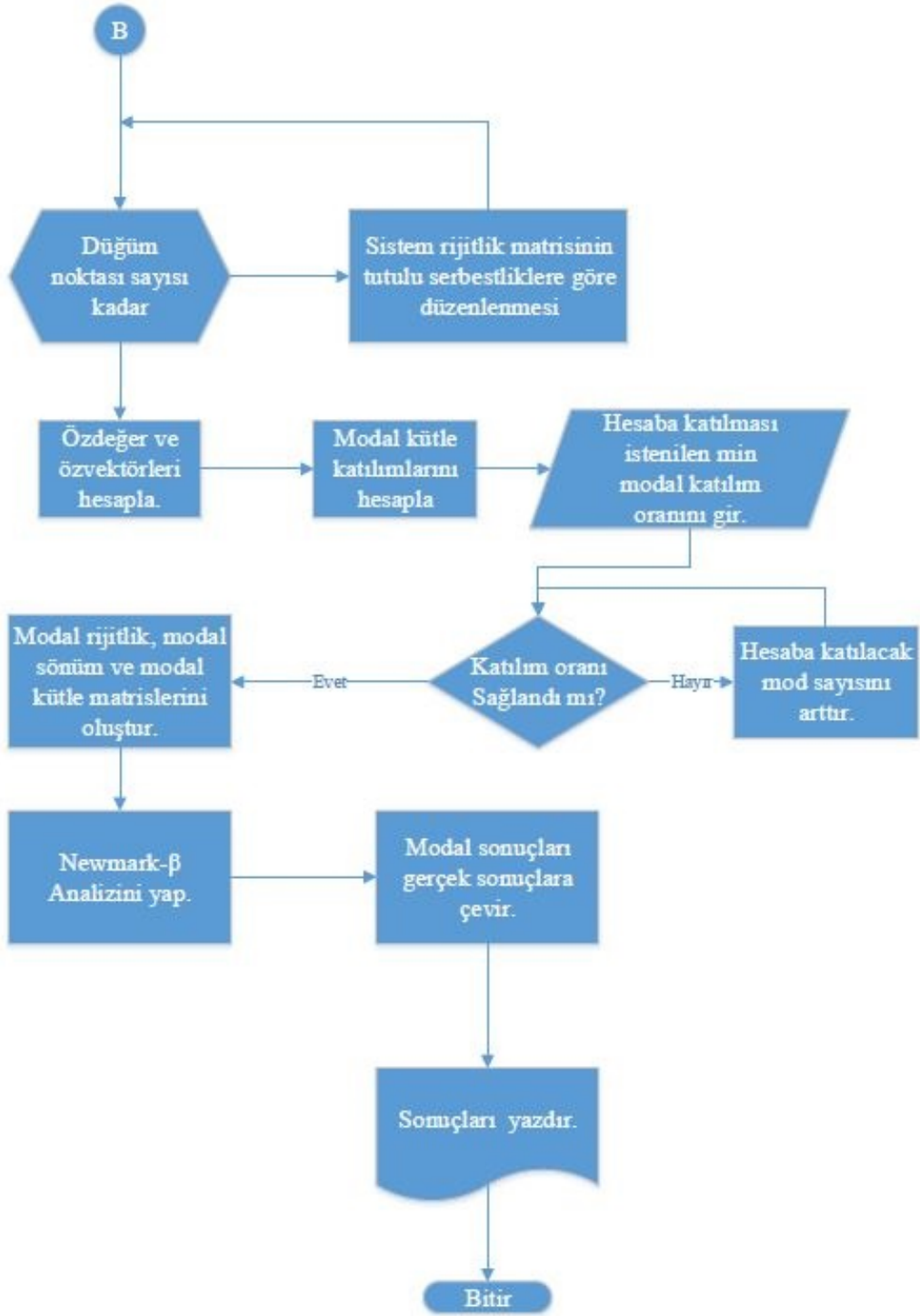
Bir sonraki adımda tekrar i yerine $i + 1$ koyulup a ile d arasında belirtilen hesaplamalar yapılarak yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri elde edilir.

2.3.3 Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı

Bölüm 2.3.2 ve alt başlıkları içerisinde hesap adımları açıklanan mod süperpozisyonu yönteminin DSDC yazılımı içerisinde uygulanırken izlenen hesap adımları Şekil 2.24 ve şekil 2.25'de yer alan akış diyagramlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı.

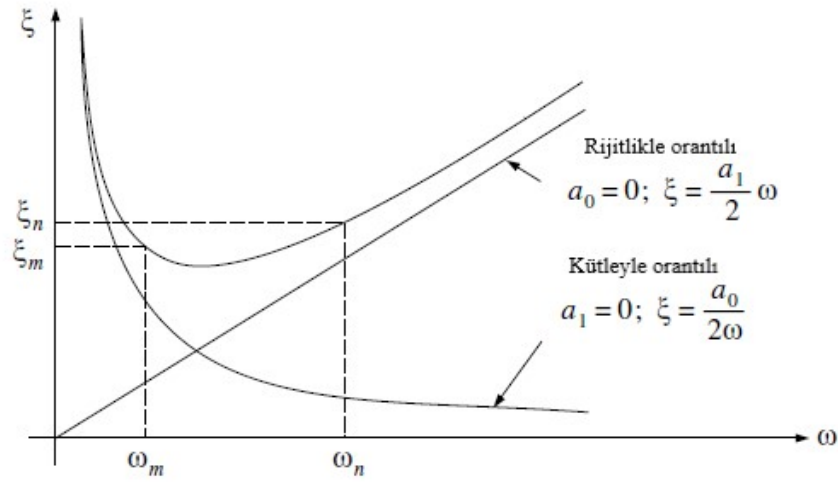


Şekil 2.25 : Mod süperpozisyonu yöntemi akış diyagramı (devam).

2.3.4 Doğrudan integrasyon yöntemi ile zaman tanım alanında analiz

Zaman tanım alanında analiz için doğrudan integrasyon yöntemi tercih edildiğinde denklem 2.21 ile gösterilen hareket denkleminin çözümü, yine Newmark- β yöntemi

kullanılarak gerçekleştirilecektir. Ancak bu hesaplama sırasında kullanılacak olan **S** sistem rijitlik matrisi ve **M** kütle matrisinin nasıl oluşturulduğu sırasıyla bölüm 2.2.5 ve bölüm 2.2.6'da açıklanmıştır. Bu hesaplama yönteminde sönüm matrisi, elde edilen bu matrislere bağlı olarak Şekil 2.25'te gösterilen Rayleigh sönüm modeline göre oluşturulmuştur. Bu yöntemle sönüm matrisi, belirlenen *i* ve *j* numaralı modların açılmal frekanslarına ve bu frekanslara karşı gelen sönüm oranlarına bağlı olarak hesaplanan a_0 ve a_1 katsayılarının kütle ve rijitlik matrisleriyle çarpılarak toplanmasıyla elde edilir.



Şekil 2.26 : Rayleigh sönüm modeli [9].

Belirlenen iki frekans ve sönüm oranına göre a_0 ve a_1 katsayıları 2.28 denklemi ile hesaplanır.

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.28)$$

Yukarıda hesaplanan a_0 ve a_1 katsayıları yardımıyla **C** sönüm matrisi denklem 2.29'da gösterildiği şekilde bulunur.

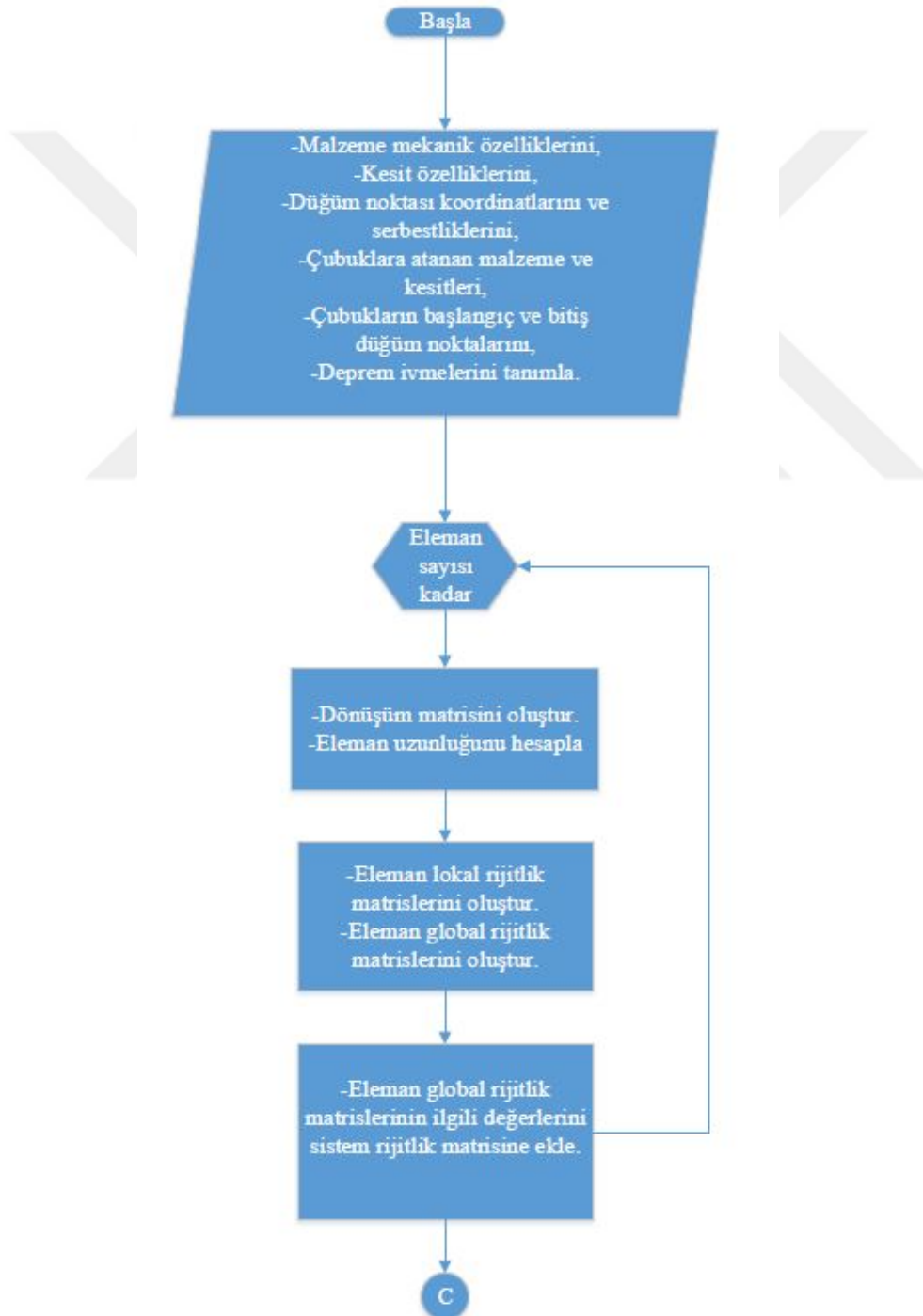
$$\mathbf{C} = a_0\mathbf{M} + a_1\mathbf{S} \quad (2.29)$$

Tez kapsamında geliştirilmiş olan yazılımda doğrusal integrasyon yöntemi seçilmesi durumunda ω_i ve ω_j açılmal modları ve bu modlara karşı gelecek olan sönüm oranları kullanıcı tarafından girilmekte , buna bağlı olarak Rayleigh sönüm matrisi oluşturulmaktadır. Bu adımdan sonra ise denklem 2.21 ile belirtilen zorlanmış sönümlü hareket denklemi Newmark- β yöntemi kullanılarak, deprem kaydında

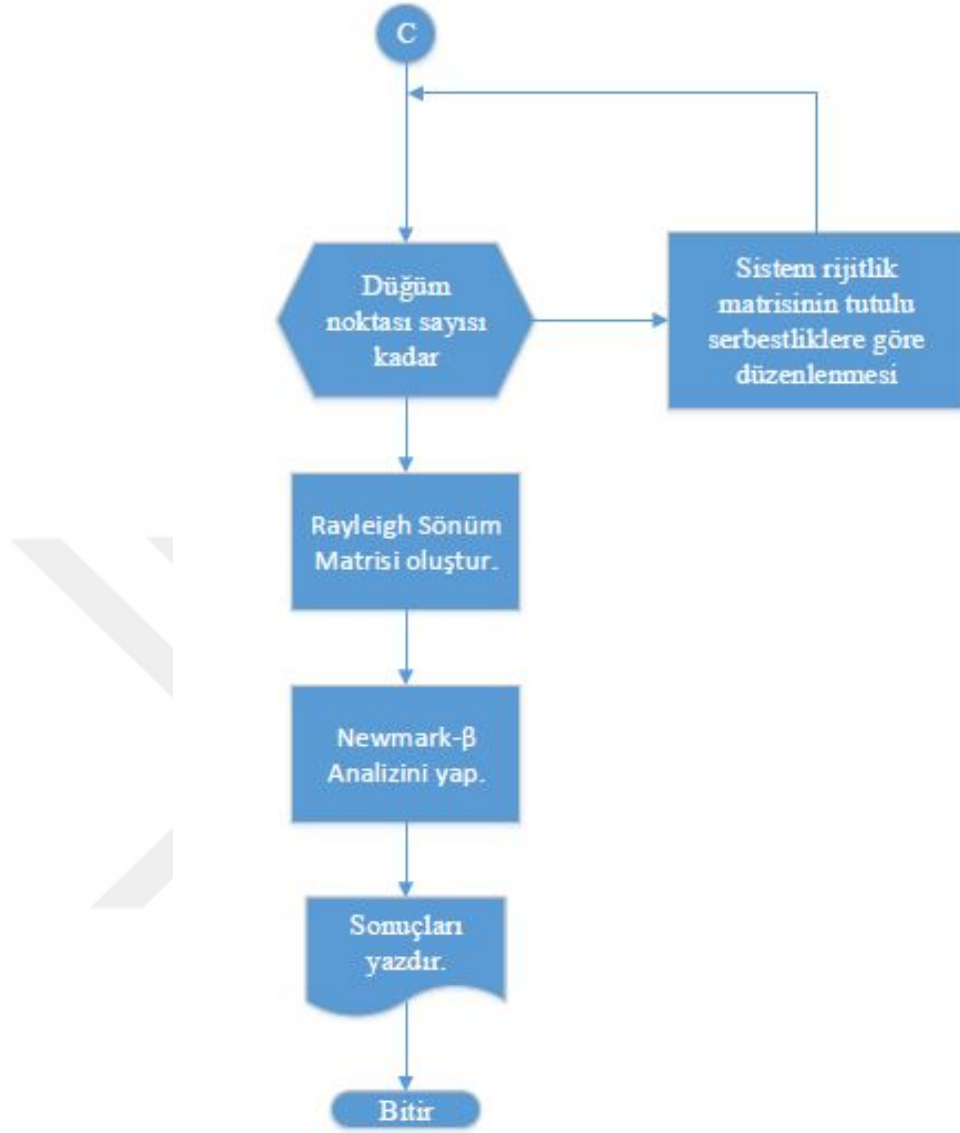
belirlenmiş olan adım sayısınca uygulanır ve her bir serbestliğe ait yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri zamana bağlı olarak elde edilir.

2.3.5 Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı

Bölüm 2.3.4 içerisinde hesap adımları açıklanan doğrudan integrasyon yönteminin DSDC yazılımı içerisinde uygulanırken takip ettiği hesap adımları Şekil 2.27 ve Şekil 2.28’de yer alan akış diyagramlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.27 : Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı.



Şekil 2.28 : Doğrudan integrasyon yöntemi akış diyagramı (devam).

2.3.6 Zaman tanım alanında mod toplama yöntemi

Geliştirilen yazılımın zaman tanım alanında doğrusal analiz için kullandığı bir diğer yöntem ise **TBDY**'nin bilgilendirme eki *4B Modal Hesaplama Yöntemleri* bölümünde açıklanan zaman tanım alanında mod toplama yöntemidir. Bu yöntem yapıya aynı anda etkiyen (X) ve (Y) yatay doğrultularında deprem yükleri sonucunda oluşacak yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin hesaplanmasına olanak vermektedir.

Öncelikle denklem 2.30’da belirtilen modal katkı çarpanları (X) ve (Y) doğrultularındaki her bir titreşim modu için hesaplanır.

$$\Gamma_n^{(X)} = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ix} \phi_{i(X)n}}{\sum_{i=1}^N (m_{ix} \phi_{ixn}^2 + m_{iy} \phi_{iyn}^2 + m_{iz} \phi_{izn}^2 + m_{i\theta_x} \phi_{i\theta_x}^2 + m_{i\theta_y} \phi_{i\theta_y}^2 + m_{i\theta_z} \phi_{i\theta_z}^2)} \quad (2.30)$$

Analizde hesaba katılacak olan mod sayısı, modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılımları kullanılarak yazılıma her bir serbestlik için ayrı ayrı tanımlanabilen minimum modal kütle katılım oranı sağlayan mod adedidir. Hesaba katılacak mod sayısının belirlenmesinden sonra, her bir mod için hareket denklemi 2.31 nolu denklemdeki gibi (X) ve (Y) yönlerine ait modal katılım faktörleri ve deprem yer ivmeleri kullanılarak oluşturulur.

$$\ddot{d}_n^{(X,Y)}(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{d}_n^{(X,Y)}(t) + \omega_n^2 d_n^{(X,Y)}(t) = -\ddot{u}_g^{(X)}(t) - \frac{\Gamma_n^{(Y)}}{\Gamma_n^{(X)}} \ddot{u}_g^{(Y)}(t) \quad (2.31)$$

Oluşturulan bu denklemler Newmark- β yöntemi kullanılarak çözüldüğünde her iki doğrultudaki deprem etkisinden dolayı oluşan modal ivme ($\ddot{d}_n^{(X,Y)}(t)$), modal hız ($\dot{d}_n^{(X,Y)}(t)$) ve modal yerdeğiştirme ($d_n^{(X,Y)}(t)$) büyüklükleri zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmiş olur. Hesapta esas alınacak zaman artımı $T_n/10$ ’dan büyük olmayacaktır.

Her bir mod için bulunan $d_n^{(X,Y)}(t)$ modal yerdeğiştirme değerleri ve açısal frekanslar kullanılarak $\alpha_{nR}^{(X,Y)}(t)$ *azaltılmış modal sözde ivme* değerleri denklem 2.32’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\alpha_{nR}^{(X,Y)}(t) = \omega_n^2 \frac{d_n^{(X,Y)}(t)}{R_a(T_n)} \quad (2.32)$$

Analiz için seçilen (X) yönüne ait olan modal katkı çarpanı kullanılarak modal etkin kütleler, denklem 2.33 ile gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} m_{ixn}^{(X)} &= m_{ix} \phi_{ixn} \Gamma_n^{(X)} \\ m_{iyn}^{(X)} &= m_{iy} \phi_{iyn} \Gamma_n^{(X)} \\ m_{izn}^{(X)} &= m_{iz} \phi_{izn} \Gamma_n^{(X)} \\ m_{i\theta_{xn}}^{(X)} &= m_{i\theta_x} \phi_{i\theta_{xn}} \Gamma_n^{(X)} \\ m_{i\theta_{yn}}^{(X)} &= m_{i\theta_y} \phi_{i\theta_{yn}} \Gamma_n^{(X)} \\ m_{i\theta_{zn}}^{(X)} &= m_{i\theta_z} \phi_{i\theta_{zn}} \Gamma_n^{(X)} \end{aligned} \quad (2.33)$$

(X) deprem doğrultusu için tipik n'inci titreşim modunda herhangi bir davranış büyüklüğüne karşı gelen tipik *birim modal davranış büyüklüğü* $\bar{r}_n^{(X)}$ denklem 2.33 ile hesaplanan modal etkin kütlelerin kendi doğrultularında yük olarak etki ettirildiği statik hesapla elde edilir. (X) ve (Y) doğrultularında aynı anda etkiyen deprem için tipik n'inci titreşim modu *modal davranış büyüklüğü* $r_n^{(X,Y)}(t)$ denklem 2.34'te gösterildiği şekilde hesaplanır.

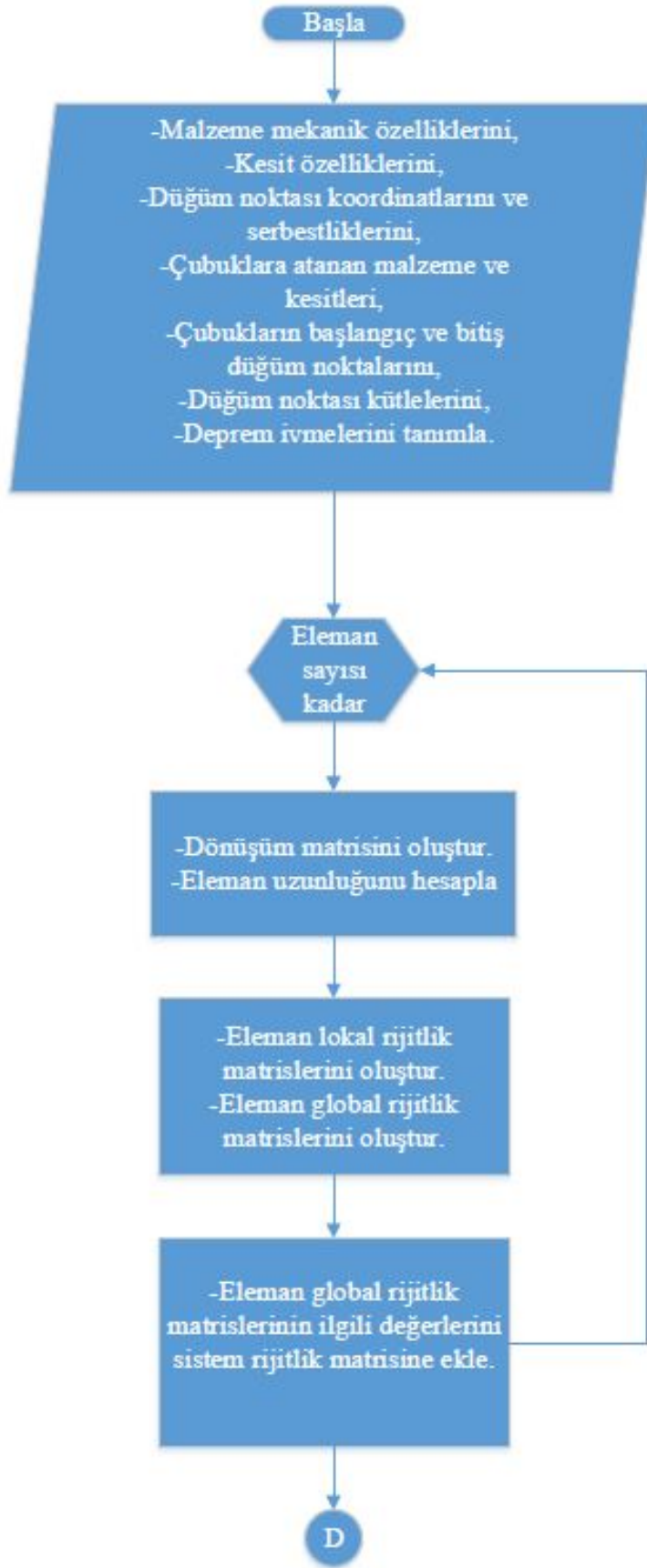
$$r_n^{(X,Y)}(t) = \bar{r}_n^{(X)} \alpha_{nR}^{(X,Y)}(t) \quad (2.34)$$

(X) ve (Y) deprem etkilerinden dolayı meydana gelen iç kuvvet bileşenleri, yerdeğiştirme ve görelî kat ötelenmesi gibi davranış büyüklüklerinin zamana göre değişimleri, $r^{(X,Y)}(t)$, her bir titreşim modu için denklem 2.34'e göre hesaplanan eş zamanlı modal katkıların, $r_n^{(X,Y)}(t)$, doğrudan toplanması ile elde edilir.

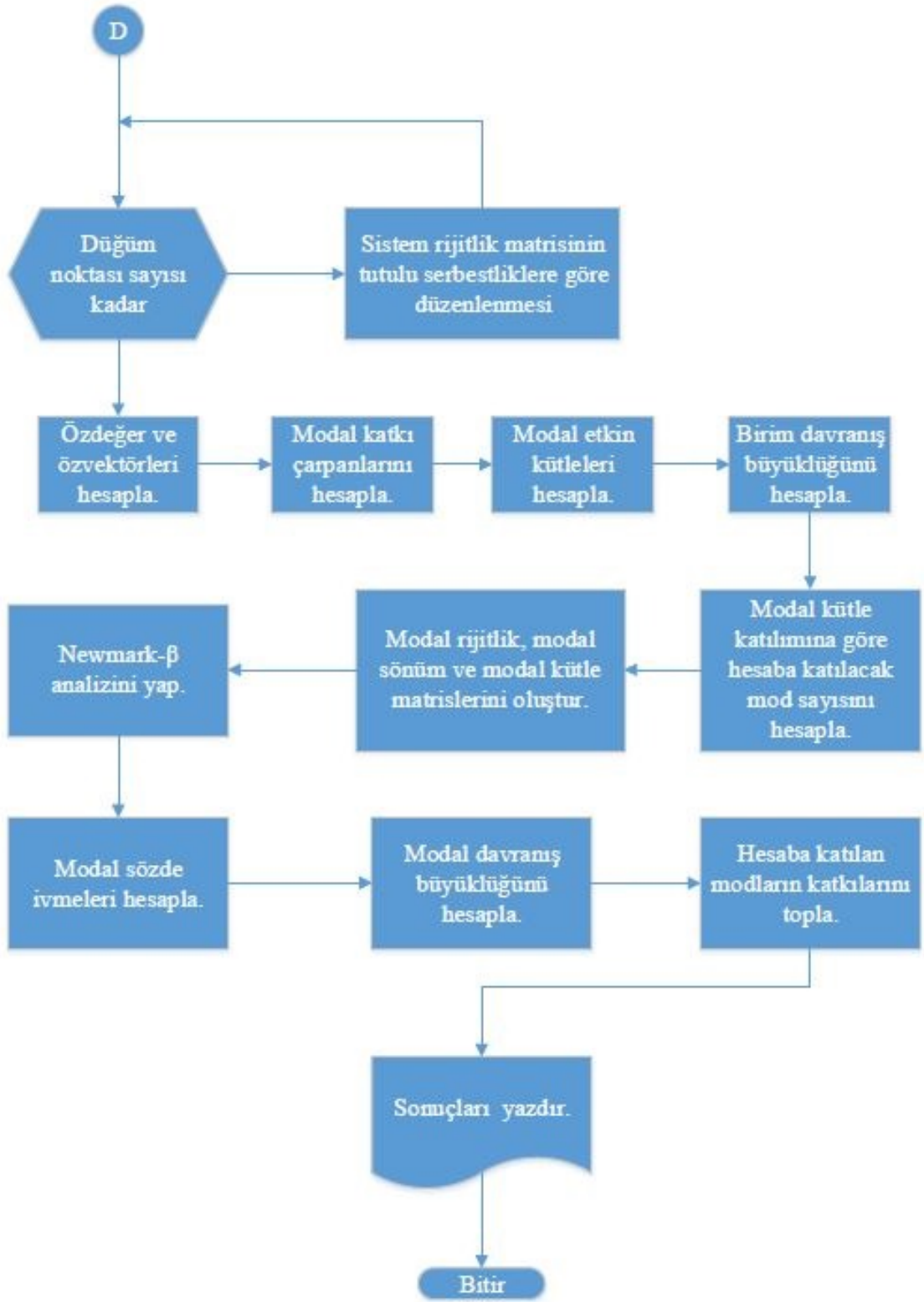
$$r^{(X,Y)}(t) = \sum_{n=1}^{YM} \bar{r}_n^{(X,Y)}(t) \quad (2.35)$$

2.3.7 Mod toplama yöntemi akış diyagramı

Bölüm 2.3.6 içerisinde hesap adımları açıklanan mod toplama yönteminin, DSDC yazılımı içerisinde uygulanırken takip ettiği hesap adımları şekil 2.27 ve şekil 2.28'de yer alan akış diyagramlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.29 : Mod toplama yöntemi akış diyagramı.



Şekil 2.30 : Mod toplama yöntemi akış diyagramı (devam).

2.4 Python Programlama Dili ve Kullanılan Kütüphaneler

Python programlama dili Guido Van Rossum adlı Hollandalı bir programcı tarafından 1990'lı yılların başında geliştirilmeye başlanmıştır. Bu programlama dilinin günümüzde akademide ve özel sektörde oldukça yoğun olarak kullanılmasının nedenleri arasında, basit ve temiz bir söz diziminin olması, kolay öğrenilebilmesi, kolay anlaşılması ve büyük kitleler tarafından kullanılıyor olmasından dolayı bir çok çalışma alanına özgü hazır kütüphanelere sahip olması sayılabilir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen matris hesaplamalarında *NumPy* kütüphanesi kullanılmıştır [10]. Bu kütüphane çok boyutlu matrisler ve büyük boyutlu matris elemanların cebirsel işlemlerinin gerçekleştirme konusunda oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle tez çalışmasının dördüncü bölümünde detayları verilmiş olan 2A ve 2B gibi çok serbestlik dereceli sistemlerde oldukça hızlı ve tutarlı sonuçlar vermiştir. Dinamik analizlerin uygulanması sırasında uygulanan özdeğer - özvektör hesaplamaları da yine bu kütüphane içerisinde mevcut olan fonksiyon yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Referans alınan SAP2000 programının sonuçları ile karşılaştırıldığında 10^{-5} ve daha küçük olan sonuçlarda tutarsızlık oluşmasına karşın, incelenen modların hakim hareket doğrultusunda elde edilen sonuçlar oldukça yakındır.

Elde edilen verilerin görselleştirilmesi için kullanılan kütüphane ise *Matplotlib* kütüphanesidir [11]. Tez içerisinde yer alan zaman tanım alanında analiz grafikleri ve eleman iç kuvvetlerinin grafikleri bu kütüphane yardımı ile oluşturulmuştur. Veri girişinin kolay olması için *openpyxl* kütüphanesi [12] kullanılmış bu sayede Excel ortamından veri girişi sağlanabilmiştir [13]. Tez çalışmasının ekler bölümünde sunulan CD içerisinde yer alan *Veri.xlsx* dosyası yapılmak istenilen analiz yöntemine göre doldurulduktan sonra ana dizinde bulunan *Analiz.py* dosyası Python konsolu ile çalıştırılarak sonuçlar elde edilir. Analiz kodunun çalışması için gerekli olan kütüphaneler ve analizler için gerekli bilgileri *Açıklamalar* dosyası içerisinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçların daha anlaşılabilir bir hale gelmesini sağlamak amacıyla kullanılan *xlsxwriter* kütüphanesi [14] ise bulunan sonuçların Excel ortamına aktarılmasını sağlamıştır.

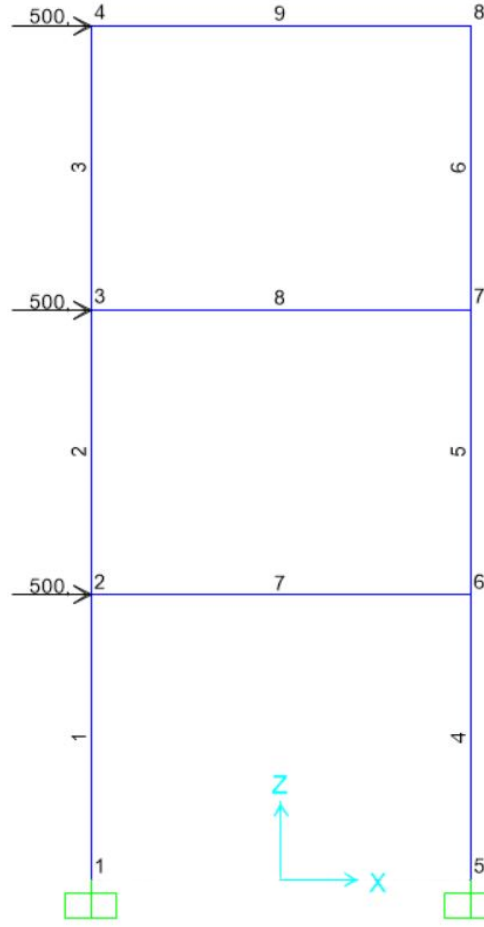
3. YAZILIMIN SONUÇLARININ DOĞRULANMASI

3.1 Statik Hesap Kontrolleri

Tez kapsamında geliştirilen yazılımın sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için SAP2000 programından yararlanılmıştır. Bu amaçla 40x60 cm kesite sahip ve C30 beton sınıfı malzemeden üretilmiş iki boyutlu (1A) ve üç boyutlu (1B) modelleri düğüm noktalarından uygulanan statik yükler sonucunda düğüm noktalarında meydana gelen yerdeğiştirme ve dönme değerleri kontrol edilerek oluşturulan sistem rijitlik matrisinin doğruluğu teyit edilmiştir.

3.1.1 İki boyutlu basit çerçevede statik yükleme

Aşağıda iki boyutlu basit çerçevede kat yüksekliği üç metre, aks açıklığı dört metre olarak seçilmiştir. Şekil 3.1’de gösterildiği şekilde kat seviyelerine denk gelen düğüm noktalarına 500 kN büyüklüğünde yatay kuvvet uygulanmış, 4 numaralı düğüm noktasında oluşan yerdeğiştirme ve dönme değerleri ile SAP2000 programından alınan sonuçlar Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.



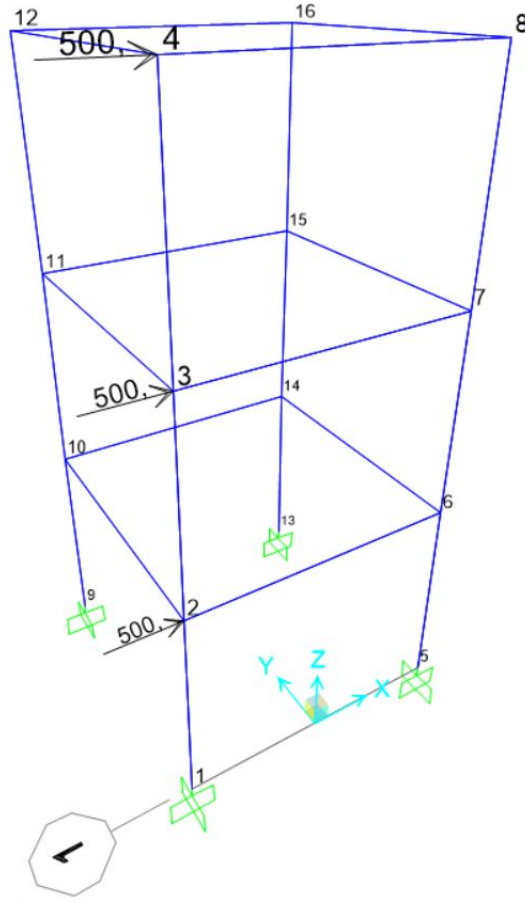
Şekil 3.1 : 2 Boyutlu Basit Çerçeve - 1A.

Çizelge 3.1 : 1A modelinin sonuçları.

4. Düşüm Noktası	ΔX (mm)	ΔZ (mm)	θY (rad)
SAP2000 Sonuçları	40.5545	0.9661	0.00188
DSDC Sonuçları	40.5547	0.96607	0.001884

3.1.2 Üç boyutlu basit çerçevede statik yükleme

İki boyutlu olarak oluşturulan basit çerçeve örneğinin Y eksenine doğrultusunda kopyalanması üç boyutlu basit çerçeve elde edilmiştir. Aks açıklıkları dört metre, kat yüksekliği üç metre olan üç boyutlu basit çerçeve 1B Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu modelde de 2, 3 ve 4 numaralı düşüm noktalarından global X eksenine doğrultusunda 500 kN yük uygulanmıştır. Dört numaralı düşüm noktası için, geliştirilen yazılım ve SAP2000 programından okunan yerdeğiştirme ve dönme değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : 3 Boyutlu basit çerçeve - 1B.

Çizelge 3.2 : 1B modelinin sonuçları.

4. Düğüm Noktası	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	θX (rad)	θY (rad)	θZ (rad)
SAP2000 Sonuçları	30.8761	-7.9071	0.5802	0.00014	0.0013	0.00452
DSDC Sonuçları	30.8732	-7.9043	0.58019	0.000142	0.00130	0.00452

3.2 Dinamik Hesap Kontrolleri

3.2.1 Titreşim frekansları ve modal kütle katılımlarının kontrolü

Dinamik hesaplamaların doğruluğu kontrol edilirken ilk aşamada, düğüm noktalarına noktasal olarak kütle atanmış olan çerçeve sistemin doğal titreşim frekanslarının ve modal kütle katılım oranlarının kontrolü gerçekleştirildi. Bu hesaplamaların nasıl gerçekleştirildiği bölüm 2.3.1’de açıklanmıştır. Aşağıda yer alan 3.3 çizelgede 1-B modeli için DSDC yazılımdan ve SAP2000 programından elde edilen titreşim frekans değerleri gösterilmiştir. Çizelge 3.4’da ise DSDC yazılımından elde edilen X, Y

ve Z eksenlerinde kümülatif modal kütle katılım oranları SAP2000 sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3 : 1B modelinin titreşim frekansları.

Mod Sayısı	DSDC Frekans	SAP2000 Frekans
1	2.2513	2.2513
2	2.7574	2.7574
3	2.8196	2.8192
4	6.7946	6.7945
5	7.0312	7.0312
6	8.3097	8.3091
7	9.2691	9.2691
8	10.8785	10.8781
9	11.6816	11.6816
10	12.7099	12.7096

Çizelge 3.4 : 1B modelinin kümülatif modal kütle katılımları.

Mod Sayısı	DSDC X	SAP2000 X	DSDC Y	SAP2000 Z	DSDC Z	SAP2000 Y
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8680	0.8681
2	0.8420	0.8423	0.0000	0.0000	0.8680	0.8681
3	0.8420	0.8423	0.0000	0.0000	0.8680	0.8681
4	0.8420	0.8423	0.0000	0.0000	0.9760	0.9761
5	0.8420	0.8423	0.0000	0.0000	0.9760	0.9761
6	0.9670	0.9673	0.0000	0.0000	0.9760	0.9761
7	0.9670	0.9673	0.0000	0.0000	1.0000	0.9999
8	0.9670	0.9673	0.0000	0.0000	1.0000	0.9999
9	1.0000	0.9998	0.0000	0.0000	1.0000	0.9999
10	1.0000	0.9998	0.9140	0.9141	1.0000	0.9999
11	1.0000	0.9998	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
12	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
13	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
14	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
15	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
16	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
17	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
18	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
19	1.0000	0.9999	0.9140	0.9141	1.0000	1.0000
20	1.0000	0.9999	0.9890	0.9141	1.0000	1.0000

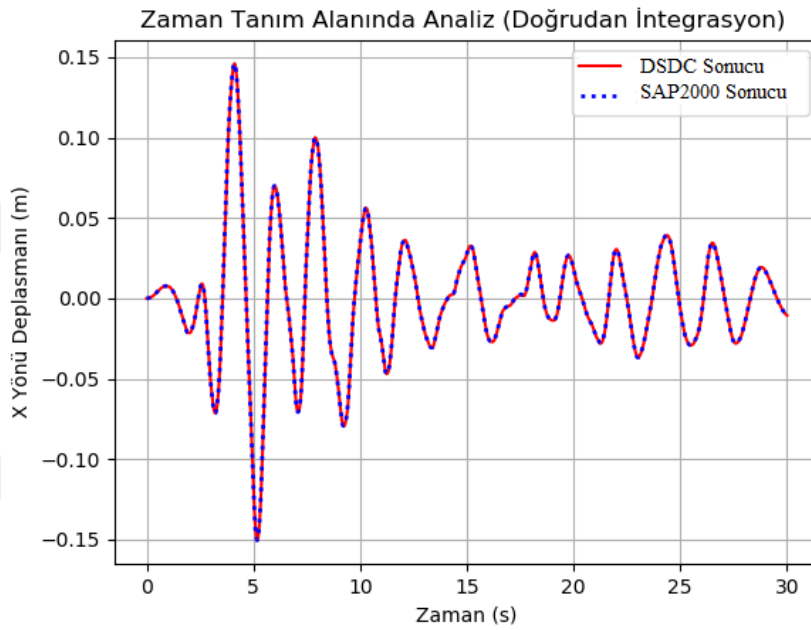
3.2.2 Zaman tanım alanında analiz yöntemlerinin kontrolü

DSDC yazılımı, zaman tanım alanında doğrusal analiz için mod süperpozisyonu, doğrudan integrasyon yöntemi ve mod toplama yöntemi olmak üzere üç farklı yöntemi kullanabilmektedir. Bu yöntemlerin doğruluğunun kontrolü için Şekil 3.2’de gösterilen 1B modeline PEER-GMD yer hareketi veri tabanından alınan RSN1165 kayıt numaralı

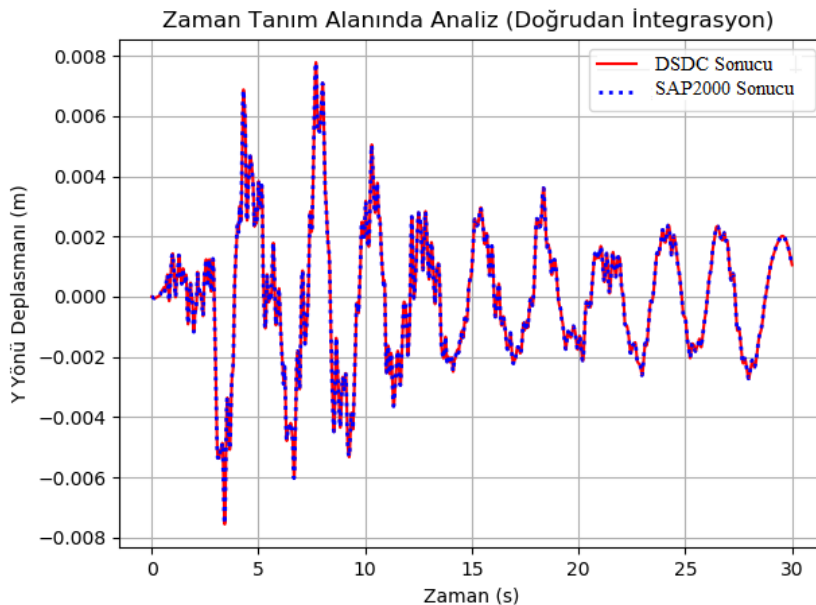
Kocaeli (1999) deprem kaydı uygulanmıştır [15]. Deprem kaydının düşey ve yatay ivme bileşenleri ekler bölümünde Şekil A.1, Şekil A.2 ve Şekil A.3'te gösterilmiştir.

3.2.2.1 Doğrudan integrasyon yönteminin kontrolü

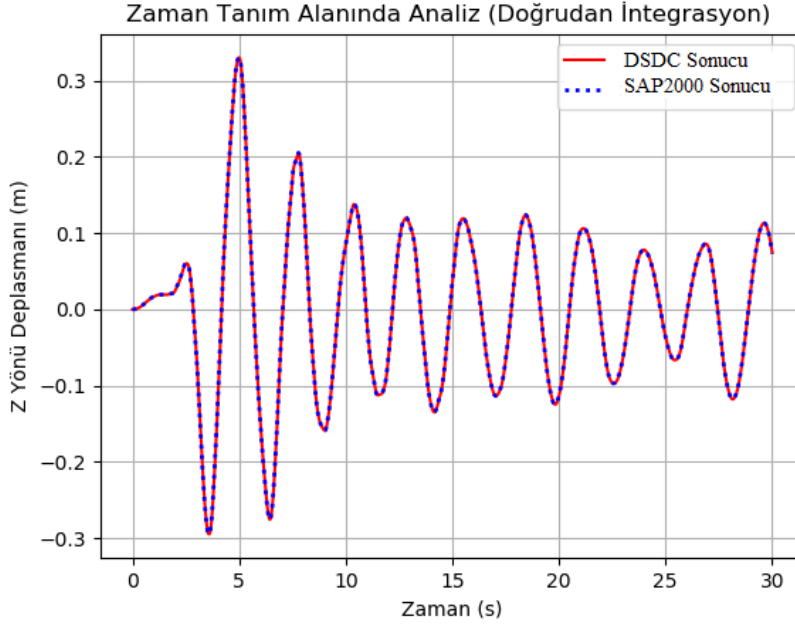
Doğrudan integrasyon yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.3 ile Şekil 3.8 arasında gösterilmiştir. 4 numaralı düğüm noktasının Y eksenini etrafında dönmesi çok küçük olmasından dolayı SAP2000 programı sonuç değeri olarak sıfır vermiştir.



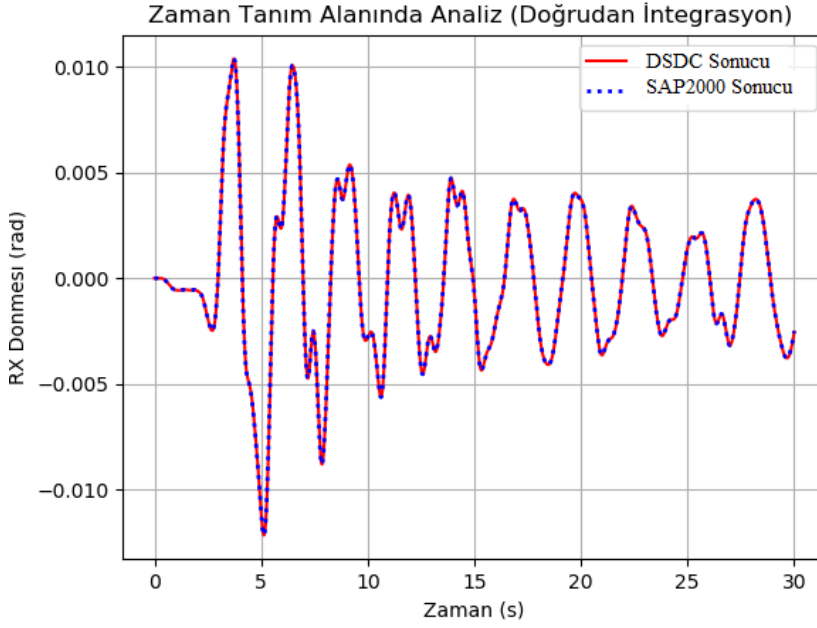
Şekil 3.3 : X ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.



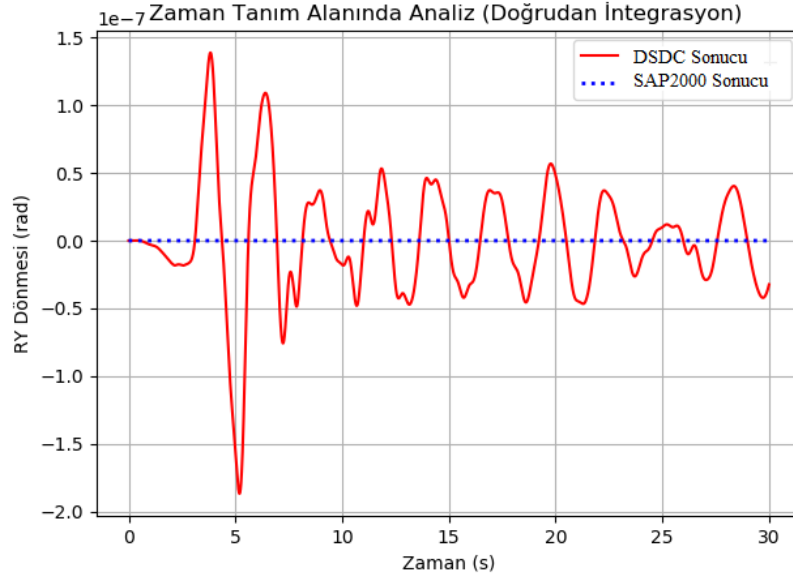
Şekil 3.4 : Y ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.



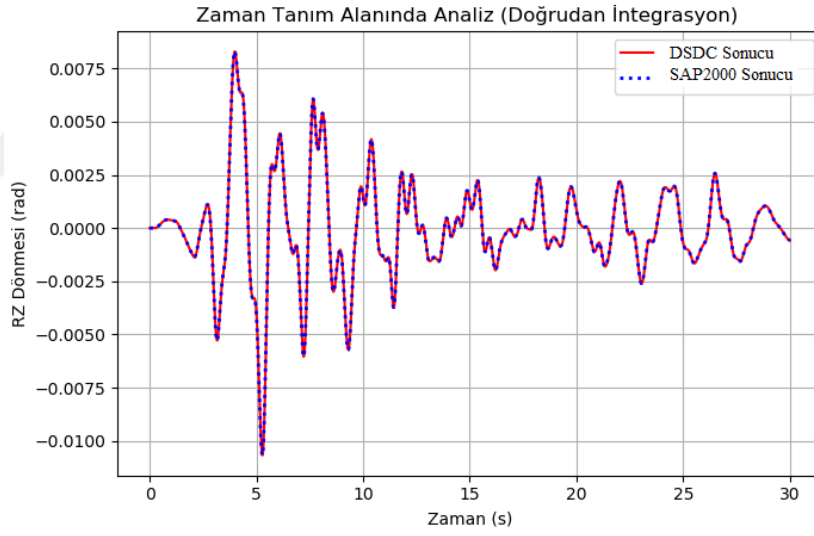
Şekil 3.5 : Z ekseninde yerdeğiştirmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.



Şekil 3.6 : X eksenini etrafında dönmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.



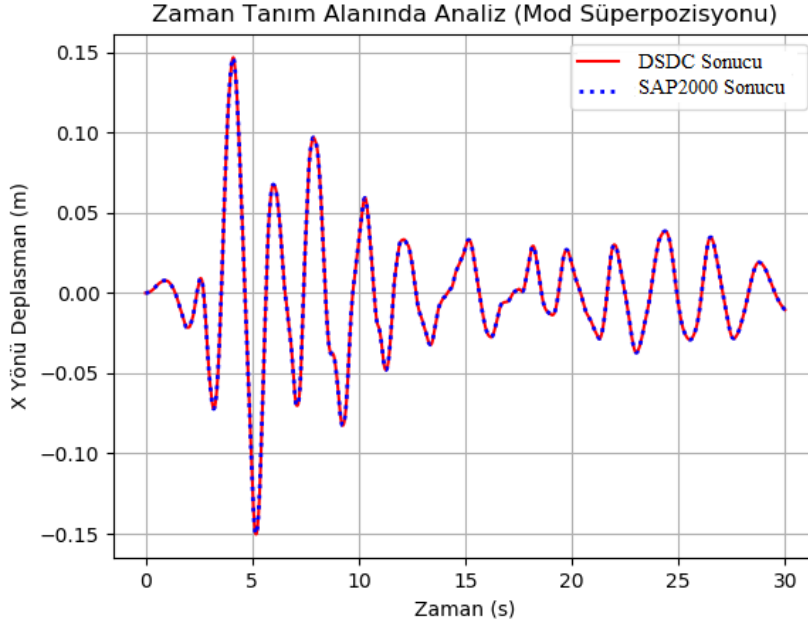
Şekil 3.7 : Y ekseninde dönmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.



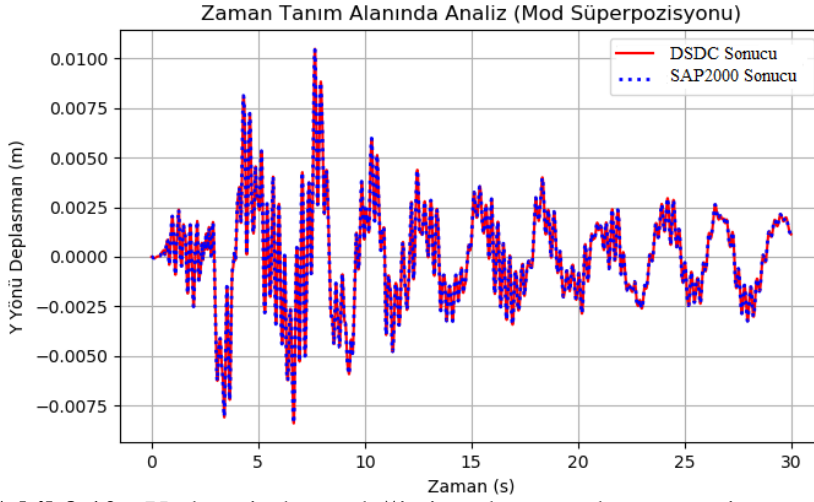
Şekil 3.8 : Z ekseninde dönmeler - doğrudan integrasyon yöntemi.

3.2.2.2 Mod süperpozisyonu yönteminin kontrolü

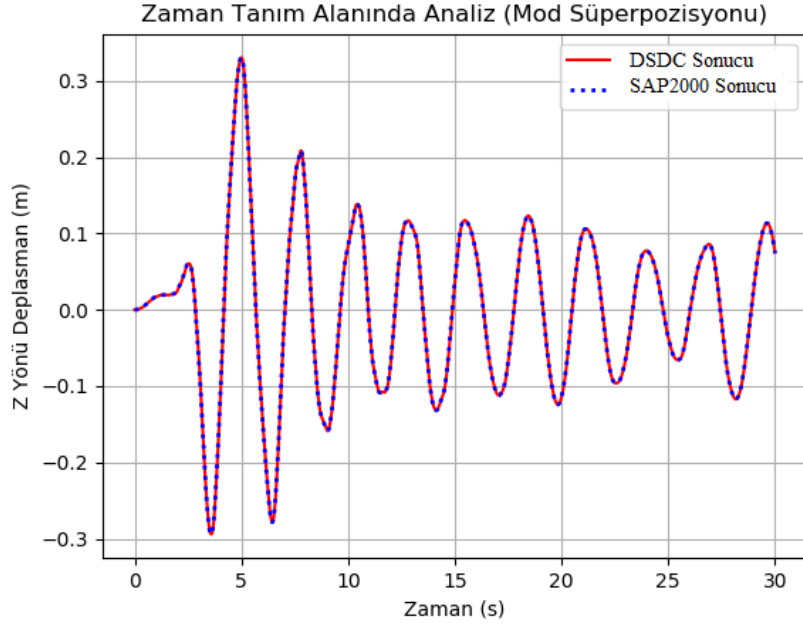
Mod süperpozisyonu yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.9 ile Şekil 3.14 arasında gösterilmiştir. 4 numaralı düğüm noktasının Y ekseninde dönmeleri çok küçük olmasından dolayı SAP2000 programı sonuç değeri olarak sıfır vermiştir.



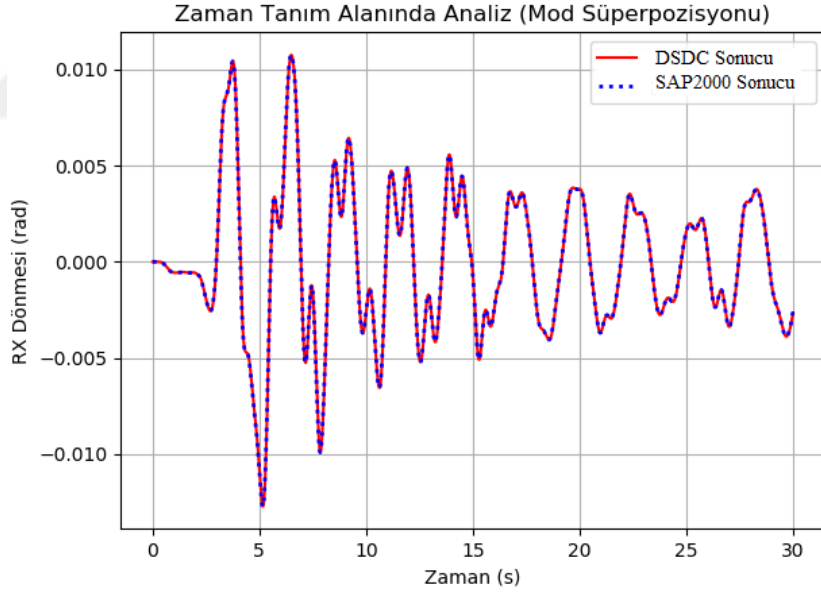
Şekil 3.9 : X ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.



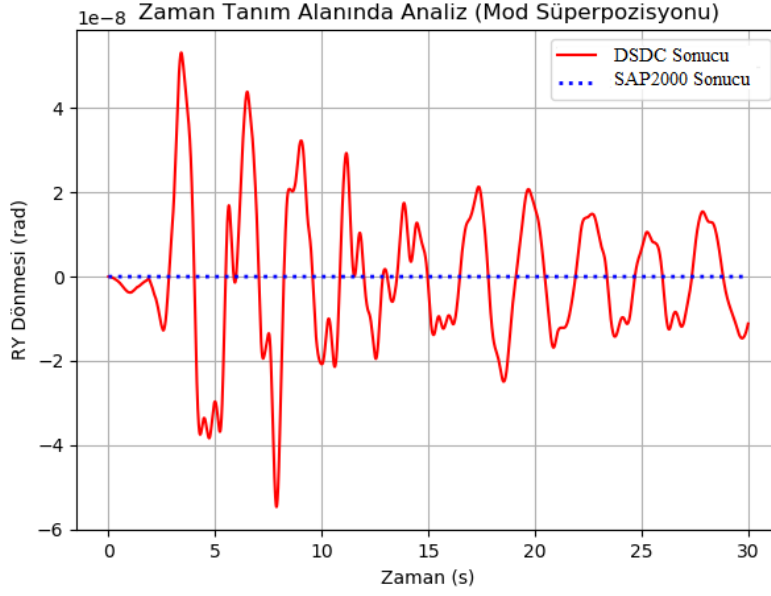
Şekil 3.10 : Y ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.



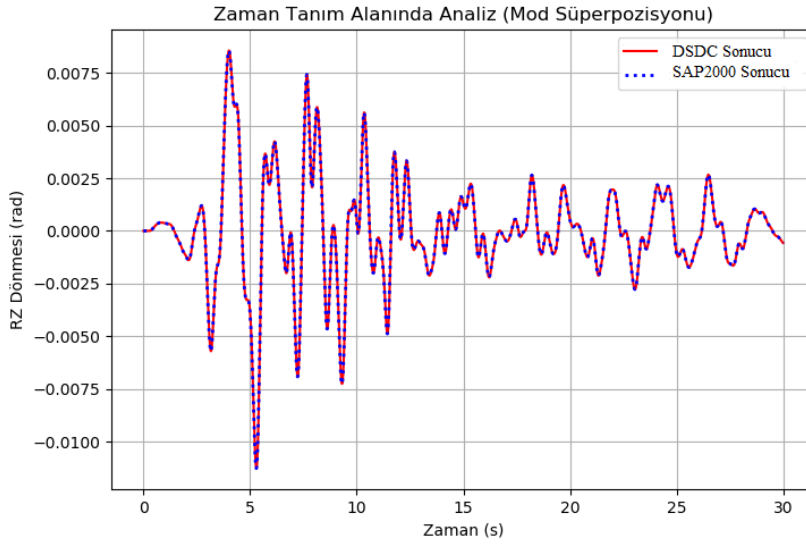
Şekil 3.11 : Z ekseninde yerdeğiştirmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.



Şekil 3.12 : X eksenini etrafında dönmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.



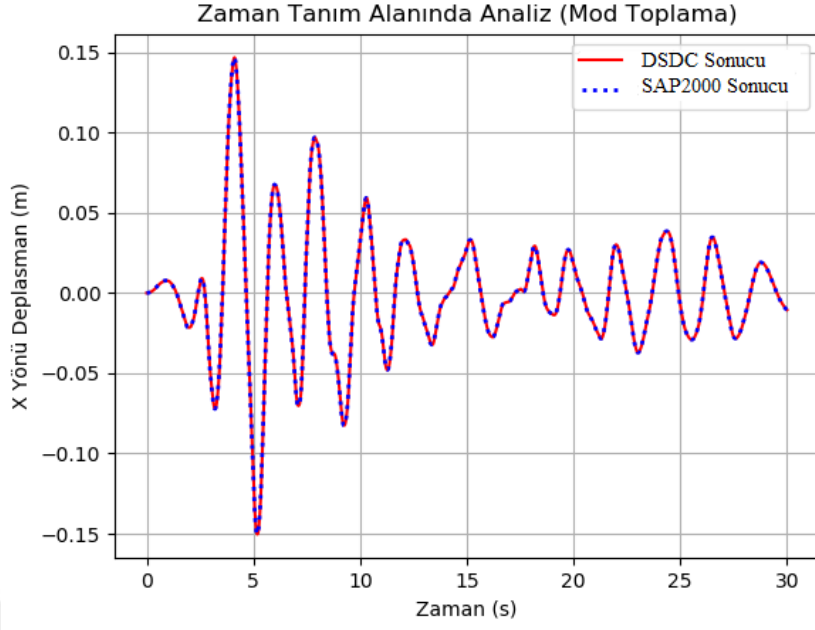
Şekil 3.13 : Y ekseninde dönmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.



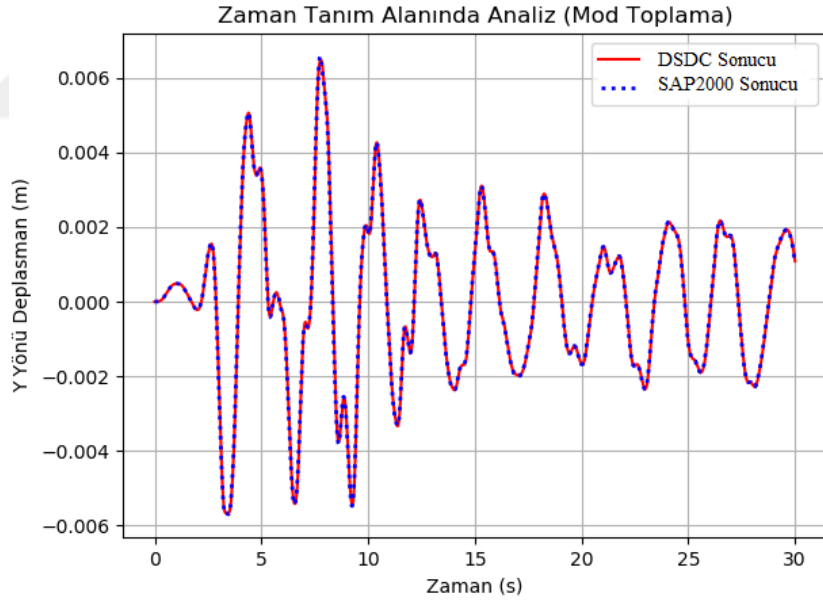
Şekil 3.14 : Z ekseninde dönmeler - mod süperpozisyonu yöntemi.

3.2.2.3 Mod toplama yönteminin kontrolü

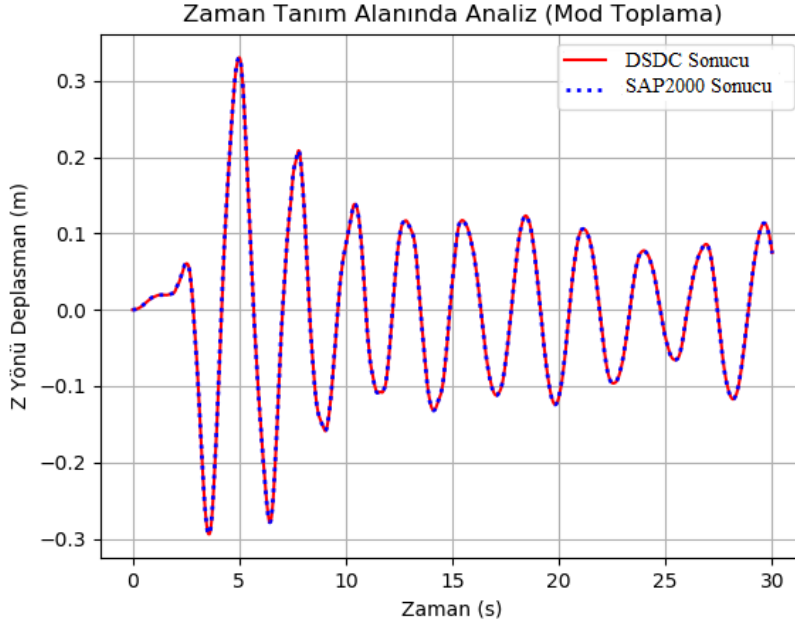
Mod toplama yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.15 ile Şekil 3.20 arasında gösterilmiştir. 4 numaralı düğüm noktasının Y ekseninde dönmeleri çok küçük olduğundan dolayı SAP2000 programı sonuç değeri olarak sıfır vermiştir. Mod toplama yöntemi SAP2000 programında analiz yöntemi olarak bulunmadığı için mod süperpozisyonu çözümündeki düşey deprem etkisi kaldırılarak sonuçlar kontrol edilmiştir.



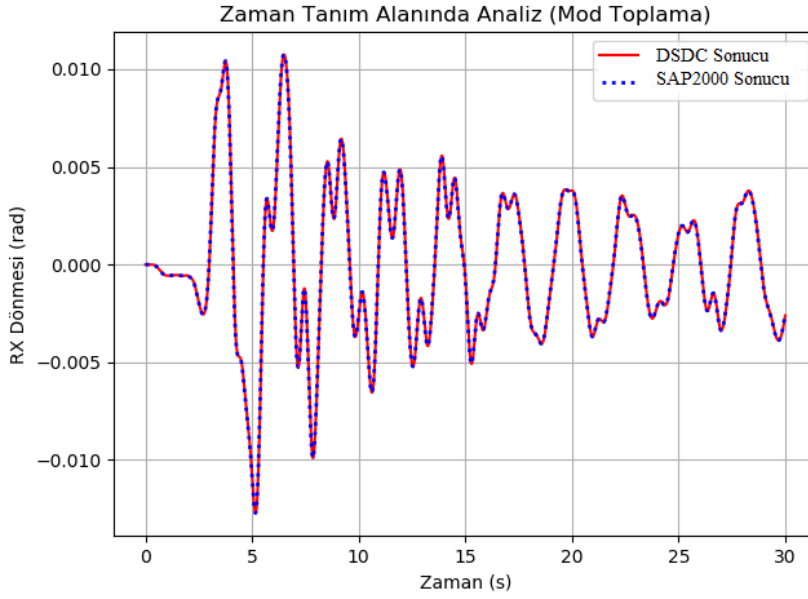
Şekil 3.15 : X ekseninde yerdeğişmeler - mod toplama yöntemi.



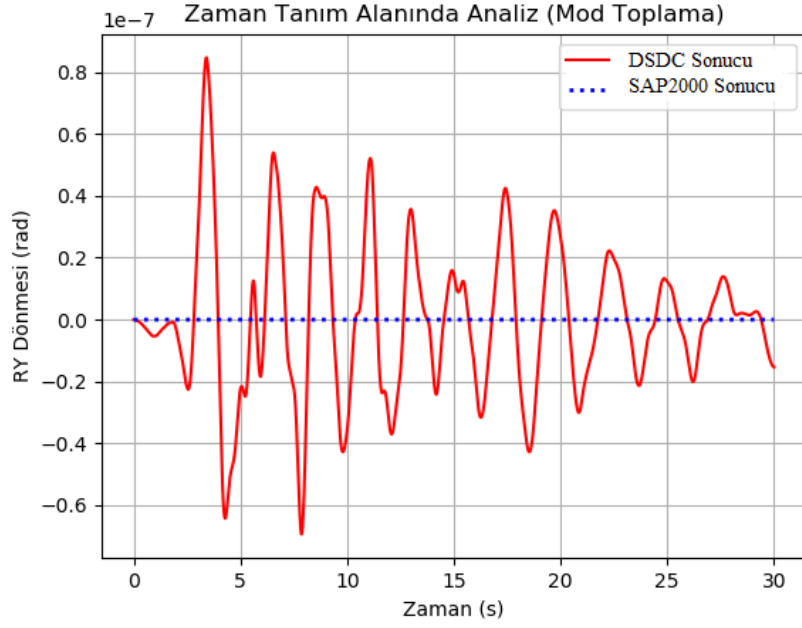
Şekil 3.16 : Y ekseninde yerdeğişmeler - mod toplama yöntemi.



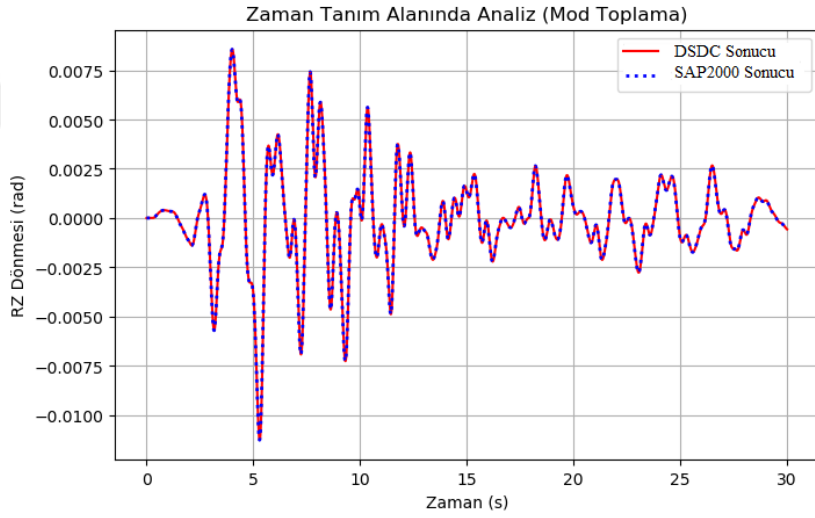
Şekil 3.17 : Z ekseninde yerdeğişmeler - mod toplama yöntemi.



Şekil 3.18 : X ekseninde dönmeler - mod toplama yöntemi.



Şekil 3.19 : Y ekseninde dönmeler - mod toplama yöntemi.



Şekil 3.20 : Z ekseninde dönmeler - mod toplama yöntemi.

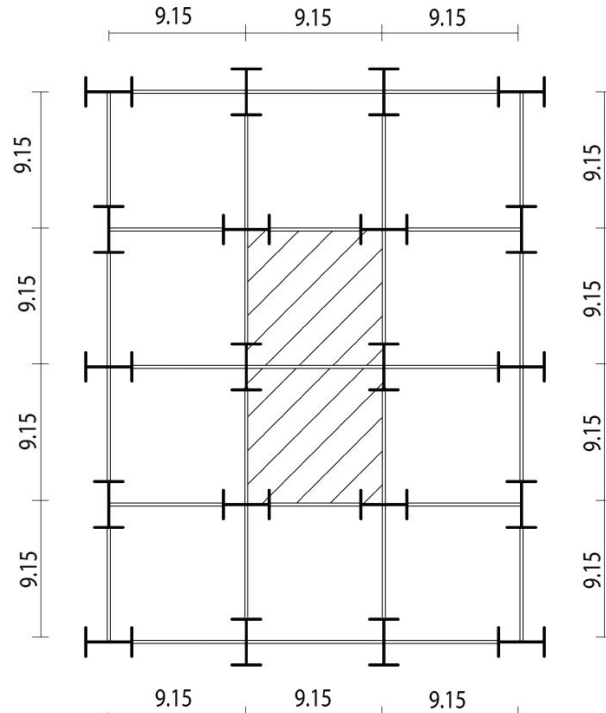


4. DİNAMİK HESAP YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

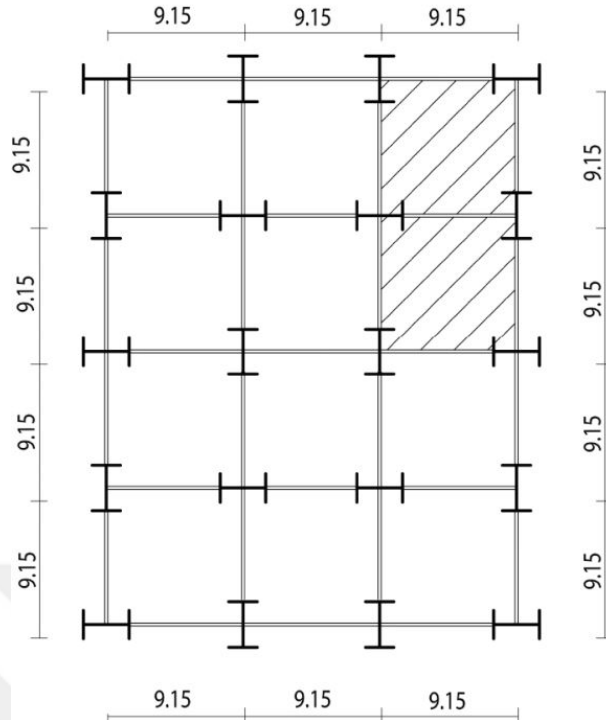
Bu bölümde, doğrulaması yapılmış zaman tanım alanında analiz yöntemleri, eksantrik ve simetrik kuleli yapıların yatay ve düşey deprem yükleri altındaki dinamik davranışlarını ölçmek için kullanılmıştır. Bu hesaplamalar için kullanılan modeller yapılmış bir yüksek lisans tez çalışmasından alınmıştır [16].

4.1 Modeller

Simetrik ve eksantrik kuleli sırasıyla 2A ve 2B olarak adlandırılmış ve Şekil 4.1 ve 4.2'de kolon ve kule yerleşim detayları sunulmuş olan iki model üzerinde çalışılmıştır. Her iki modelde de X doğrultusunda 3, Z doğrultusunda 4 açıklık mevcuttur. Tüm açıklıklar birbirine eşit ve 9.15 metre uzunluğundadır. İlk iki kat olan baza katları ortaktır. Her iki modelde de düzlem içi rijitliğin sağlanması için herhangi bir çapraz eleman kullanılmamıştır. 2A ve 2B yapılarının SAP2000 programında kurulan modelleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'da gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : 2A modeli kolon ve kule yerleşim planı.



Şekil 4.2 : 2B modeli kolon ve kule yerleşim planı.

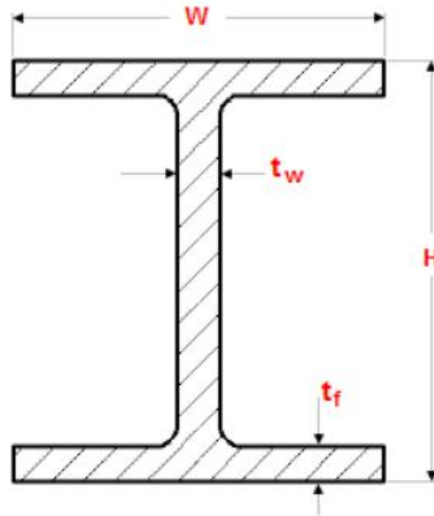
4.1.1 Malzeme özellikleri ve kesitler

2A ve 2B modellerinin hesabında kullanılan malzeme karakteristikleri aşağıdaki gibidir.

Elastisite Modülü (**E**) : 199578.4 MPa

Kayma Modülü (**G**): : 76760.9 MPa

Kullanılan çelik kesitlerle ilgili büyüklükler Şekil 4.3’da gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Tipik kesit.

Modellerde kullanılan kiriş kesitlerinin katlara göre değişimi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kiriş kesit özellikleri.

Kat	H (mm)	W (mm)	t_f	t_w
6	603	230	14	11
5	603	230	14	11
4	680	254	16	11
3	680	254	16	11
2	680	254	16	11
1	680	254	16	11

Modellerde kullanılan kolon kesitlerinin katlara göre değişimi Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kolon kesit özellikleri.

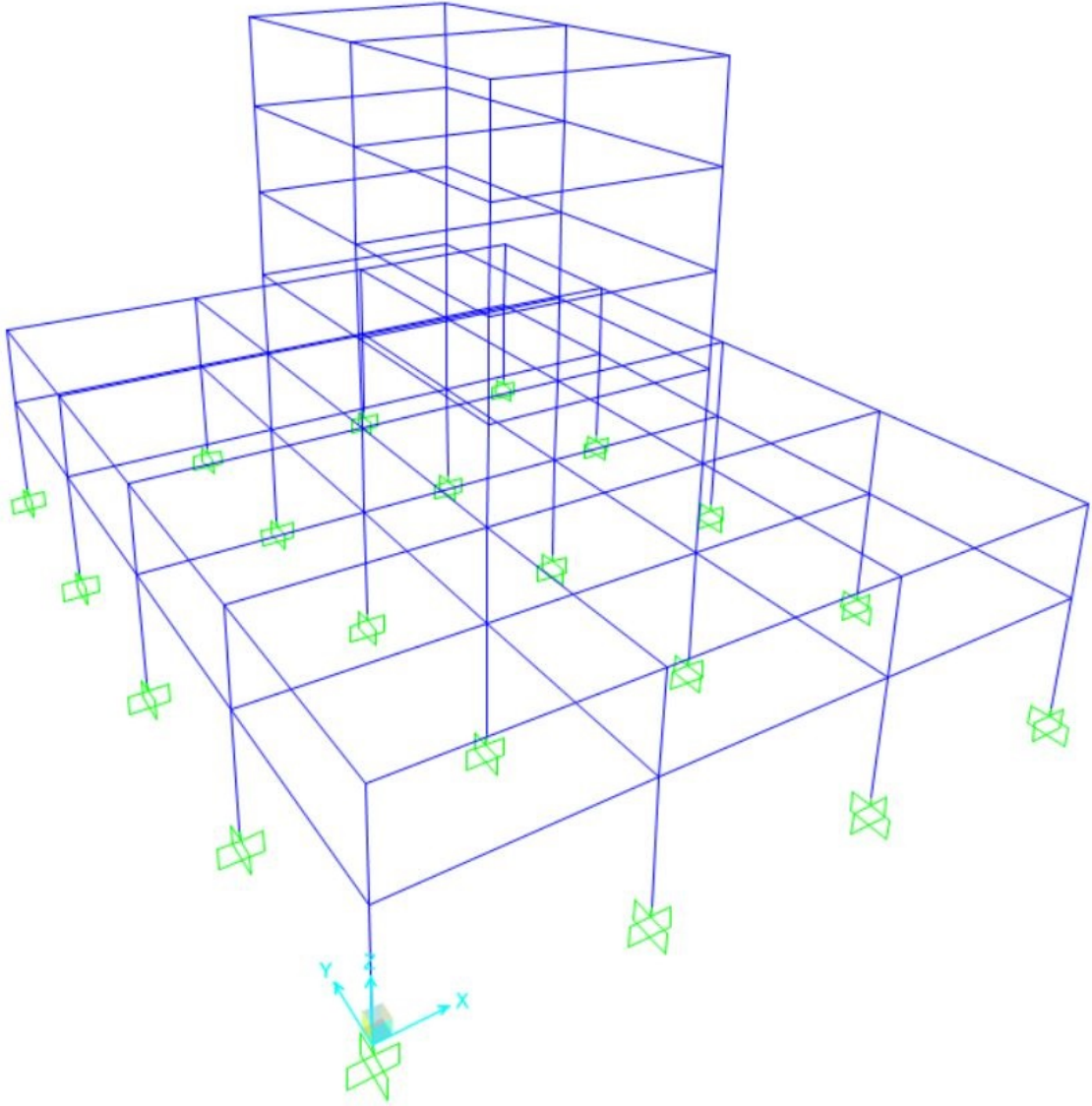
Kat	H (mm)	W (mm)	t_f	t_w
6	410	428	24	14
5	410	428	24	10
4	424	435	32	20
3	424	435	32	20
2	424	435	32	20
1	432	457	36	23

4.1.2 Kat yükseklikleri ve kat yayılı yükleri

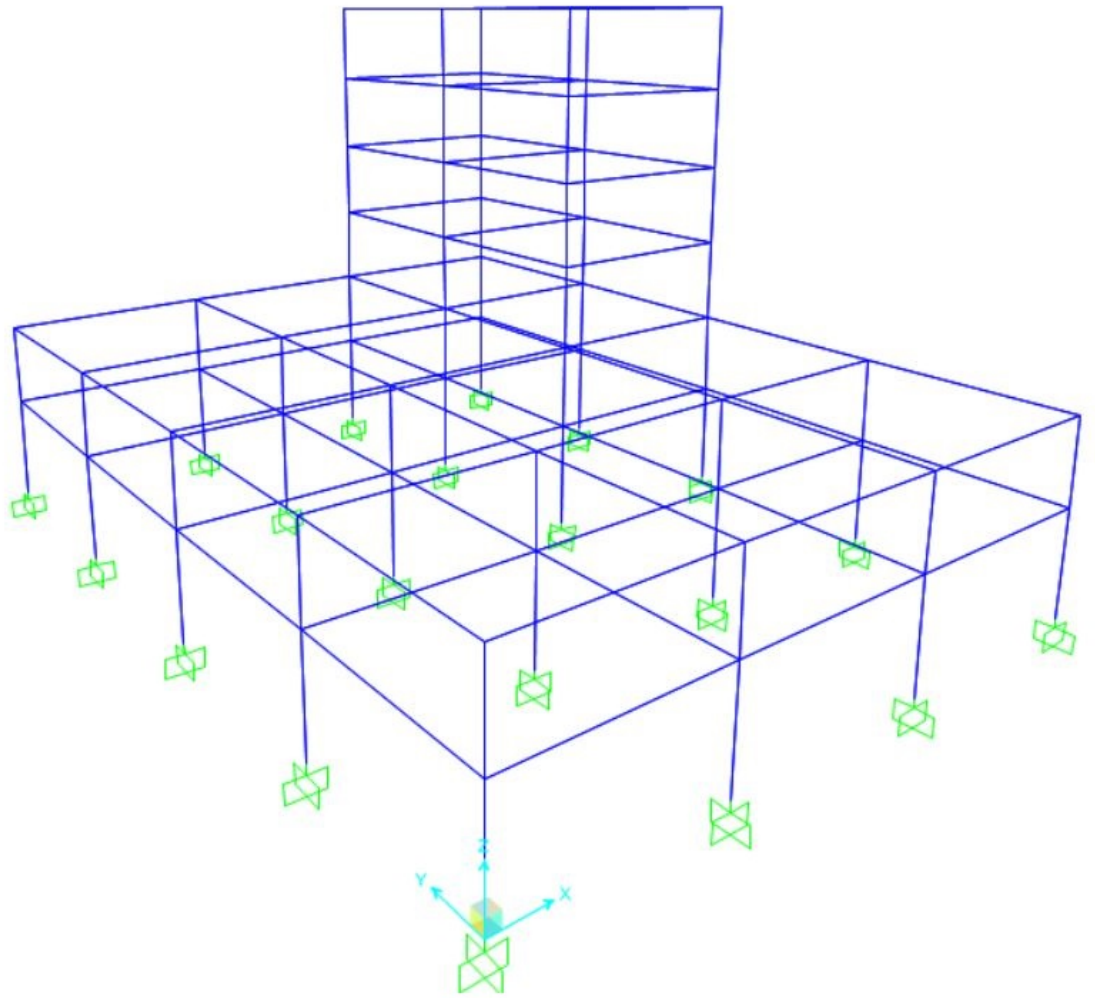
Kat yükseklikleri ve katlara göre yayılı yükler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Tabloda verilen yayılı yük değerleri etki alanları ile orantılı olarak düğüm noktalarına kütle olarak verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Kat yükseklikleri ve kat yayılı yükleri.

Kat	Kat Yüksekliği (m)	Yayılı Yük kN/m^2
6	3.65	5.64
5	3.65	6.88
4	3.65	6.88
3	3.65	6.88
2	3.65	7.57
1	4.57	8.25



Şekil 4.4 : 2A yapısının üç boyutlu modeli.



Şekil 4.5 : 2B yapısının üç boyutlu modeli.

4.2 Analizler

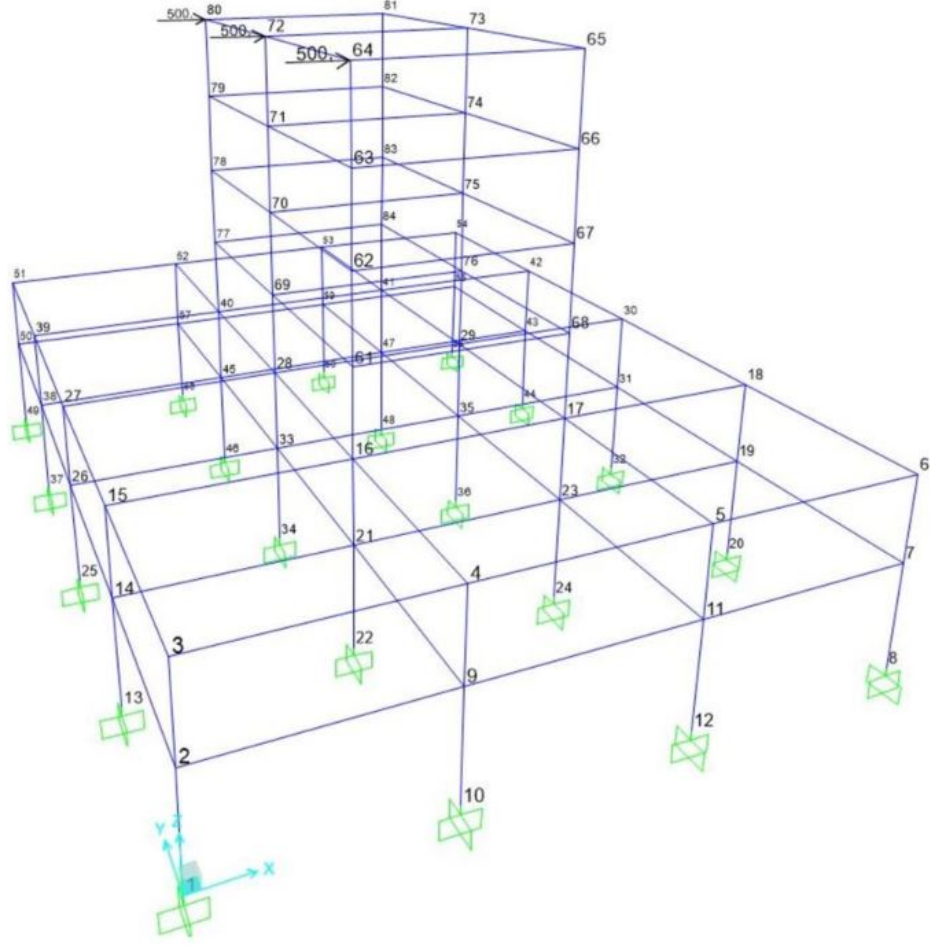
Bölüm 4.1’de malzeme mekanik özellikleri, kolon yerleşim planı, eleman kesitleri, kat yükseklikleri ve kat yayılı yükleri tanımlanan 2A ve 2B yapılarına, öncelikle bölüm 2.2’de açıklanan statik analiz uygulanmış ve oluşan X ve Y yatay yerdeğiştirme değerleri belirlenen bir çerçeve için karşılaştırılmıştır. Daha sonra bölüm 2.3’de açıklanan dinamik analizler gerçekleştirilerek yapının titreşim periyotları ve modal kütle katılım oranları SAP2000’den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Son olarak ise bölüm 2.3.2’de tanımlanan mod süperpozisyonu, bölüm 2.3.3’te tanımlanan doğrudan integrasyon yöntemi ve bölüm 2.3.4’te tanımlanan zaman tanım alanında mod toplama yöntemi kullanılarak iki farklı deprem kaydı ile zaman tanım alanında doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde kullanılan deprem kayıtlarından biri bölüm 3.2.2’de detayları verilen Kocaeli depremi diğeri ise PEER-GMD yer hareketi veri tabanından alınan RSN1100 kayıt numaralı Kobe depremidir. Kobe depreminin yatay ve düşey ivme bileşenleri ekler bölümünde Şekil A.4, Şekil A.5 ve Şekil A.6’da verilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen X, Y, Z eksenlerinde yerdeğiştirme ve dönme değerlerinin SAP2000 programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar için kulenin son katının köşe düğüm noktalarından birisi tercih edilmiştir.

4.2.1 Statik analiz

4.2.1.1 2A yapısı

Statik analiz kapsamında 2A yapısının altıncı katında yer alan üç adet düğüm noktasına Şekil 4.6’daki gibi X ve Şekil 4.7’deki gibi Y yönlerinde 500 kN büyüklüğünde yatay kuvvetler uygulanmıştır. X doğrultusunda uygulanan kuvvetlerin kule kenarındaki bir çerçevede X doğrultusunda oluşturduğu yatay yerdeğiştirme değerleri Çizelge 4.4’te, Z doğrultusunda uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu yatay yerdeğiştirmeler Çizelge 4.5’te karşılaştırılmıştır. Görelî fark değerlerinin bulunduğu tüm çizelgelerde bu değer denklem 4.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

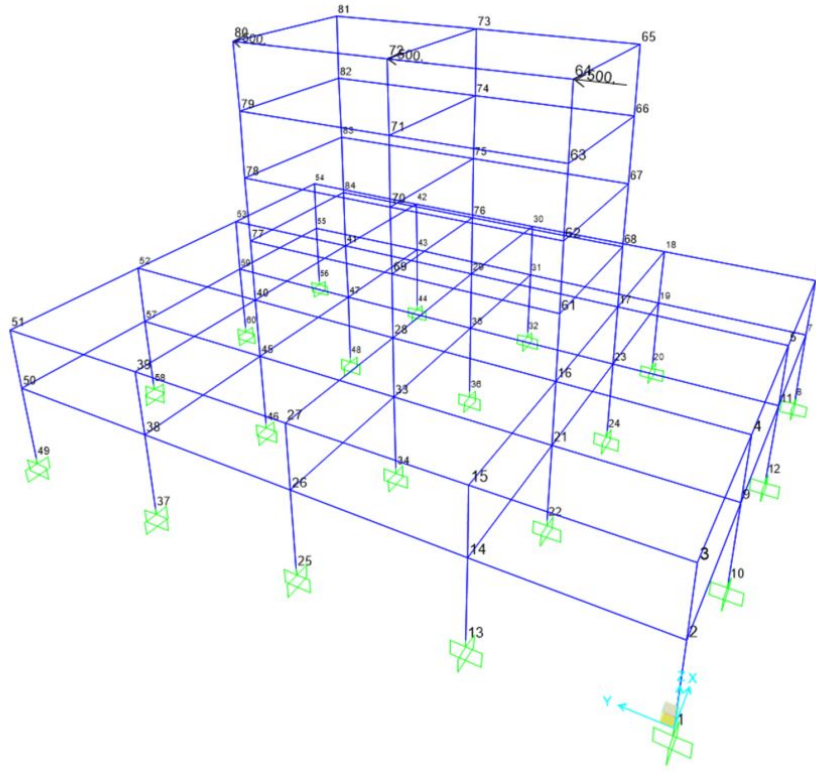
$$\text{Görelî Fark} = \left(\frac{\text{SAP2000 Sonucu} - \text{DSDC Sonucu}}{\text{SAP2000 Sonucu}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$



Şekil 4.6 : 2A yapısı X doğrultusu statik yüklemesi.

Çizelge 4.4 : 2A modelinin X doğrultusu statik yüklemeye sonuçları.

Kat Sayısı	DSDC $U_x(m)$	SAP2000 $U_x(m)$	Görelî Fark (%)
1	0.009581	0.009582	-0.0117
2	0.021714	0.021717	-0.0119
3	0.043491	0.043497	-0.0143
4	0.071811	0.071822	-0.0147
5	0.105562	0.105572	-0.0098
6	0.138631	0.138637	-0.0042



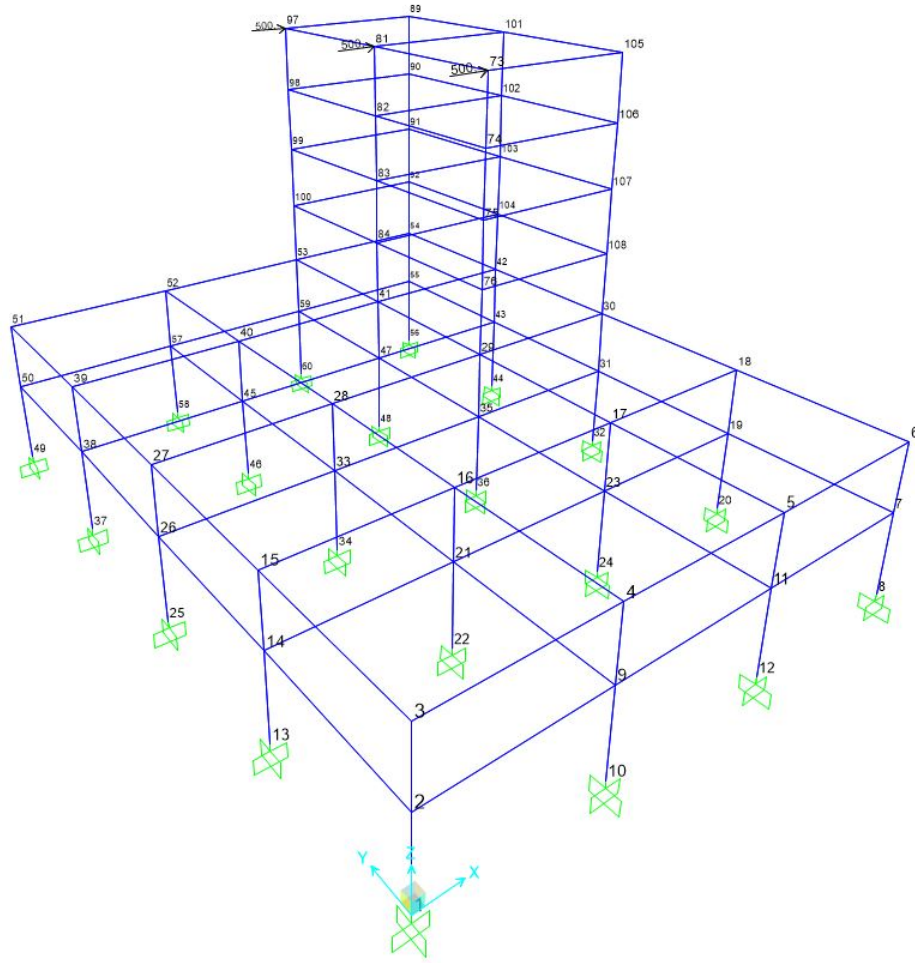
Şekil 4.7 : 2A yapısı Y doğrultusu statik yüklemesi.

Çizelge 4.5 : 2A modelinin Y doğrultusu statik yüklemeye sonuçları.

Kat Sayısı	DSDC $U_z(m)$	SAP2000 $U_y(m)$	Görelî Fark (%)
1	0.020694	0.020693	0.0053
2	0.045887	0.045887	-0.0010
3	0.088209	0.088214	-0.0055
4	0.137887	0.137898	-0.0080
5	0.198190	0.198200	-0.0052
6	0.256993	0.256997	-0.0015

4.2.1.2 2B yapısı

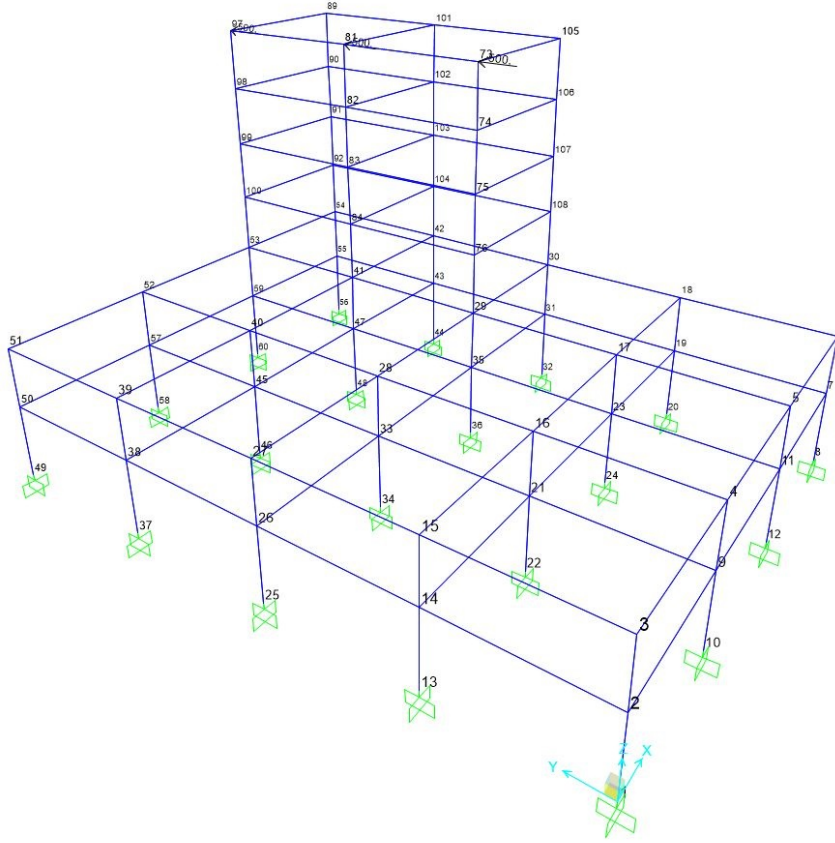
Statik analiz kapsamında 2B yapısının altıncı kat hizasında yer alan üç adet düğüm noktasına Şekil 4.8'deki gibi X ve Şekil 4.9'daki gibi Y yönlerinde 500 kN büyüklüğünde yatay kuvvetler uygulanmıştır. X doğrultusunda uygulanan kuvvetlerin kule kenarındaki bir çerçevede X doğrultusunda oluşturduğu yatay yerdeğiştirme değerleri Çizelge 4.6'da, Z doğrultusunda uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu yatay yerdeğiştirmeler Çizelge 4.7'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.8 : 2B yapısı X doğrultusu statik yüklemesi.

Çizelge 4.6 : 2B modelinin X doğrultusu statik yüklemeye sonuçları.

Kat Sayısı	DSDC $U_x(m)$	SAP2000 $U_x(m)$	Görelî Fark (%)
1	0.010415	0.010415	-0.0024
2	0.024527	0.024528	-0.0046
3	0.051872	0.051875	-0.0067
4	0.084352	0.084360	-0.0091
5	0.122813	0.122821	-0.0065
6	0.160670	0.160672	-0.0011



Şekil 4.9 : 2B yapısı Y doğrultusu statik yüklemesi.

Çizelge 4.7 : 2B modelinin Y doğrultusu statik yükleme sonuçları.

Kat Sayısı	DSDC $U_z(m)$	SAP2000 $U_y(m)$	Görelî Fark (%)
1	0.020732	0.020733	-0.0046
2	0.047845	0.047849	-0.0088
3	0.093239	0.093247	-0.0082
4	0.147255	0.147269	-0.0098
5	0.210899	0.210914	-0.0070
6	0.273825	0.273834	-0.0033

4.2.2 Serbest titreşim analizi

Bu bölümde 2A ve 2B yapı modelleri için DSDC yazılımından alınan ilk 30 periyodunun ve bu periyotlara karşı gelen kümülatif modal kütle katılım oranlarını SAP2000 programından alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modal kütle katılımalarının karşılaştırılması sadece X, Y ve Z eksenlerindeki doğrusal modal katılımlar için yapılmıştır.

4.2.2.1 2A yapısı

2A yapısı için ilk 30 titreşim modunun periyotlarının SAP2000 sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 4.8’de yapılmıştır. Kümülatif modal kütle katılım oranları ise Çizelge 4.9’da gösterilmiştir. Çizelgede düşey doğrultuda modal kütle katılımının sıfır olmasının nedeni, düşey modal kütle katılımlarınının 35. moddan itibaren başlamasıdır.

Çizelge 4.8 : 2A modelinin mod periyotları.

Mod Sayısı	DSDC Periyodu (s)	SAP2000 Periyodu (s)	Görelî Fark (%)
1	1.20063	1.20059	0.00
2	1.02342	1.02737	0.38
3	0.95999	0.96271	0.28
4	0.85217	0.85229	0.01
5	0.83784	0.83780	0.00
6	0.59314	0.59313	0.00
7	0.50504	0.50564	0.12
8	0.49674	0.49729	0.11
9	0.47263	0.47253	-0.02
10	0.47058	0.47043	-0.03
11	0.45681	0.45662	-0.04
12	0.45500	0.45417	-0.18
13	0.45418	0.45333	-0.19
14	0.44254	0.44283	0.07
15	0.34637	0.34638	0.00
16	0.25219	0.25339	0.48
17	0.25081	0.25134	0.21
18	0.21558	0.21558	0.00
19	0.21532	0.21533	0.00
20	0.21154	0.21154	0.00
21	0.18962	0.18976	0.07
22	0.18389	0.18518	0.70
23	0.18328	0.18382	0.29
24	0.16728	0.16729	0.00
25	0.16720	0.16720	0.00
26	0.14731	0.14731	0.00
27	0.14032	0.14032	0.00
28	0.14031	0.14032	0.00
29	0.13812	0.13813	0.01
30	0.13658	0.13575	-0.61

Çizelge 4.9 : 2A modeli doğrusal modal kütle katılımları.

Mod Sayısı	ΣU_x DSDC	ΣU_x SAP2000	ΣU_y DSDC	ΣU_z SAP2000	ΣU_z DSDC	ΣU_y SAP2000
1	0.269	0.269	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.269	0.269	0.000	0.000	0.527	0.526
3	0.269	0.269	0.000	0.000	0.527	0.528
4	0.269	0.269	0.000	0.000	0.527	0.528
5	0.539	0.540	0.000	0.000	0.527	0.528
6	0.643	0.644	0.000	0.000	0.527	0.528
7	0.643	0.644	0.000	0.000	0.715	0.714
8	0.643	0.644	0.000	0.000	0.715	0.714
9	0.645	0.644	0.000	0.000	0.715	0.714
10	0.799	0.812	0.000	0.000	0.715	0.714
11	0.840	0.834	0.000	0.000	0.715	0.714
12	0.840	0.834	0.000	0.000	0.715	0.714
13	0.858	0.848	0.000	0.000	0.933	0.932
14	0.931	0.929	0.000	0.000	0.933	0.932
15	0.939	0.938	0.000	0.000	0.933	0.932
16	0.939	0.938	0.000	0.000	0.952	0.949
17	0.939	0.938	0.000	0.000	0.952	0.952
18	0.939	0.938	0.000	0.000	0.952	0.952
19	0.958	0.956	0.000	0.000	0.952	0.952
20	0.964	0.963	0.000	0.000	0.952	0.952
21	0.964	0.963	0.000	0.000	0.952	0.967
22	0.972	0.971	0.000	0.000	0.976	0.967
23	0.972	0.971	0.000	0.000	0.981	0.981
24	0.972	0.971	0.000	0.000	0.981	0.981
25	0.985	0.984	0.000	0.000	0.981	0.981
26	0.985	0.984	0.000	0.000	0.981	0.981
27	0.985	0.984	0.000	0.000	0.999	0.999
28	0.985	0.984	0.000	0.000	0.999	0.999
29	0.993	0.992	0.000	0.000	0.999	0.999
30	0.993	0.992	0.000	0.000	0.999	0.999

4.2.2.2 2B yapısı

2B yapısının DSDC yazılımı ile hesaplanan ilk 30 titreşim modunun periyotlarının SAP2000 sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 4.10'da yapılmıştır. Kümülatif modal kütle katılım oranları ise Çizelge 4.11'de gösterilmiştir. Çizelgede düşey doğrultuda modal kütle katılımının sıfır olmasının nedeni, düşey modal kütle katılımlarının 37. moddan itibaren başlamasıdır.

Çizelge 4.10 : 2B modelinin mod periyotları.

Mod Sayısı	DSDC Periyodu (s)	SAP2000 Periyodu (s)	Görelî Fark (%)
1	1.147723	1.147684	0.00
2	1.028466	1.028426	0.00
3	0.956207	0.956168	0.00
4	0.89998	0.899958	0.00
5	0.857606	0.857582	0.00
6	0.627332	0.627319	0.00
7	0.598925	0.598909	0.00
8	0.550013	0.550007	0.00
9	0.506474	0.506472	0.00
10	0.504004	0.504001	0.00
11	0.45676	0.45675	0.00
12	0.453786	0.453774	0.00
13	0.407328	0.407324	0.00
14	0.40458	0.404577	0.00
15	0.310071	0.310083	0.00
16	0.253441	0.253454	0.01
17	0.238202	0.238213	0.00
18	0.237931	0.237941	0.00
19	0.223149	0.22316	0.00
20	0.191211	0.191219	0.00
21	0.189363	0.189367	0.00
22	0.183754	0.183756	0.00
23	0.182329	0.182343	0.01
24	0.180269	0.18028	0.01
25	0.157578	0.157589	0.01
26	0.149588	0.149592	0.00
27	0.140316	0.140319	0.00
28	0.138688	0.138695	0.01
29	0.138119	0.138127	0.01
30	0.130959	0.130992	0.03

4.2.3 Zaman tanım alanında analizler

4.2.3.1 2A yapısı

2A yapısı için DSDC yazılımından elde edilen yerdeğiştirme ve dönme değerleri ile SAP2000 programından elde edilen referans değerlerin karşılaştırıldığı grafikler ekler bölümünde sayfa 84 ile 131 arasında yer almaktadır. Bu grafiklerde kullanılan analiz sonuçlarının mutlak maksimum değerlerinin ile SAP2000 sonuçlarının mutlak maksimum değerlerini arasındaki görelî fark Şekil 4.10 'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 : 2B modeli doğrusal modal kütle katılımları.

Mod Sayısı	$\sum U_x$ DSDC	$\sum U_x$ SAP2000	$\sum U_y$ DSDC	$\sum U_z$ SAP2000	$\sum U_z$ DSDC	$\sum U_y$ SAP2000
1	0.293	0.293	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.293	0.293	0.000	0.000	0.399	0.399
3	0.301	0.301	0.000	0.000	0.429	0.429
4	0.374	0.374	0.000	0.000	0.431	0.431
5	0.456	0.457	0.000	0.000	0.431	0.431
6	0.456	0.457	0.000	0.000	0.684	0.684
7	0.647	0.647	0.000	0.000	0.684	0.684
8	0.767	0.767	0.000	0.000	0.684	0.684
9	0.803	0.803	0.000	0.000	0.684	0.684
10	0.803	0.803	0.000	0.000	0.766	0.766
11	0.876	0.877	0.000	0.000	0.778	0.778
12	0.886	0.886	0.000	0.000	0.881	0.881
13	0.886	0.886	0.000	0.000	0.929	0.929
14	0.927	0.927	0.000	0.000	0.929	0.929
15	0.937	0.937	0.000	0.000	0.929	0.929
16	0.937	0.937	0.000	0.000	0.941	0.941
17	0.943	0.943	0.000	0.000	0.942	0.942
18	0.944	0.944	0.000	0.000	0.948	0.948
19	0.949	0.949	0.000	0.000	0.948	0.948
20	0.949	0.949	0.000	0.000	0.970	0.970
21	0.959	0.959	0.000	0.000	0.970	0.970
22	0.976	0.977	0.000	0.000	0.970	0.970
23	0.983	0.983	0.000	0.000	0.970	0.970
24	0.983	0.983	0.000	0.000	0.982	0.983
25	0.985	0.985	0.000	0.000	0.982	0.983
26	0.985	0.985	0.000	0.000	0.987	0.987
27	0.985	0.985	0.000	0.000	0.997	0.997
28	0.991	0.991	0.000	0.000	0.997	0.997
29	0.999	0.999	0.000	0.000	0.997	0.997
30	0.999	0.999	0.000	0.000	0.997	0.997

2A YAPISI ZAMAN TANIM ALANINDA ANALİZ SONUÇLARI									
KOBE DEPREMI					KOCAELİ DEPREMI				
	DSDC Sonucu	SAP2000 Sonucu	Görelî Fark (%)	Süre	DSDC Sonucu	SAP2000 Sonucu	Görelî Fark (%)	Süre	Süre
DSDC: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	X (m)	-0.07418	-0.07421	0.04	20.61	0.08064	0.08037	-0.33	7.345
	Y (m)	-0.00134	-0.00134	0.20	20.60	0.00139	0.00139	0.00	4.835
	Z (m)	-0.08310	-0.08328	0.22	21.77	0.12580	0.12446	-1.07	6.810
SAP2000: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	RX (rad)	-0.00132	-0.00133	0.49	20.30	-0.00187	-0.00186	-0.61	6.845
	RY (rad)	-0.01136	-0.01120	-1.46	21.51	0.00863	0.00857	-0.69	4.230
	RZ (rad)	-0.00161	-0.00161	-0.21	20.61	0.00205	0.00204	-0.26	7.340
DSDC: Mod Süperpozisyonu Yöntemi	X (m)	-0.07379	-0.07375	-0.05	20.61	0.08355	0.08326	-0.34	7.350
	Y (m)	0.00160	0.00162	0.97	21.25	-0.00184	-0.00191	3.86	5.210
	Z (m)	0.08405	0.08499	1.11	20.27	0.12659	0.12532	-1.02	6.815
SAP2000: Mod Süperpozisyonu Yöntemi	RX (rad)	0.00146	0.00146	0.12	19.55	-0.00196	-0.00194	-0.85	6.850
	RY (rad)	-0.01154	-0.01135	-1.63	21.52	0.00887	0.00882	-0.56	4.230
	RZ (rad)	-0.00171	-0.00171	0.11	19.03	0.00216	0.00216	0.17	7.355
DSDC: Mod Toplama Yöntemi	X (m)	-0.07379	-0.07375	-0.05	20.61	0.08355	0.08326	-0.34	7.350
	Y (m)	-0.00129	-0.00129	0.12	20.62	0.00122	0.00122	-0.34	6.830
	Z (m)	0.08404	0.08498	1.11	20.27	0.12660	0.12532	-1.02	6.815
SAP2000: Mod Süperpozisyonu Yöntemi	RX (rad)	0.00147	0.00146	-0.66	19.55	-0.00194	-0.00193	-0.43	6.845
	RY (rad)	-0.01154	-0.01135	-1.63	21.52	0.00887	0.00882	-0.56	4.230
	RZ (rad)	-0.00171	-0.00171	0.11	19.02	0.00216	0.00216	0.17	7.355
DSDC: Mod Toplama Yöntemi	X (m)	-0.07379	-0.07421	0.57	20.60	0.08355	0.08037	-3.95	7.340
	Y (m)	-0.00129	-0.00126	-2.26	20.61	0.00122	0.00117	-4.63	6.830
	Z (m)	0.08404	0.08250	-1.87	21.76	0.12660	0.12446	-1.72	6.805
SAP2000: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	RX (rad)	-0.00140	-0.00133	-5.26	20.30	-0.00194	-0.00186	-4.21	6.845
	RY (rad)	-0.01154	-0.01120	-3.00	21.51	0.00887	0.00857	-3.49	4.225
	RZ (rad)	-0.00168	-0.00161	-4.35	20.61	0.00216	0.00204	-5.70	7.340

Şekil 4.10 : 2A yapısının zaman tanım alanında analiz sonuçları.

4.2.3.2 2B yapısı

2B yapısı için DSDC yazılımından elde edilen yerdeğiştirme ve dönme değerleri ile SAP2000 programından elde edilen referans değerlerin karşılaştırıldığı grafikler ekler bölümünde sayfa 132 ile 167 arasında yer almaktadır. Bu grafiklerde kullanılan analiz sonuçlarının mutlak maksimum değerleri ile SAP2000 sonuçlarının mutlak maksimum değerlerini arasındaki fark Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

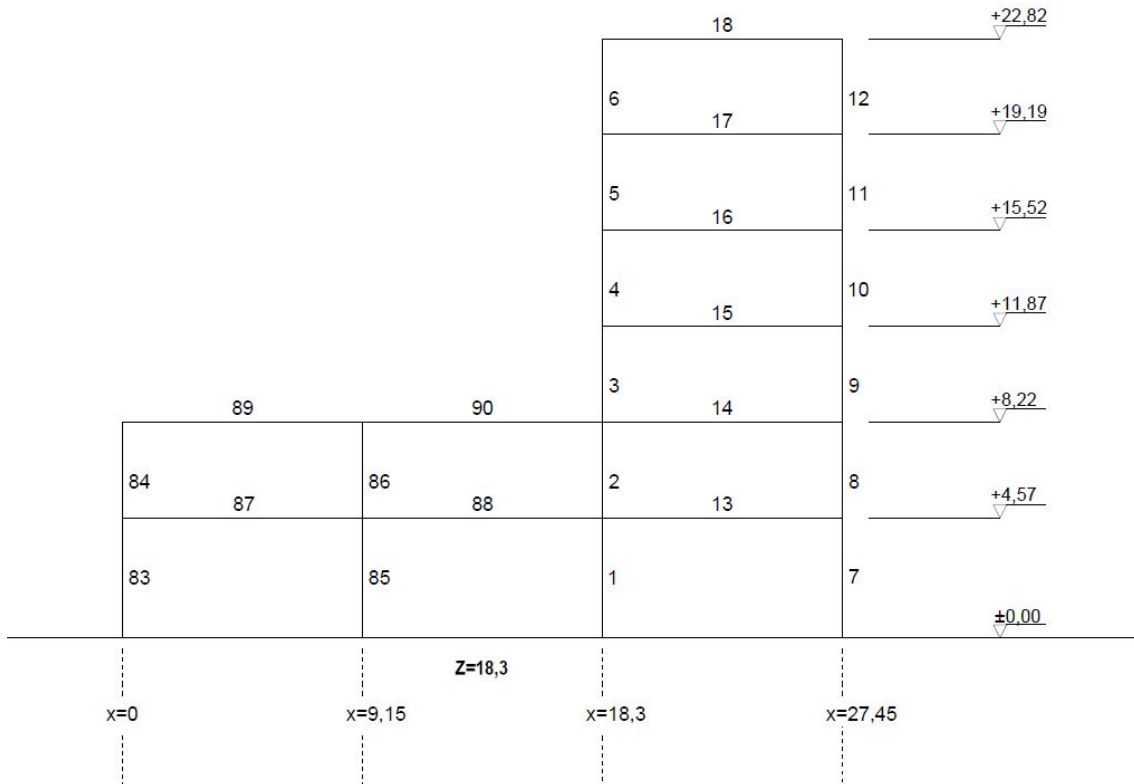


2B YAPISI ZAMAN TANIM ALANINDA ANALİZ SONUÇLARI									
KOBE DEPREMİ					KOCAELİ DEPREMİ				
	DSDC Sonucu	SAP2000 Sonucu	Görelî Fark (%)	Süre	DSDC Sonucu	SAP2000 Sonucu	Görelî Fark (%)	Süre	Süre
DSDC: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	X (m)	0.08926	-0.01	21.27	0.09854	0.09853	-0.01	7.420	7.420
	Y (m)	0.00156	-0.06	21.33	-0.00158	-0.00158	0.01	5.200	5.200
	Z (m)	-0.08786	-0.02	21.78	0.13095	0.13095	0.00	6.825	6.825
SAP2000: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	RX (rad)	-0.00228	-0.16	20.31	-0.00336	-0.00336	0.02	6.850	6.850
	RY (rad)	-0.01037	0.03	21.53	0.01076	0.01076	0.00	7.350	7.350
	RZ (rad)	-0.00142	0.31	21.65	0.00139	0.00139	-0.20	5.440	5.440
DSDC: Mod Süperpozisyonu	X (m)	0.09032	0.15	21.27	0.10053	0.10052	-0.01	7.420	7.420
	Y (m)	0.00199	0.69	21.33	-0.00230	-0.00232	0.86	5.210	5.210
	Z (m)	0.08852	-0.02	20.27	0.13176	0.13181	0.03	6.825	6.825
SAP2000: Mod Süperpozisyonu	RX (rad)	0.00258	-0.81	19.55	-0.00348	-0.00348	-0.04	6.850	6.850
	RY (rad)	-0.01049	0.08	21.53	0.01094	0.01094	0.04	7.345	7.345
	RZ (rad)	-0.00156	-0.51	21.65	0.00155	0.00155	0.08	5.435	5.435
DSDC: Mod Toplama Yöntemi	X (m)	0.09033	0.15	21.27	0.10056	0.10056	0.00	7.420	7.420
	Y (m)	0.00151	0.23	21.32	0.00132	0.00132	0.00	4.855	4.855
	Z (m)	0.08852	-0.03	20.27	0.13175	0.13179	0.03	6.830	6.830
SAP2000: Mod Süperpozisyonu	RX (rad)	0.00258	-0.93	19.55	-0.00346	-0.00347	0.17	6.855	6.855
	RY (rad)	-0.01049	0.09	21.53	0.01094	0.01094	0.04	7.345	7.345
	RZ (rad)	-0.00154	0.01	21.65	0.00151	0.00151	0.09	5.435	5.435
DSDC: Mod Toplama Yöntemi	X (m)	0.09033	-1.20	21.27	0.10056	0.09855	-2.04	7.420	7.420
	Y (m)	0.00151	-5.35	21.32	0.00132	0.00125	-5.65	4.855	4.855
	Z (m)	0.08852	-1.16	21.78	0.13175	0.13095	-0.61	6.830	6.830
SAP2000: Doğrudan İntegrasyon Yöntemi	RX (rad)	0.00238	-3.93	20.30	-0.00346	-0.00336	-3.09	6.855	6.855
	RY (rad)	-0.01049	-1.17	21.52	0.01094	0.01076	-1.64	7.345	7.345
	RZ (rad)	-0.00154	-9.21	21.65	0.00151	0.00140	-7.76	5.435	5.435

Şekil 4.11 : 2A yapısının zaman tanım alanında analiz sonuçları.

4.2.3.3 Eleman iç kuvvetleri

Eleman iç kuvvetlerinin kontrolü için eksantrik kuleli model olan 2B seçilmiştir. Bu yapının $Z = 18.3$ aksından çıkartılan çerçeve Şekil 4.12’de gösterildiği gibidir. DSDC yazılımı ile Kocaeli depremi sırasında elemanlarda oluşan iç kuvvetler hesaplanmış ve SAP2000 programından alınan kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan değerler oldukça yakın olduğu için aradaki farkların daha net anlaşılması için DSDC sonuçları ile SAP2000 sonuçlarının farkları da grafik olarak eklenmiştir. Şekil 4.12’de 4 numara ile gösterilen kolon ve 16 numara ile gösterilen kiriş elemanlarının iç kuvvetleri doğrudan integrasyon yöntemiyle, 3 numaralı kolon ve 14 numaralı kiriş elemanlarının iç kuvvetleri mod süperpozisyonu yöntemiyle, 8 ve 12 numaralı kolonlar ile 88 ve 90 numaralı kirişlerin iç kuvvetleri ise mod toplama yöntemiyle hesaplanmıştır.



Şekil 4.12 : 2B modeli Z=18.3 kesiti.

Çubuk elemanların DSDC yazılımı ile hesaplanan iç kuvvetleri ile SAP2000 sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikler;

4 numaralı kolonun sonuçları sayfa 182 - 185,

16 numaralı kirişin sonuçları sayfa 186 - 189,

3 numaralı kolonun sonuçları sayfa 190 - 193,

14 numaralı kirişin sonuçları sayfa 194 - 197,

8 numaralı kolonun sonuçları sayfa 198 - 201,

12 numaralı kolonun sonuçları sayfa 202 - 205,

88 numaralı kirişin sonuçları sayfa 206 - 209,

90 numaralı kirişin sonuçları sayfa 210 - 213 arasında yer almaktadır.

4.3 Sonuçlar ve Öneriler

4.3.1 Sonuçlar

Üç boyutlu yapı sistemlerinin elastik durum için statik ve dinamik analizlerini yapabilen DSDC yazılımı geliştirilmiştir. Söz konusu yazılımın doğrulanmasına yönelik olarak seçilmiş olan bazı örnekler üzerinde uygulamada yaygın olarak kullanılan SAP2000 programı ile karşılaştırmalar yapılmıştır. DSDC yazılımının hem statik hem de dinamik analizler için ürettiği sonuçların SAP2000 programı ile çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Seçilmiş olan üç boyutlu 2A ve 2B için her iki yatay doğrultuda uygulanan statik yükler için DSDC yazılımı ile yapılan analizlerde elde edilen değerler ile SAP2000 programı arasında oluşan en büyük görelî fark miktarı %0.01'dir.

Titreşim periyotları için en büyük görelî fark değeri 2A modelinin kütle katılım oranı oldukça düşük olan 22. modunda %0.7 olarak ortaya çıkmaktadır. Modal hesaplamalarda oluşan bu görelî farklar, SAP2000 programının özdeğer - özvektör analizi için kullandığı hesap motoru ile *NumPy* kütüphanesinde hazır olarak bulunan ve özdeğer - özvektör analizi için kullanılan fonksiyondan kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra sayısal büyüklüğü 10^{-5} 'ten küçük olan değerlerde DSDC yazılımı ile SAP2000 arasında farklılıklar oluşmaktadır. Ancak bu kadar küçük değerler modal kütle katılımlarının çok düşük olduğu modlarda ortaya çıkmaktadır ve nihai hesap sonuçlarda %1-2 mertebesinde görelî fark oluşturmaktadır.

Zaman tanım alanında analizler arasındaki görelî farklar incelendiğinde her iki model için de DSDC yazılımı ile SAP2000 programının sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmektedir. Özellikle mod süperpozisyonu ve doğrudan integrasyon yöntemi için DSDC yazılımı ile hesaplanan yerdeğiştirme ve dönme değerleri SAP2000 sonuçlarına oldukça benzerdir. Şekil 4.10 ve 4.11’de de görüleceği gibi görelî fark oranı oldukça az olmakla birlikte %5 mertebesinde üzerinde görelî fark bulunan tüm değerler ihmal edilebilecek seviyede küçük olan değerlerdir. Örneğin 2A modelinde mod süperpozisyonu yöntemi ile Kocaeli depremi uyguladığında düşey doğrultuda %4 oranında bir görelî fark oluşmaktadır. Ancak bu fark 0.07 mm gibi oldukça küçük bir yerdeğiştirmeye karşı geldiği için ihmal edilebilir bir büyüklüktür.

TBDY (2018)’de yer alan hesap yöntemlerinden biri olan zaman tanım alanında mod toplama yönteminin sonuçlarının kontrolü için ise SAP2000 programında mod süperpozisyonu ve doğrudan integrasyon yöntemleri ile sadece yatay deprem etkileri hesaba katılarak analizler gerçekleştirilmiş ve buradan elde edilen sonuçlarla görelî farklar hesaplanmıştır. Hem 2A hem de 2B modeli için mod toplama yönteminin sonuçları, doğrudan integrasyon yöntemine göre mod süperpozisyonu yöntemi ile daha uyumlu çıkmıştır.

Elemanlarda oluşan iç kuvvetler ve görelî farkları incelendiğinde, oluşan görelî farkların elemanların maruz kaldıkları iç kuvvetlerle orantılandığında %5 mertebesinde kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak DSDC yazılımının sonuçlarının tutarlılığı, simetrik ve eksantrik kuleli gerçek yapılar üzerinde yapılan analizler ile kanıtlanmıştır.

4.3.2 Öneriler

4.3.2.1 Veri girişi

DSDC yazılımında, veri girişi için Excel programı kullanılmaktadır. Bu sayede benzer verilerin kopyalanmasını ve girilen verilerin kontrolü ve düzenlenmesi kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ancak hesabı yapılmak istenen yapı modeli karmaşıklaştıka verilerin girilmesi işlemi zorlaşmaktadır. Bunun yanı sıra oluşturulan modellerdeki elemanların kesit, malzeme ve koordinat özelliklerinin kontrolü için üç boyutlu bir yapı modeli olmamasından dolayı meydana gelebilecek hataların fark edilmesi ve düzeltilmesi zaman almaktadır. DSDC yazılımının daha kullanıcı dostu

olması ve üç boyutlu uzay üzerinde model çizimi ile verilerin alınmasını sağlamak için FreeCAD programı tercih edilebilir [17]. FreeCAD programı üç boyutlu çizimler yapmaya müsait ve açık kaynaklı olmasının yanında kendi içerisinde Python konsolu bulundurması dolayısı ile geliştirilen yazılım ile etkileşimli olarak çalışabilecektir.

4.3.2.2 - Analiz süreleri

DSDC yazılımı gerçekleştirdiği tüm analiz işlemleri sırasında matris elemanları kare matris formatında kullanılmasından dolayı SAP2000 programı ile kıyaslandığında gerçekleştirilen analizler daha uzun sürmektedir. DSDC yazılımının daha hızlı çalışması amacıyla kare matrislerin bant matrise dönüştürülmesi etkili bir çözüm olacaktır. Bunun yanında rijit diyafram kullanılması ve dinamik matris kullanımı da hesap süresini kısaltacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L.** (1995). *Python tutorial*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands.
- [2] **TBDY (2018)**. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı: Ankara.
- [3] **SAP2000 (Version 18.2.0)** [Bilgisayar Yazılımı]. Integrated software for structural analysis and design program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- [4] **Liu, M., & Gorman, D. G.** (1995). Formulation of Rayleigh damping and its extensions. *Computers & structures*, 57(2), 277-285.
- [5] **Newmark, N. M.** (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 85(3), 67-94.
- [6] **Kassimali, A.** (2011). *Matrix Analysis of Structures ,Second Edition*, Cengage Learning.
- [7] **Celep, Z.** (2014). *Yapı Dinamiği, Beşinci Baskı*, Beta Basım Yayım.
- [8] **Chopra, A. K.** (2013). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, Fourth Edition*, Pearson Education.
- [9] **Clough, R. W., & Penzien, J.** (2010). *Dynamics of Structures, Second Edition*, Computers and Structures Inc.
- [10] **Oliphant, T. E.** (2006). A guide to NumPy (Vol. 1). Trelgol Publishing USA.
- [11] **Hunter, J. D.** (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- [12] **Gazoni, E., Clark, C.,** *A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files*, <<https://openpyxl.readthedocs.io/en/stable>>
- [13] **Excel (2016)** [Bilgisayar Yazılımı], Microsoft Office, Redmond, Washington, USA
- [14] **McNamara, J.** Creating Excel files with Python and XlsxWriter. <<https://xlsxwriter.readthedocs.io/>>
- [15] **PEER-GMD.** (2016). PEER Ground Motion Database. Retrieved from <http://ngawest2.berkeley.edu/>
- [16] **Yüksel, E.** (1990). *Eksantrik Kuleli Yapıların Dinamik Yükler Altındaki Davranışı*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **FreeCAD.**, < <https://www.freecadweb.org> >



EKLER

EK A : Deprem Kayıtları

EK B : Zaman Tanım Alanında Yerdeşiştirmeler ve Dönmeler

EK C : Zaman Tanım Alanında İçsel Kuvvetleri

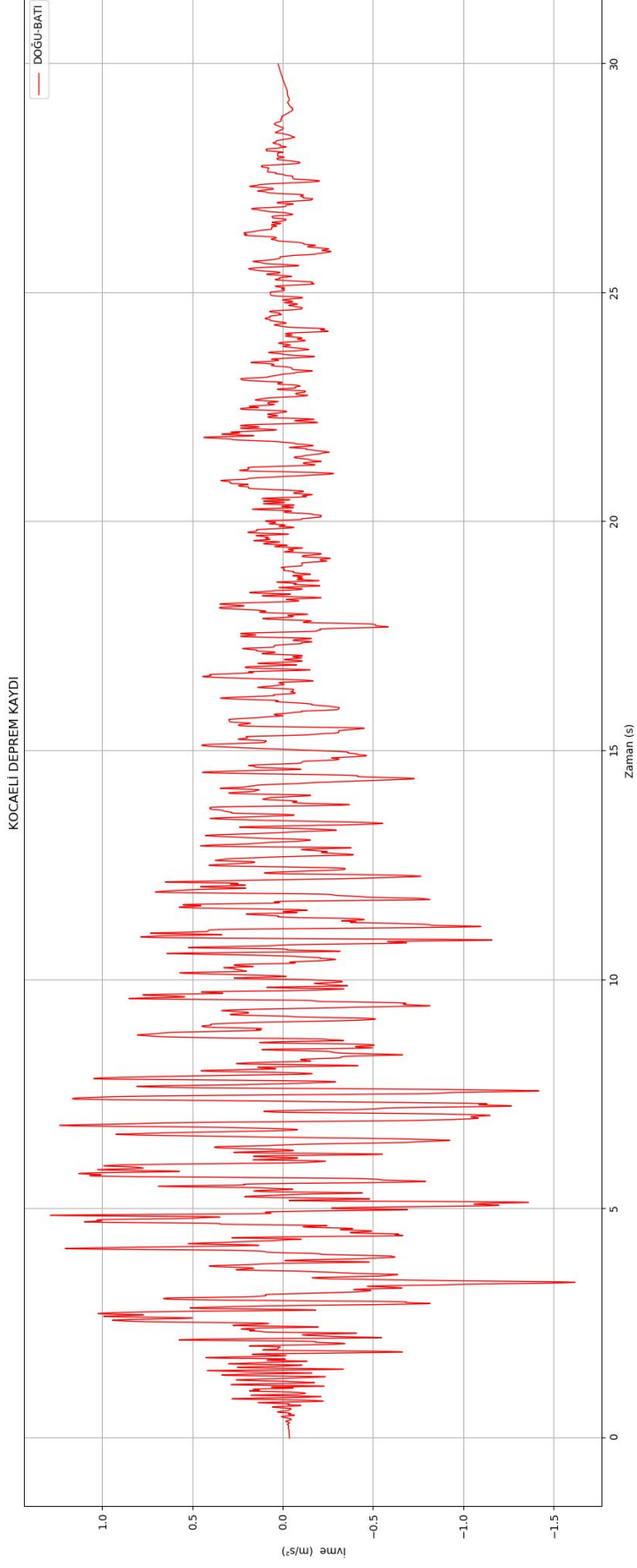
EK D : DSDC Yazılımı CD'si



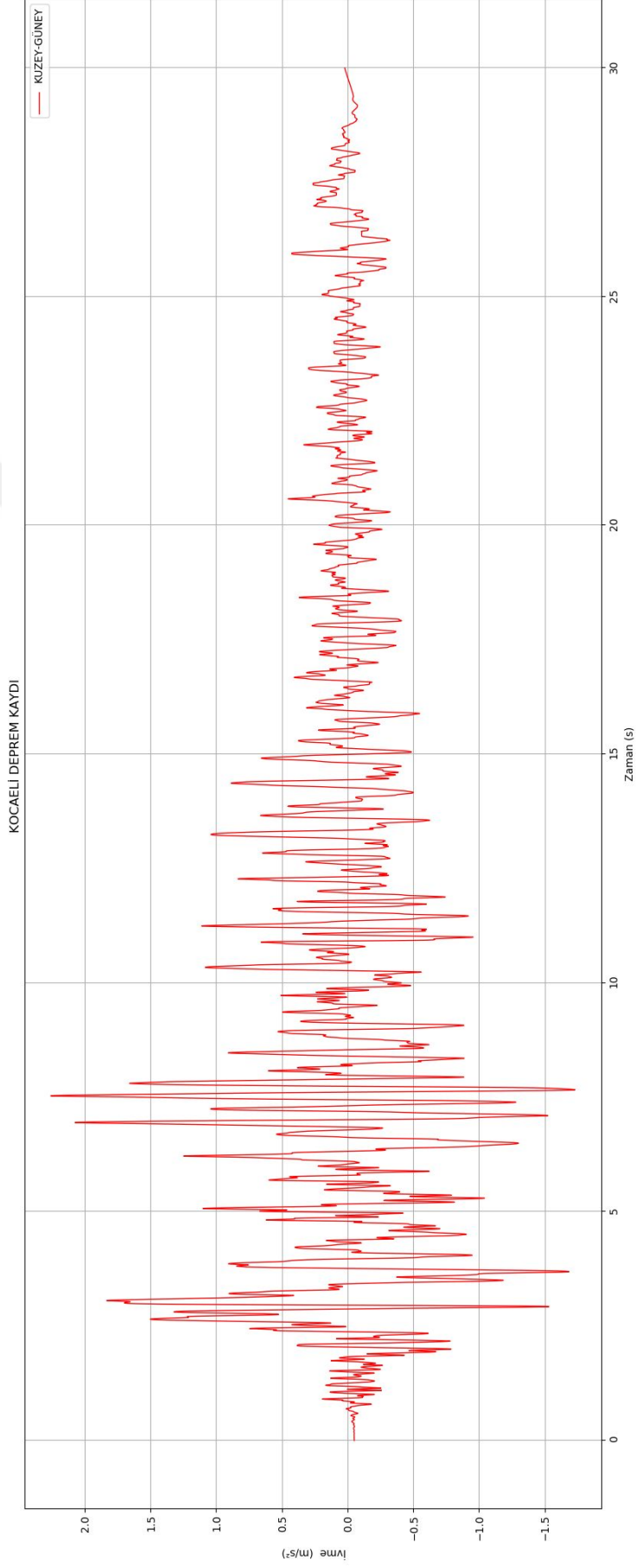


EK A: Deprem Kayıtları

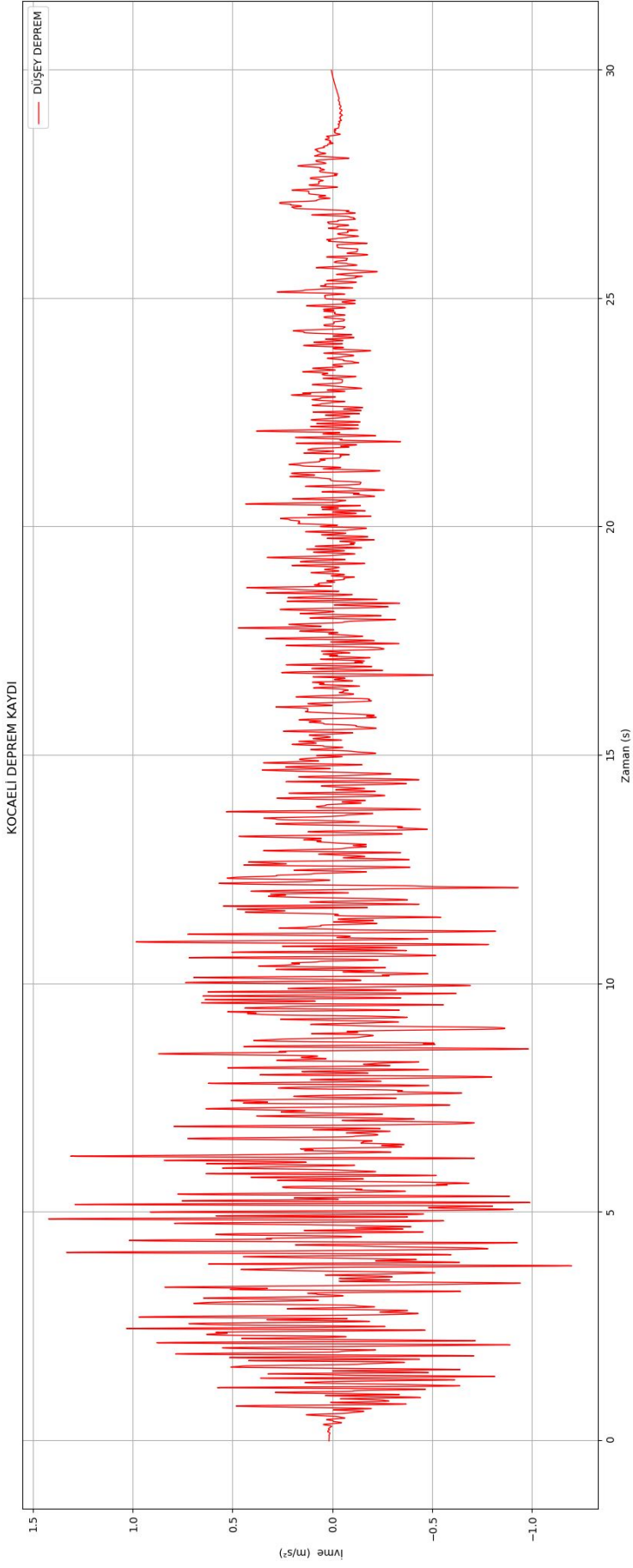




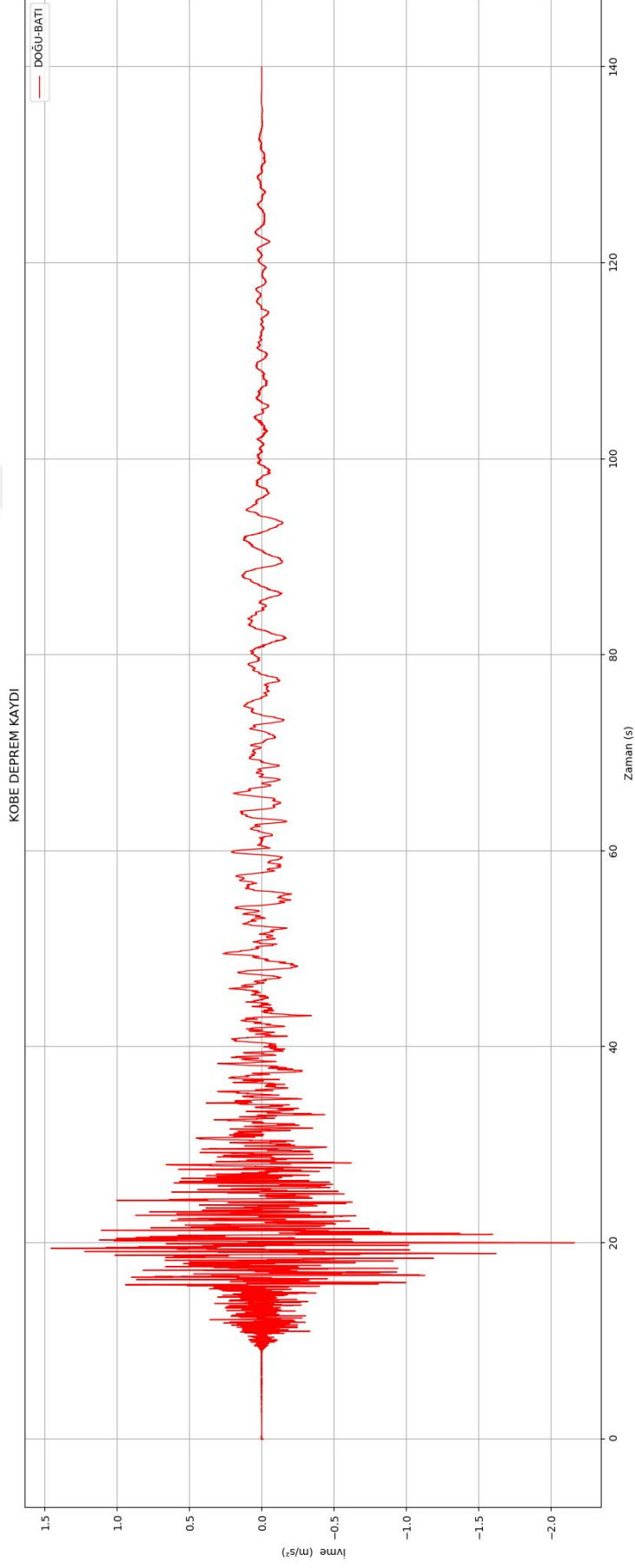
Şekil A.1 : Kocaeli depremi doğu-batı yönü ivme kaydı.



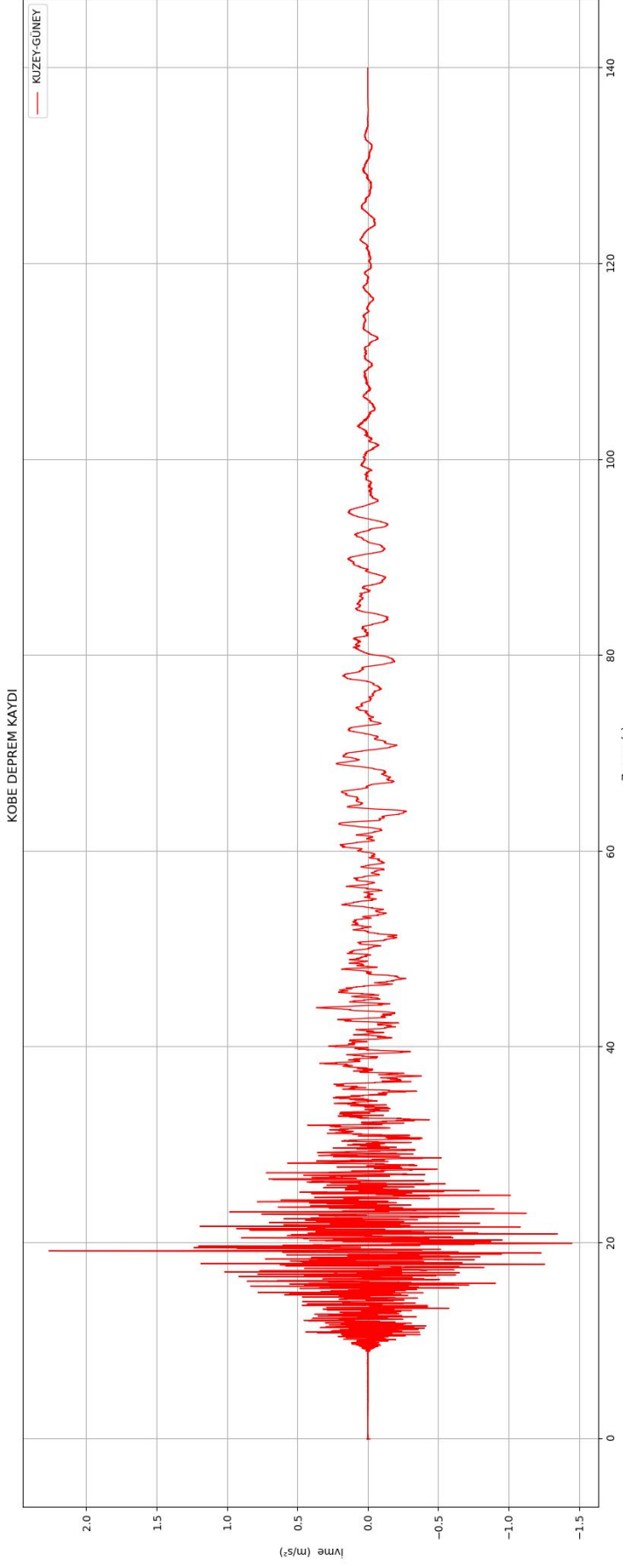
Şekil A.2 : Kocaeli depremi kuzey-güney yönü ivme kaydı.



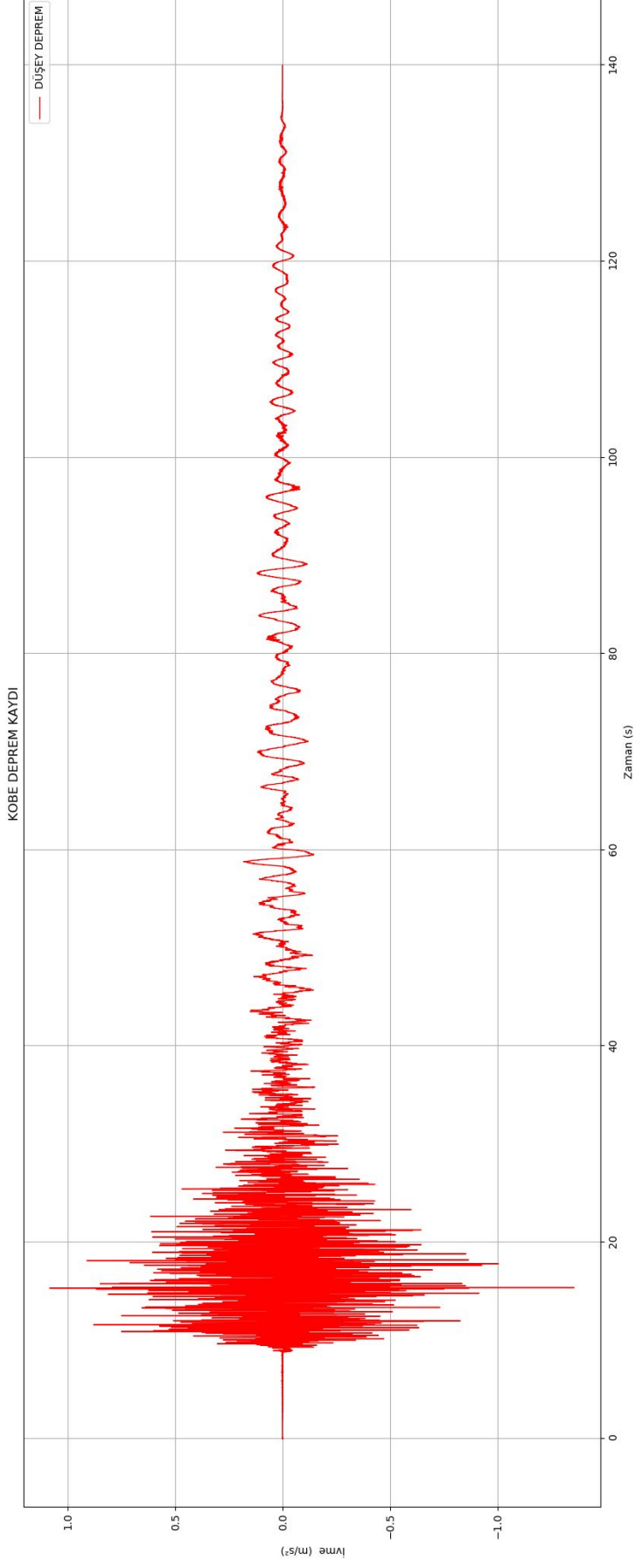
Şekil A.3 : Kocaeli depremi düşey ivme kaydı.



Şekil A.4 : Kobe depremi doğu-batı yönü ivme kaydı.



Şekil A.5 : Kobe depremi kuzey-güney yönü ivme kaydı.

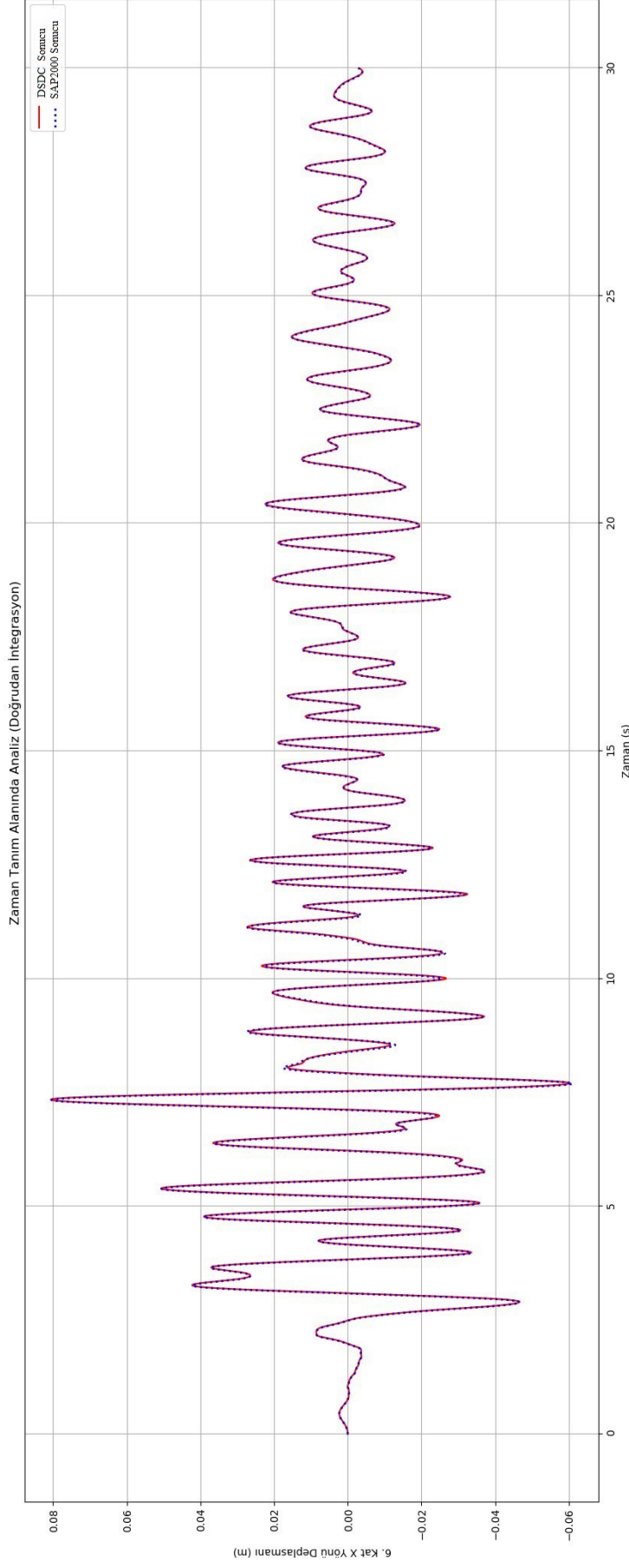


Şekil A.6 : Kocaeli depremi düşey ivme kaydı.

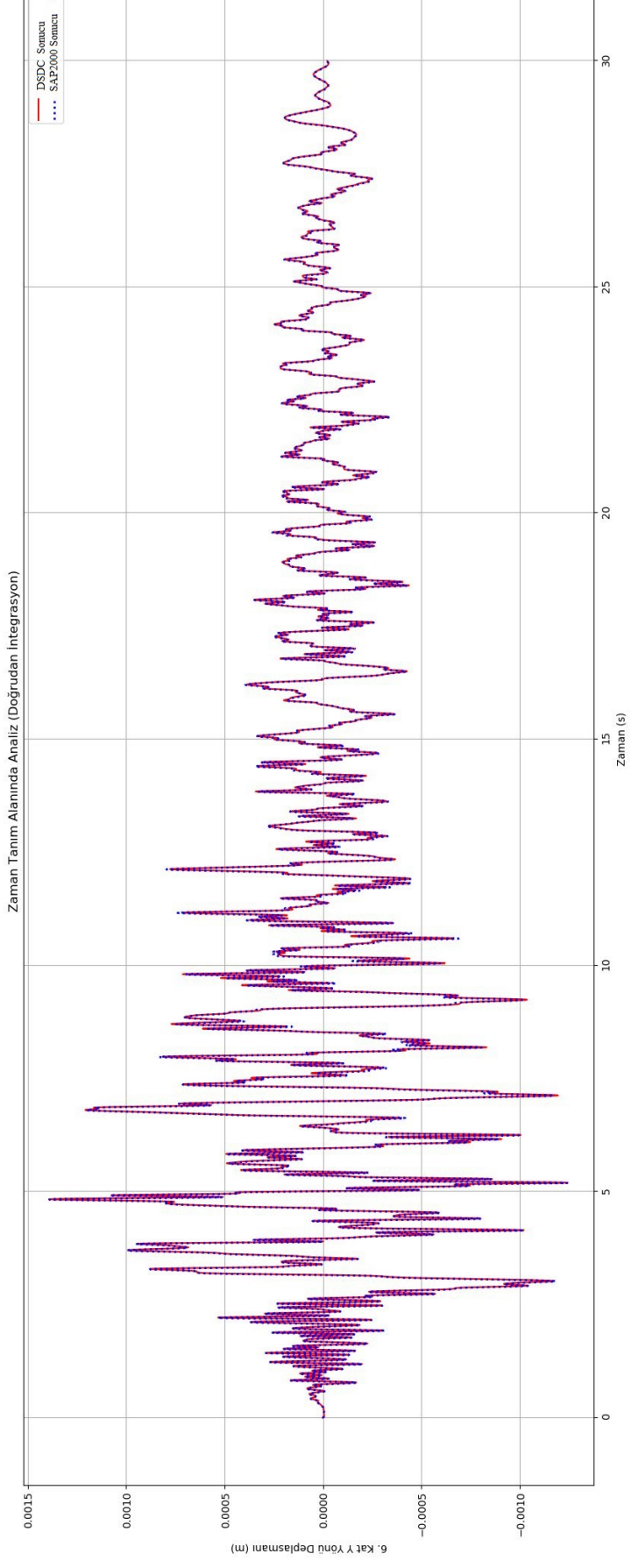


EK B: Zaman Tanım Alanında Yerdeşiştirmeler ve Dönmeler

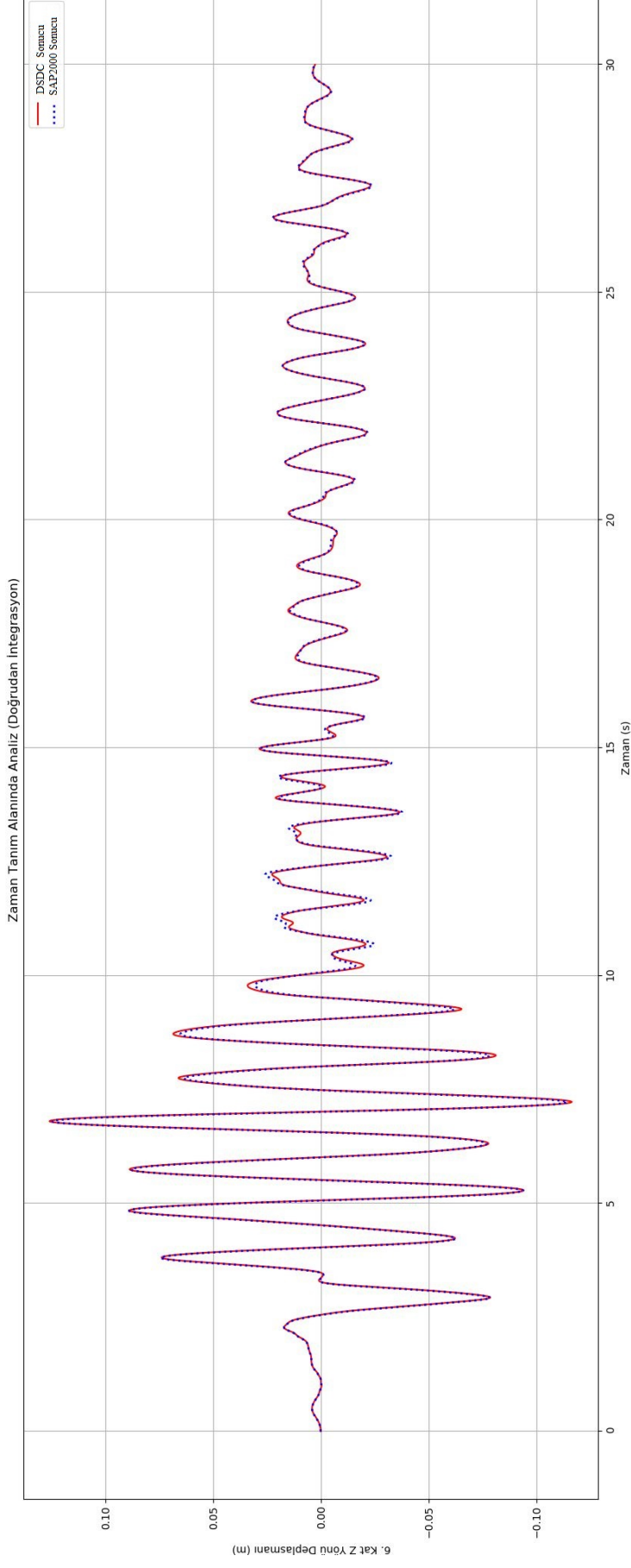




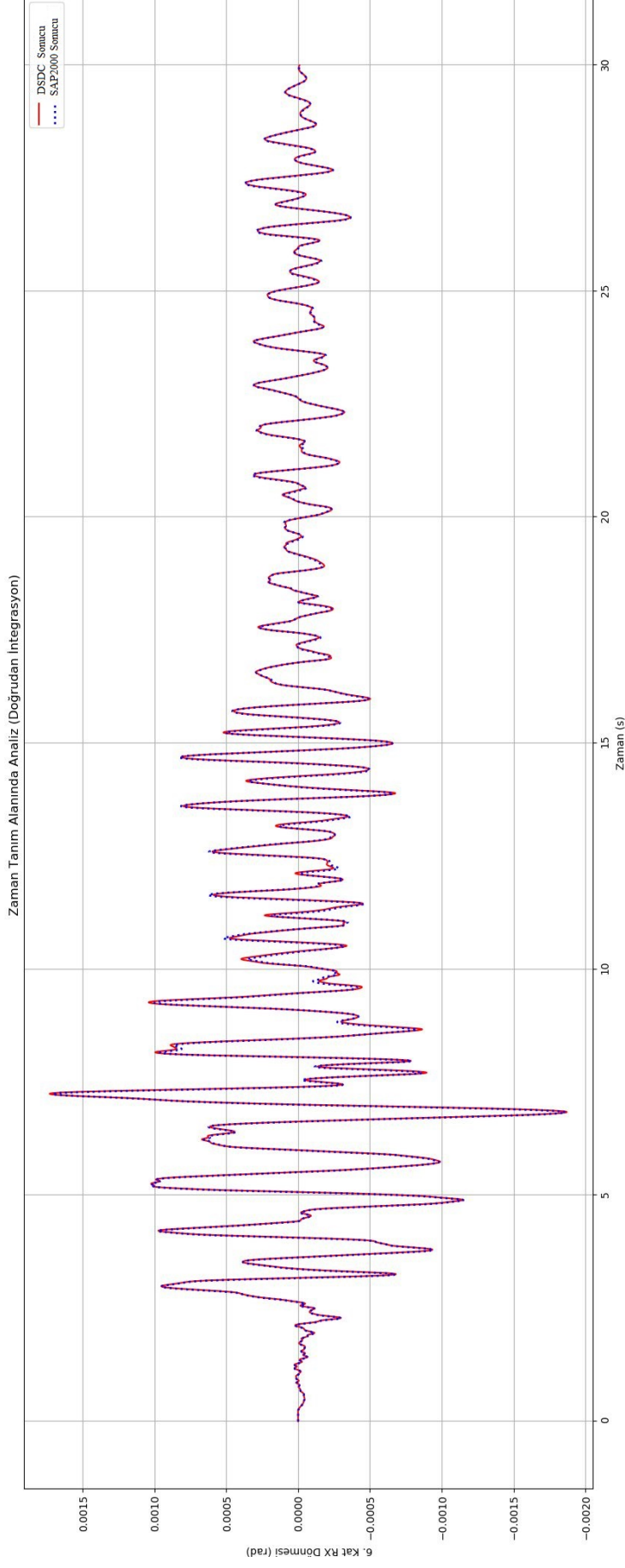
Şekil B.1 : 2A modeli Kocaeli depremi DI X yerdeğiştirmesi.



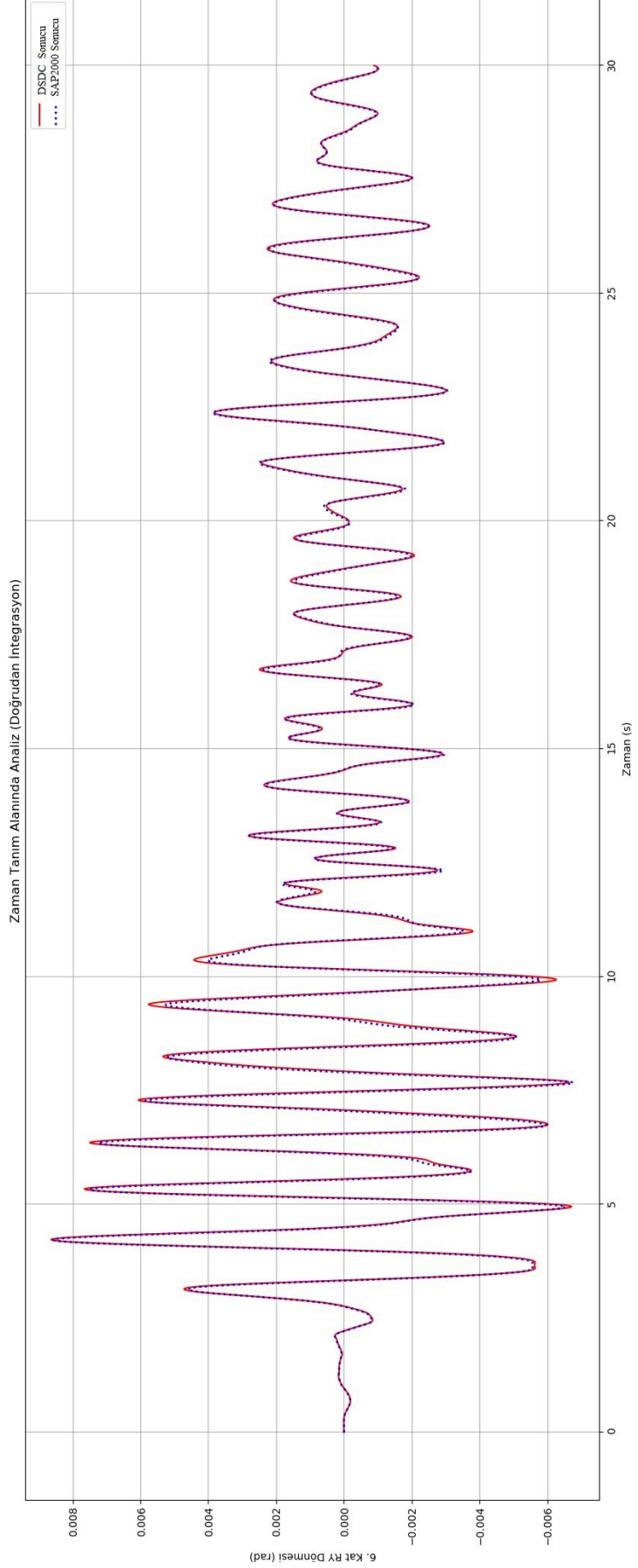
Şekil B.2 : 2A modeli Kocaeli depremi DI Y yerdeğiştirmesi.



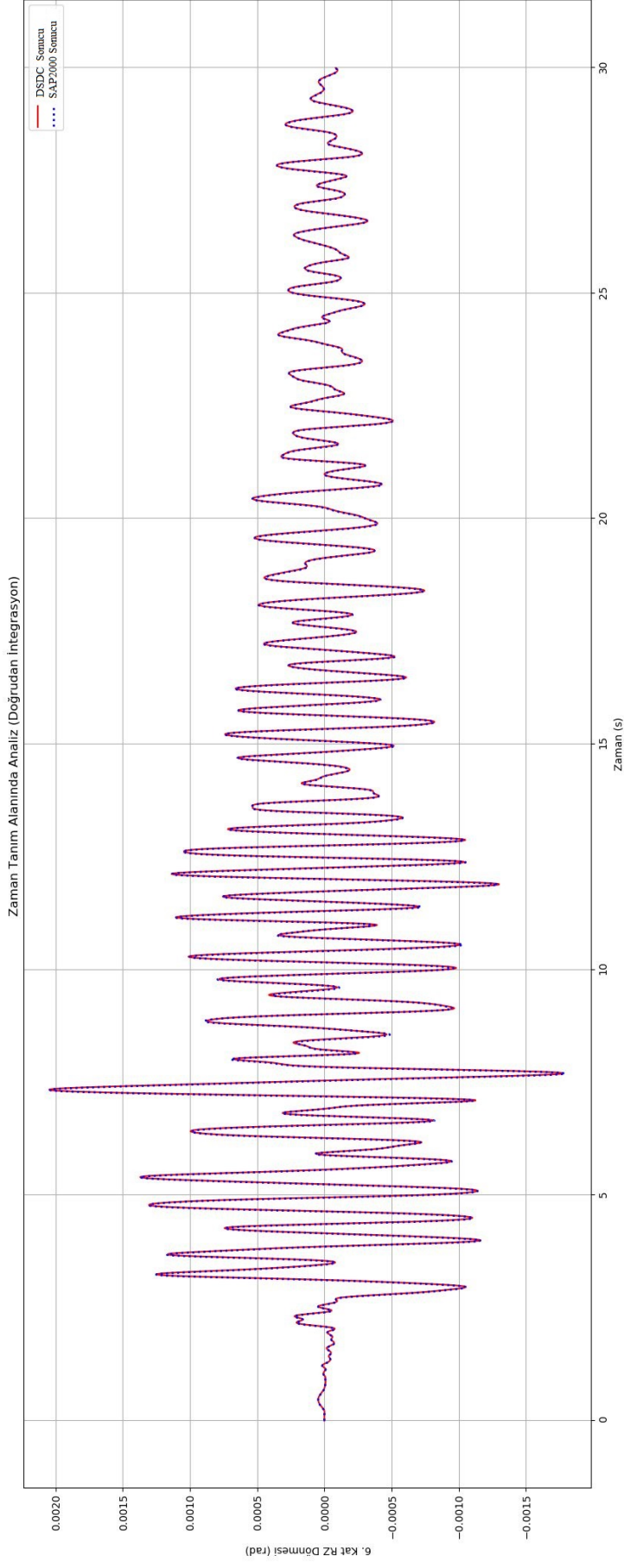
Şekil B.3 : 2A modeli Kocaeli depremi DI Z yerdeğiştirmesi.



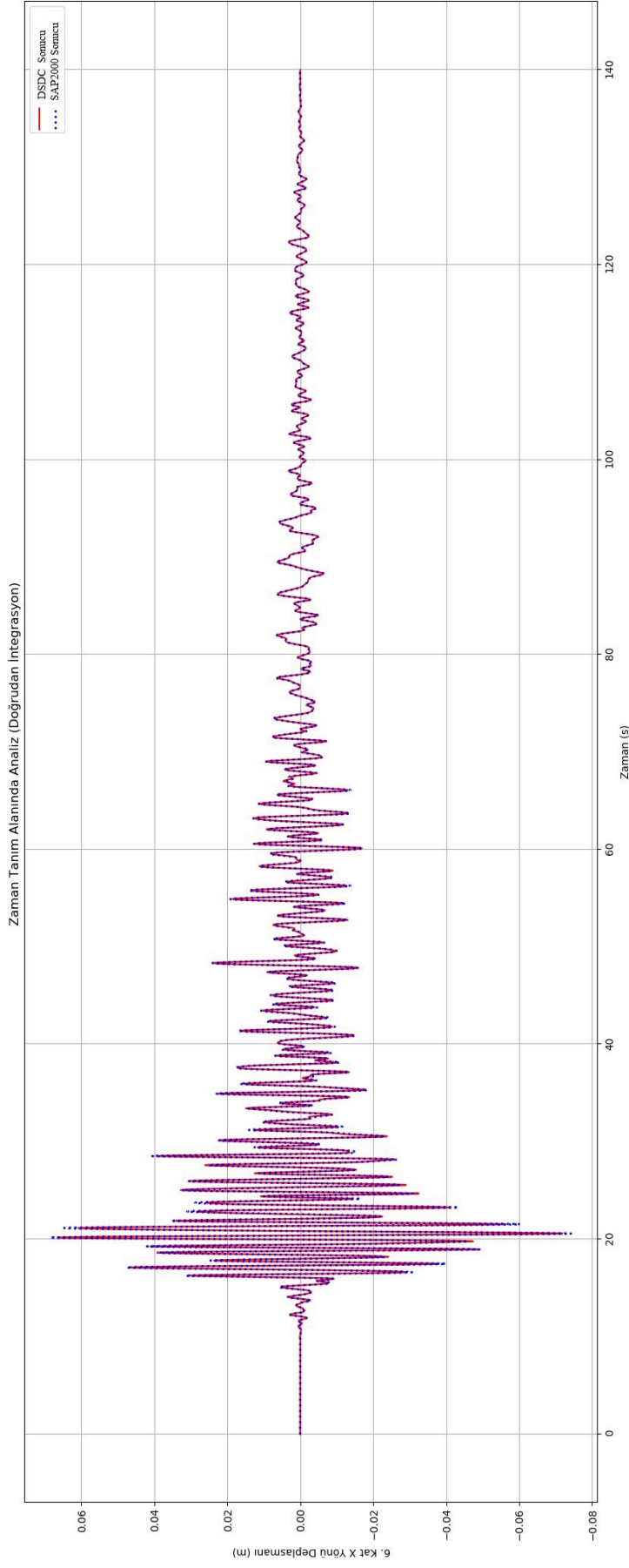
Şekil B.4 : 2A modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.



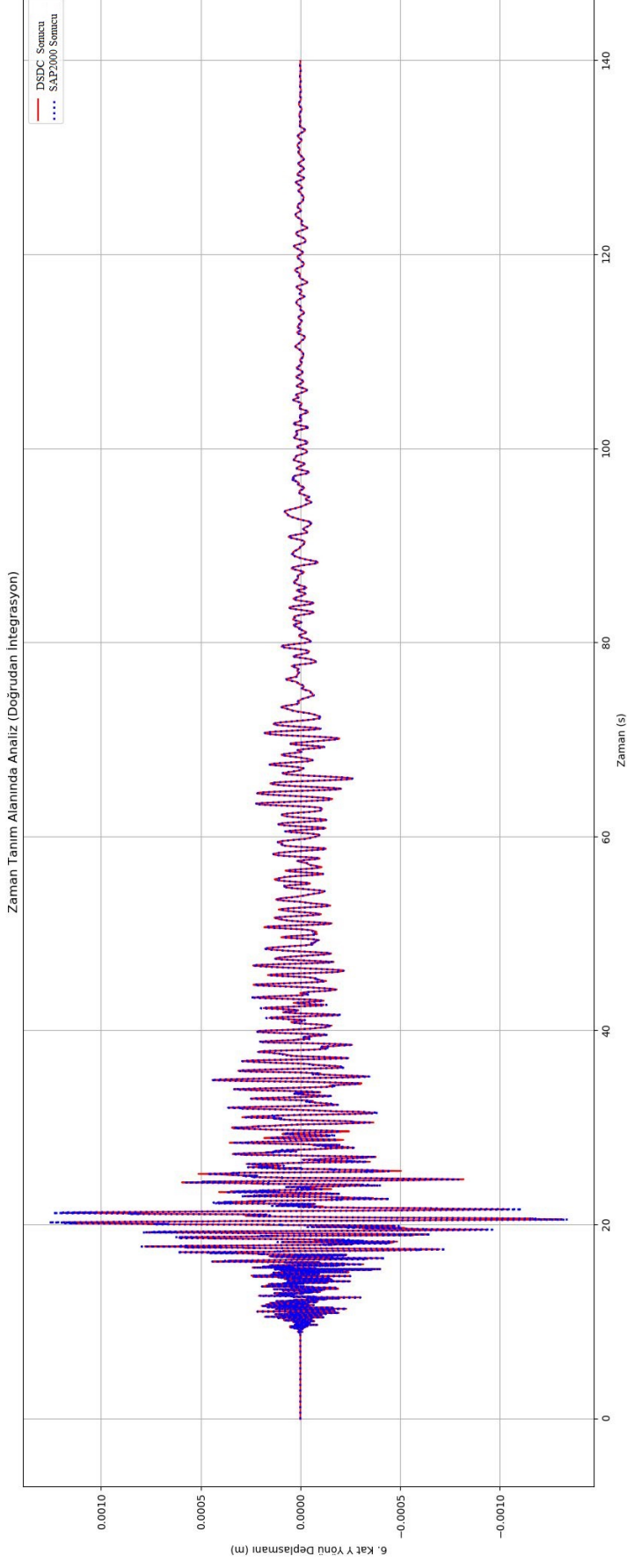
Şekil B.5 : 2A modeli Kocaeli depremi DI RY dönmesi.



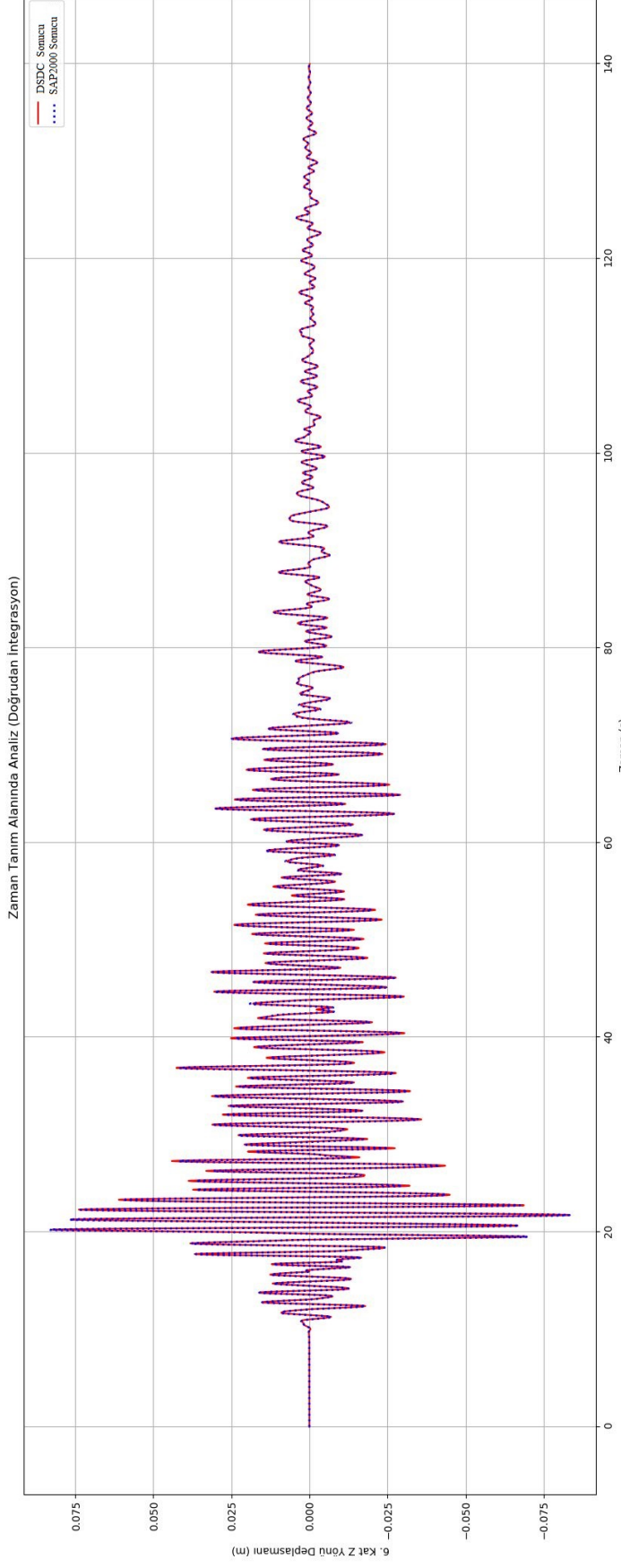
Şekil B.6 : 2A modeli Kocaeli depremi DI RZ dönmesi.



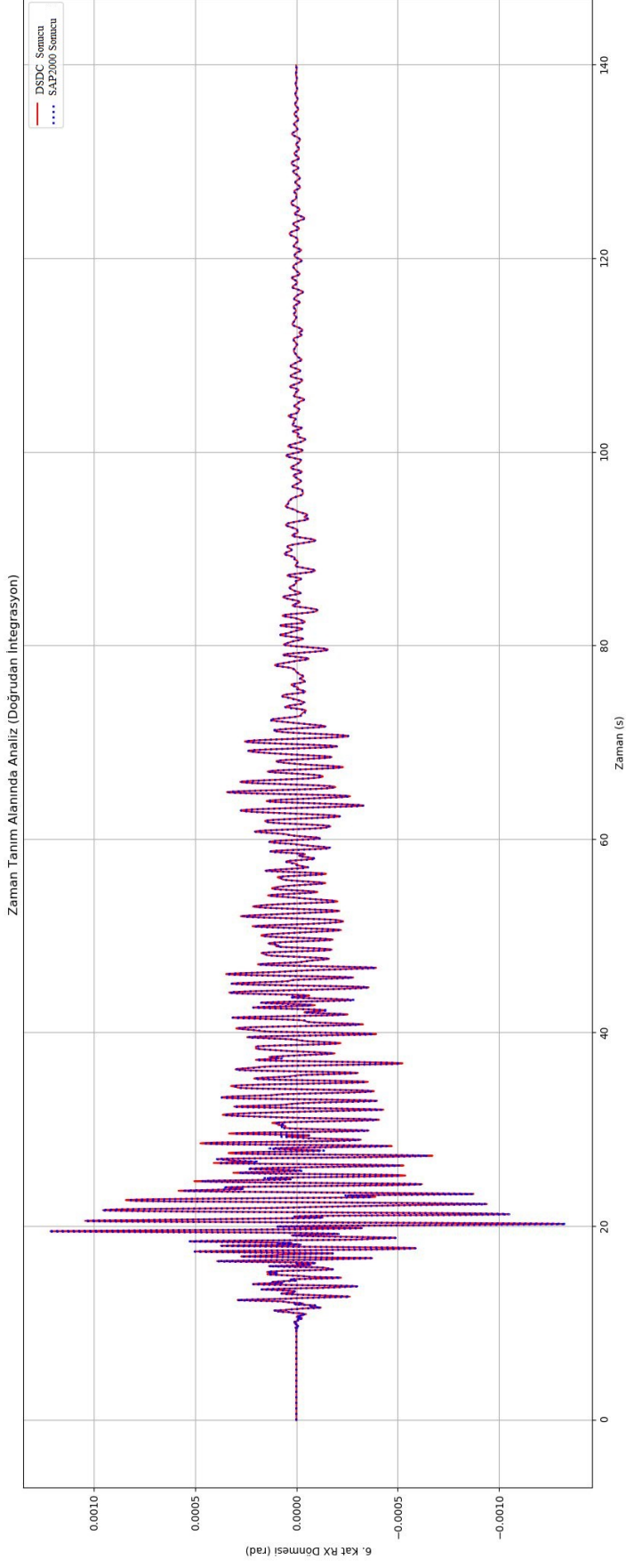
Şekil B.7 : 2A modeli Kobe depremi DI X yerdeğiştirmesi.



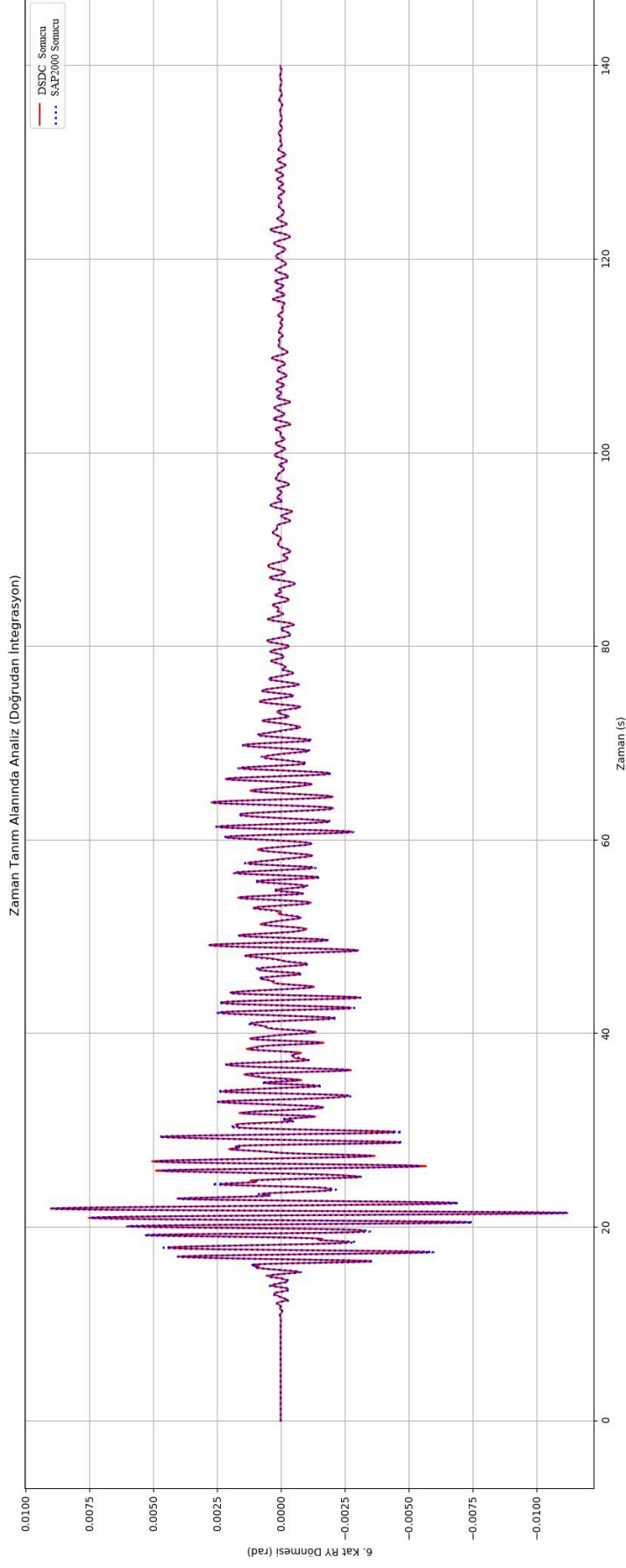
Şekil B.8 : 2A modeli Kobe depremi DI Y yerdeğiştirmesi.



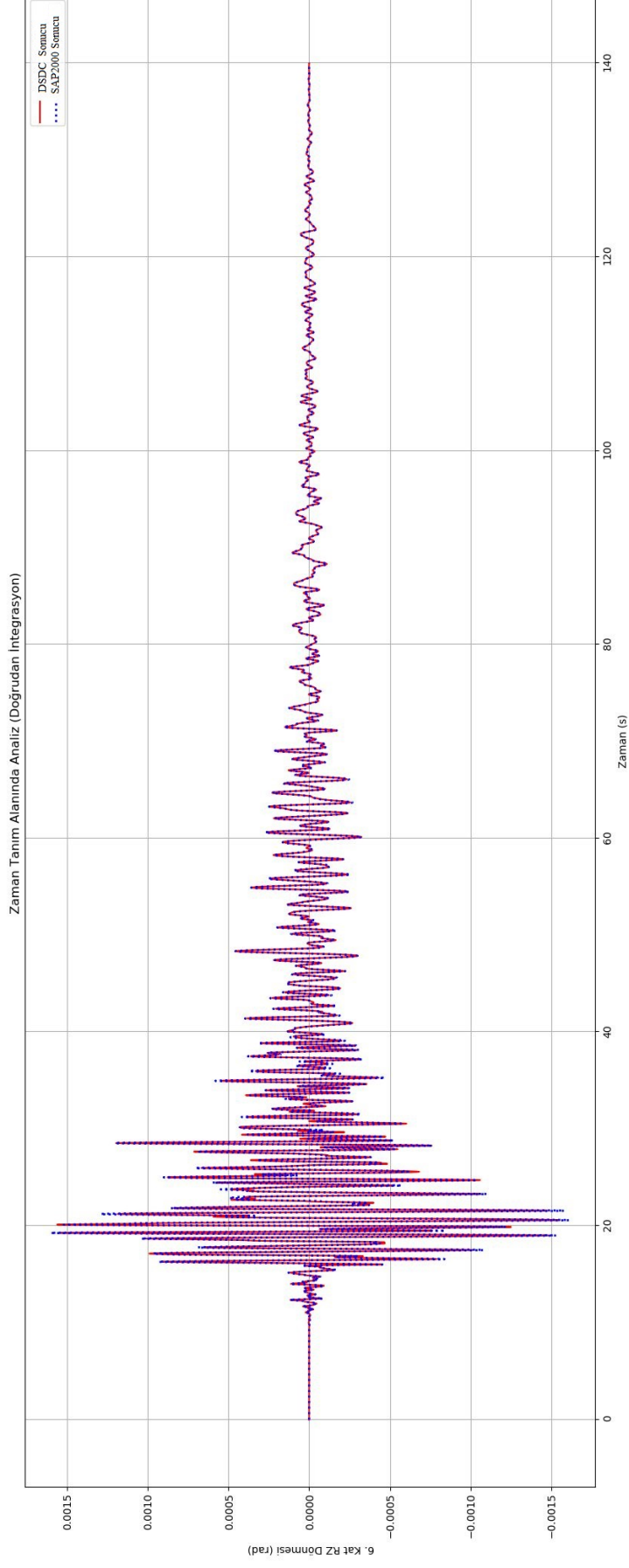
Şekil B.9 : 2A modeli Kobe depremi DI Z yerdeğiştirmesi.



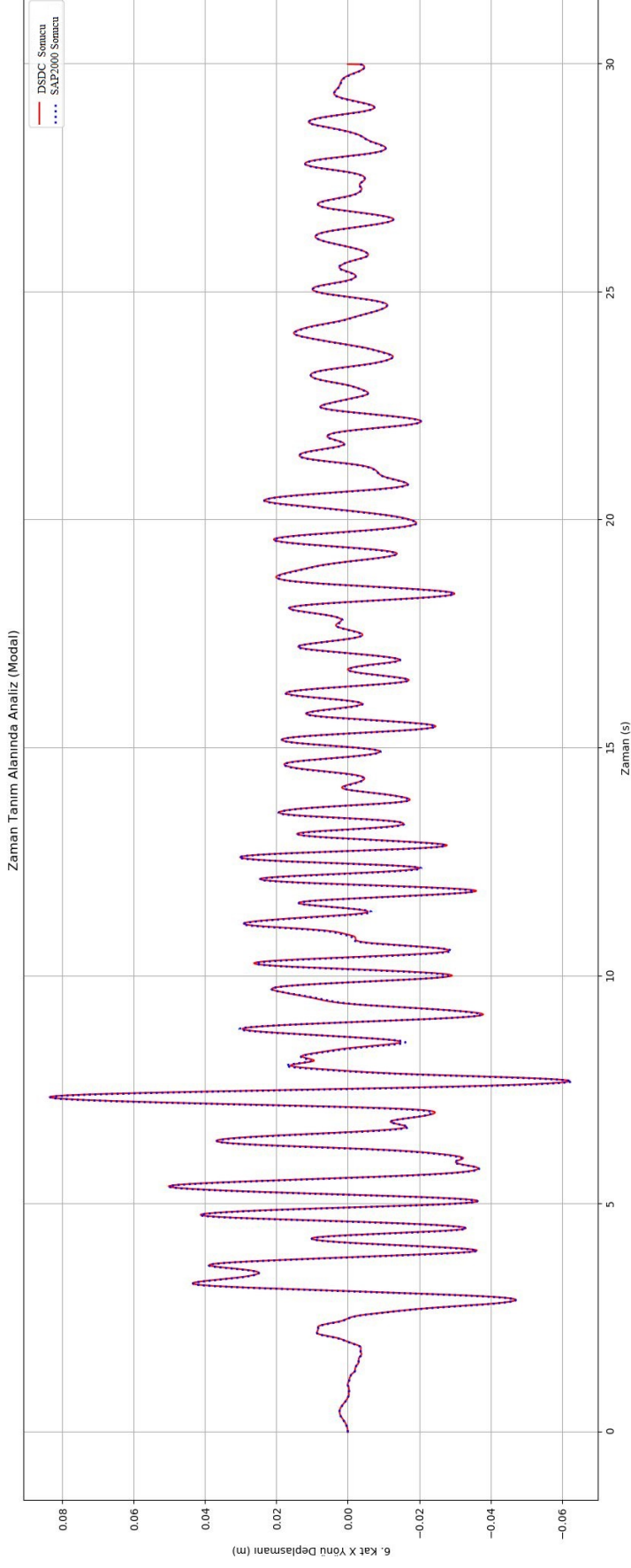
Şekil B.10 : 2A modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.



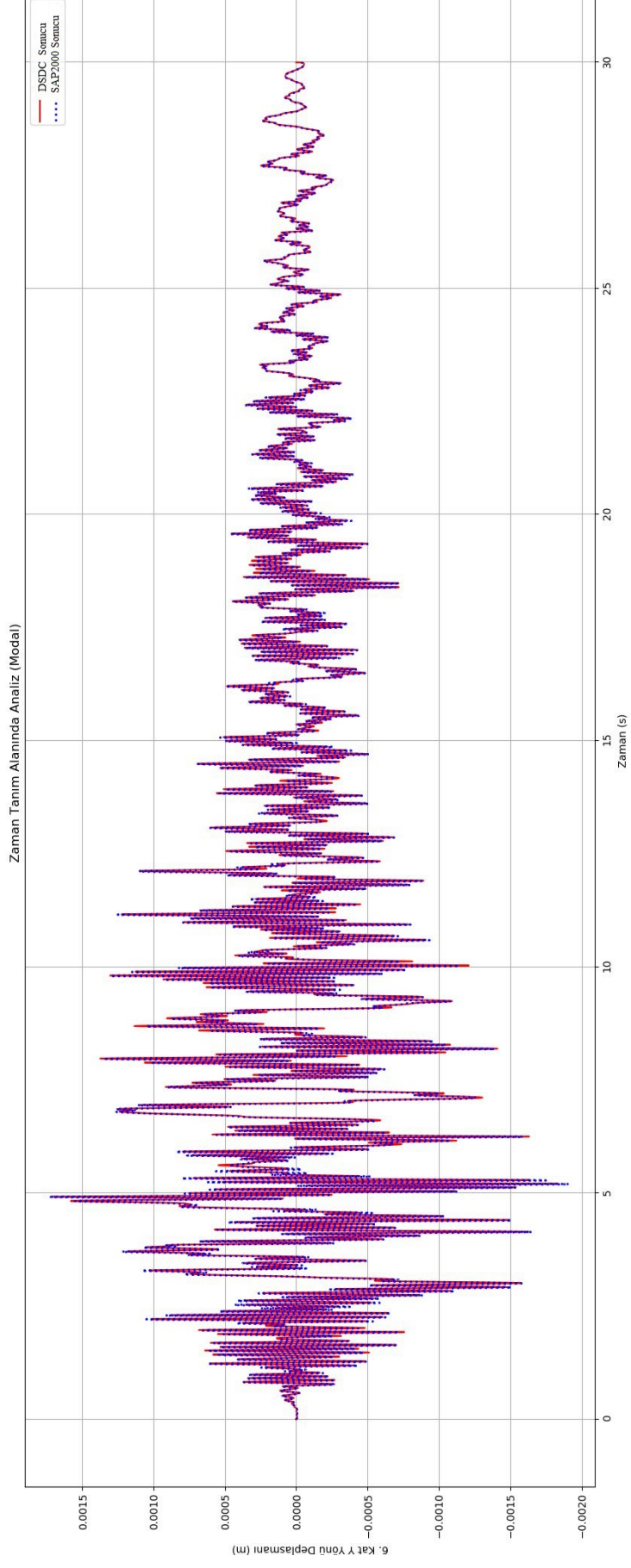
Şekil B.11 : 2A modeli Kobe depremi DI RY dönmesi.



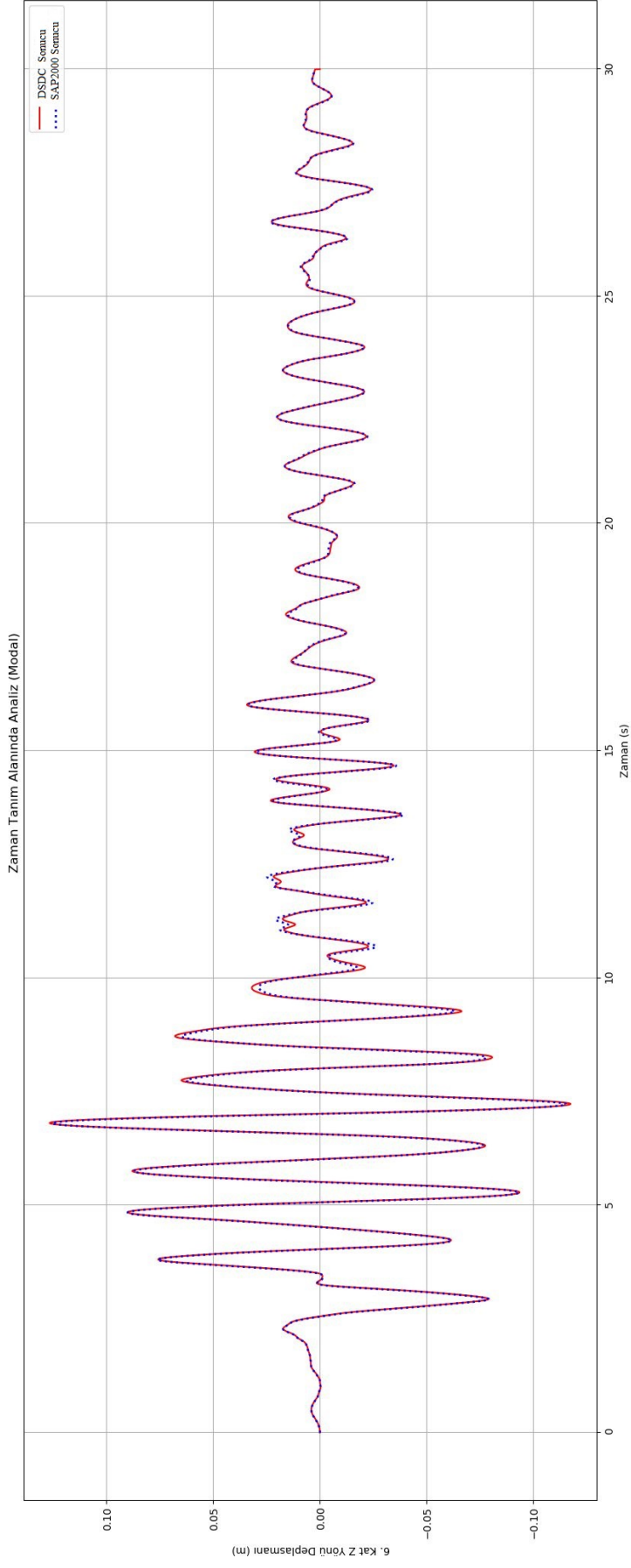
Şekil B.12 : 2A modeli Kobe depremi D RZ dönmesi.



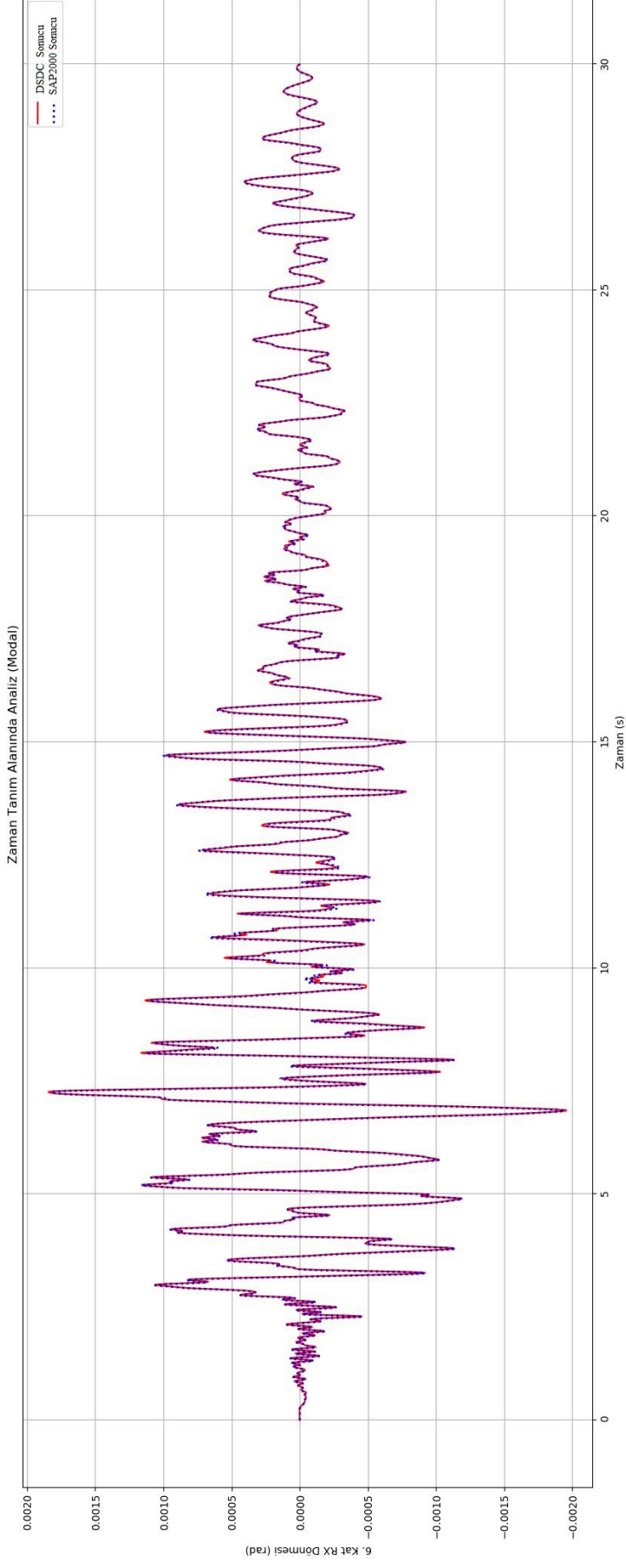
Şekil B.13 : 2A modeli Kocaeli depremi MS X yerdeğiştirmesi.



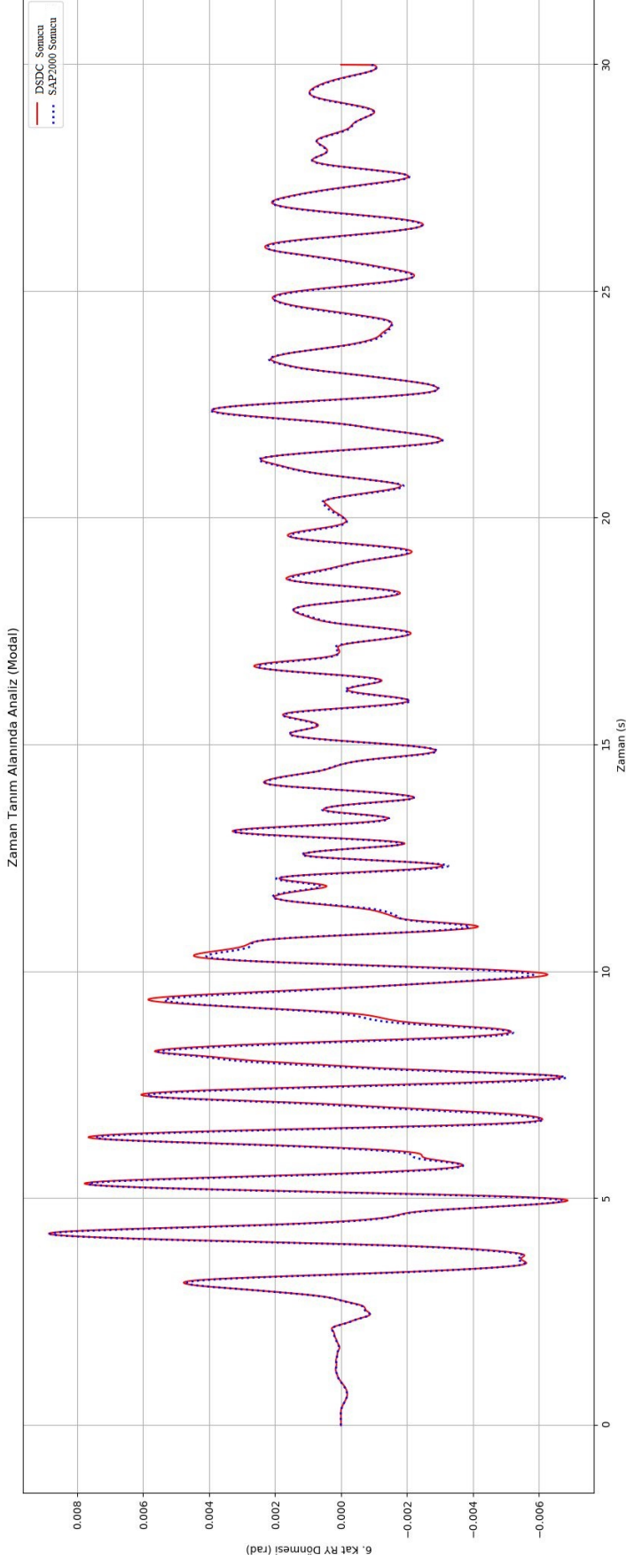
Şekil B.14 : 2A modeli Kocaeli depremi MS Y yerdeğiştirmesi.



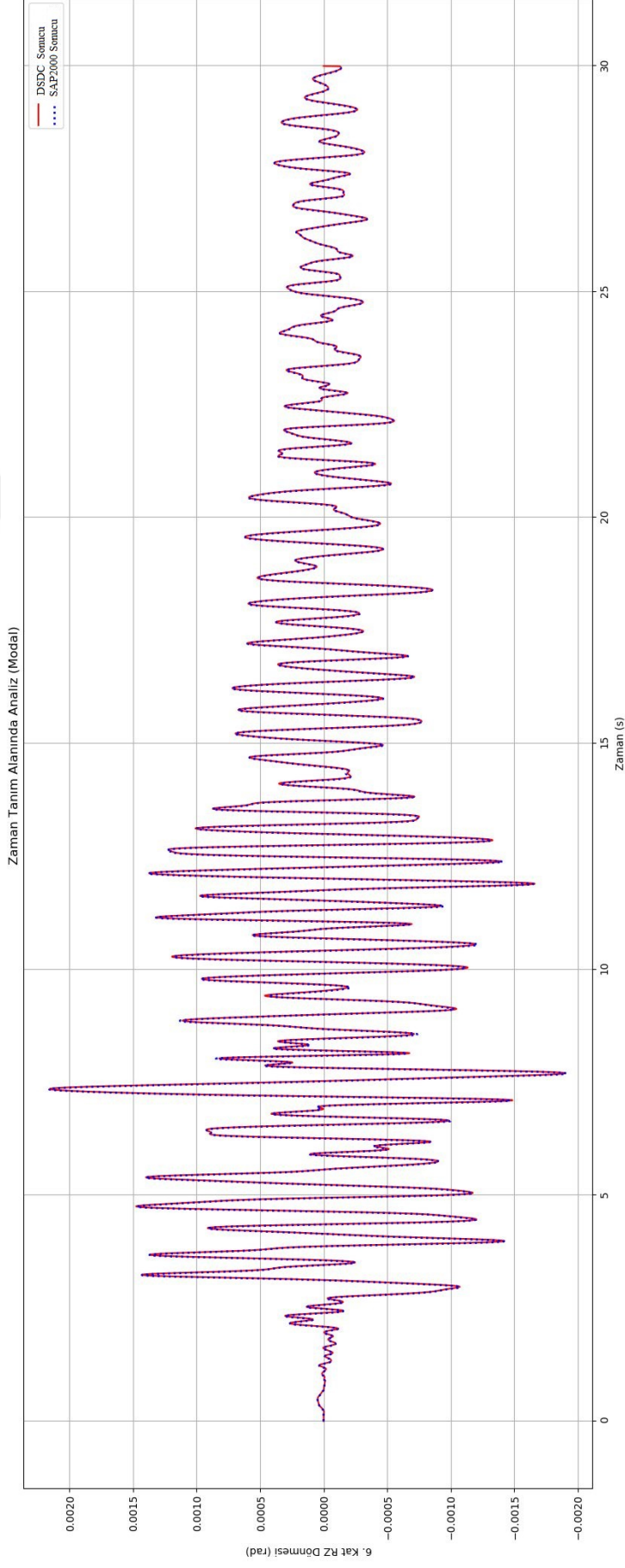
Şekil B.15 : 2A modeli Kocaeli depremi MS Z yerdeğiştirmesi.



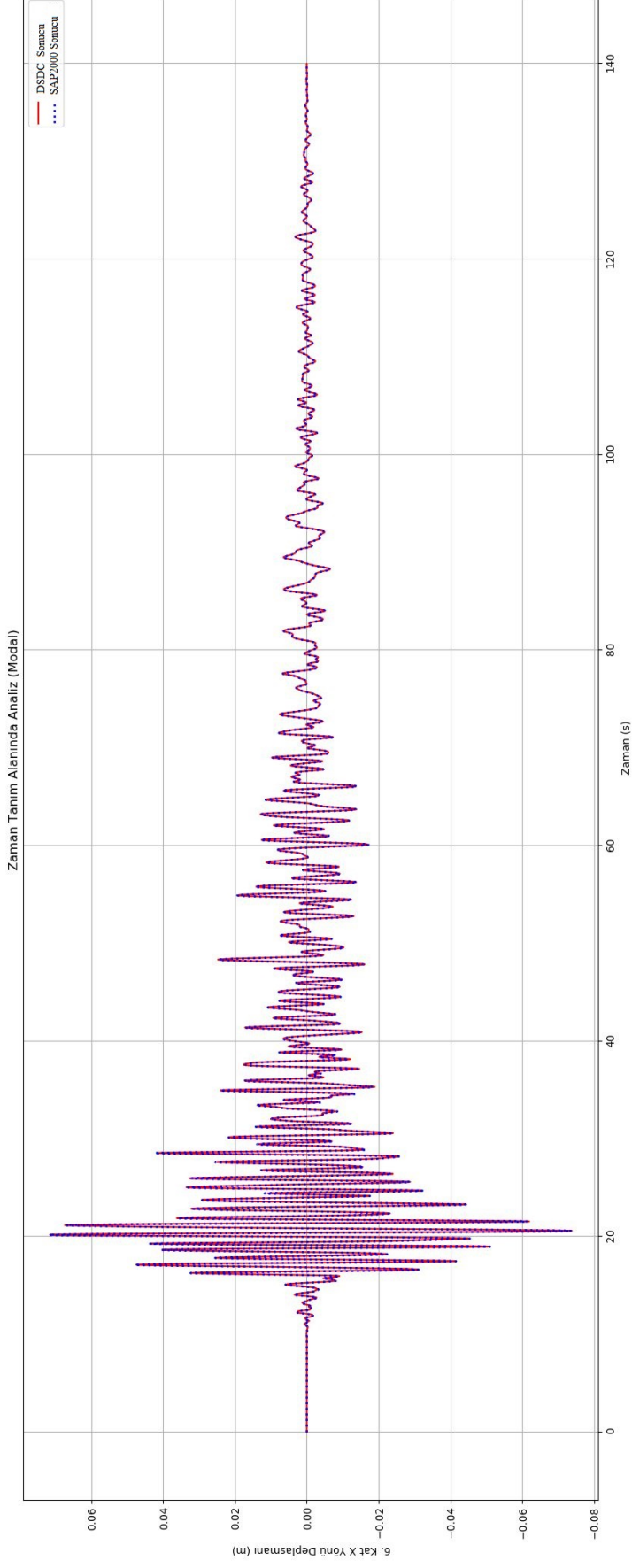
Şekil B.16 : 2A modeli Kocaeli depremi MS RX dönmesi.



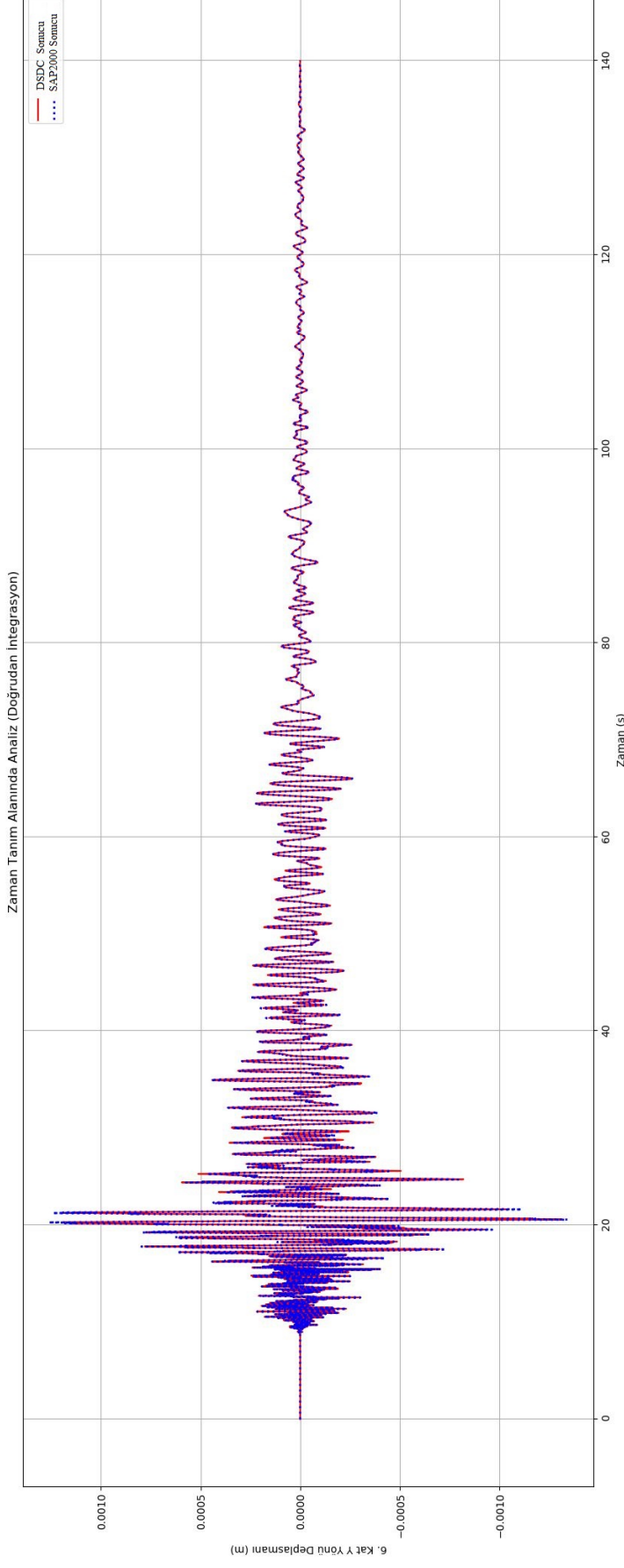
Şekil B.17 : 2A modeli Kocaeli depremi MS RY dönmesi.



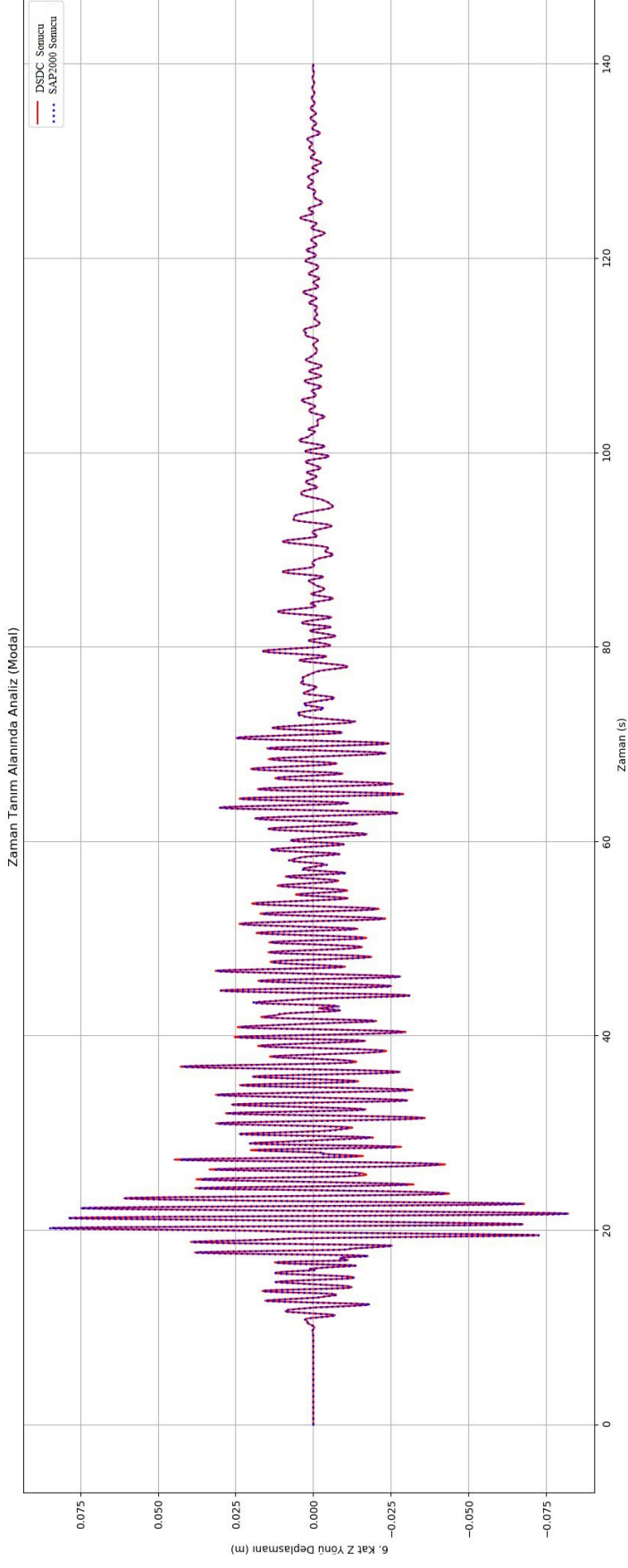
Şekil B.18 : 2A modelı Kocaelı depremi MS RZ dönmesi.



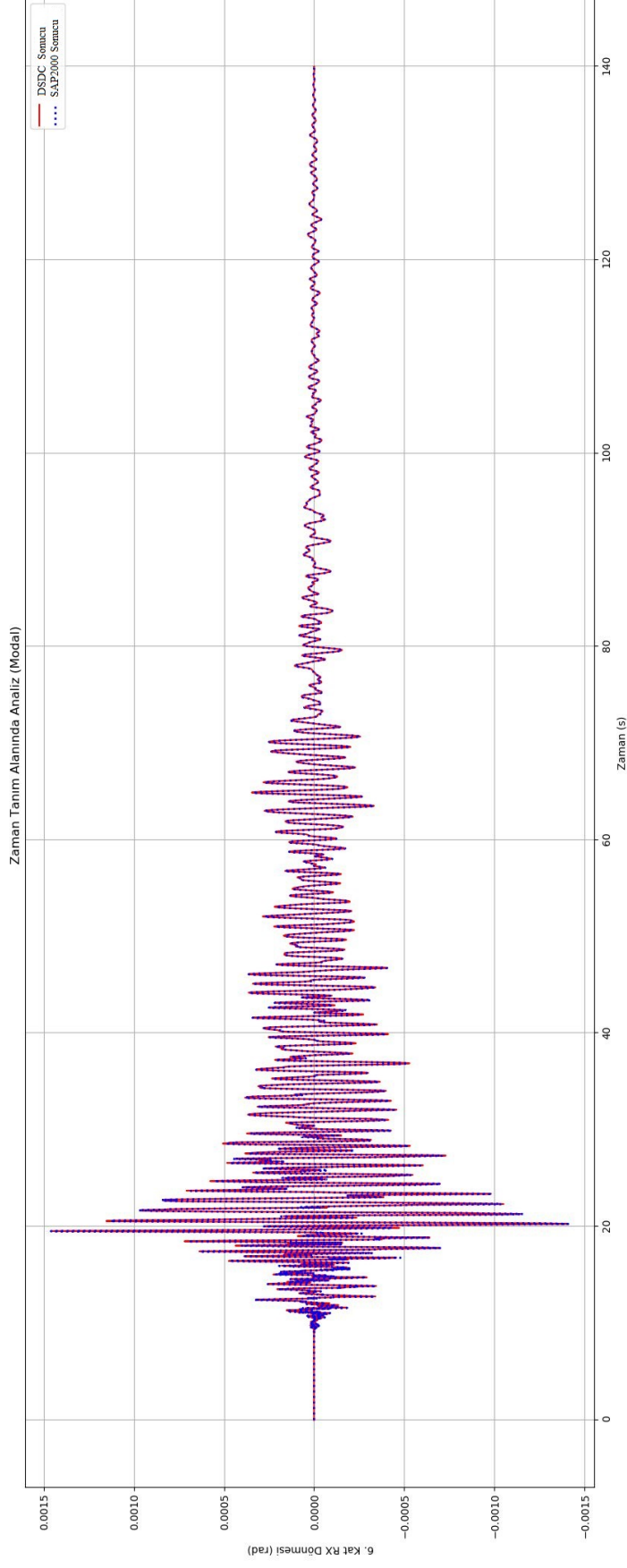
Şekil B.19 : 2A modelli Kobe depremi MS X yerdeğiştirmesi.



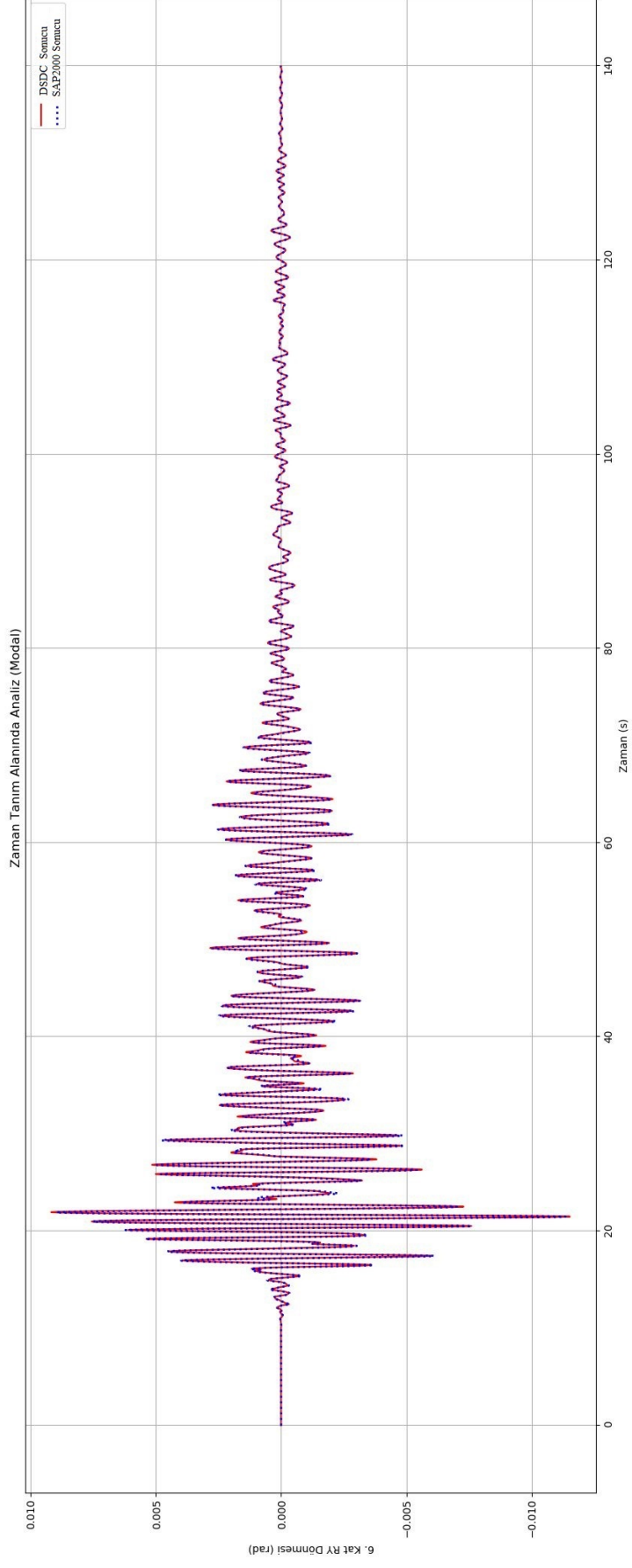
Şekil B.20 : 2A modeli Kobe depremi MS Y yerdeğiştirmesi.



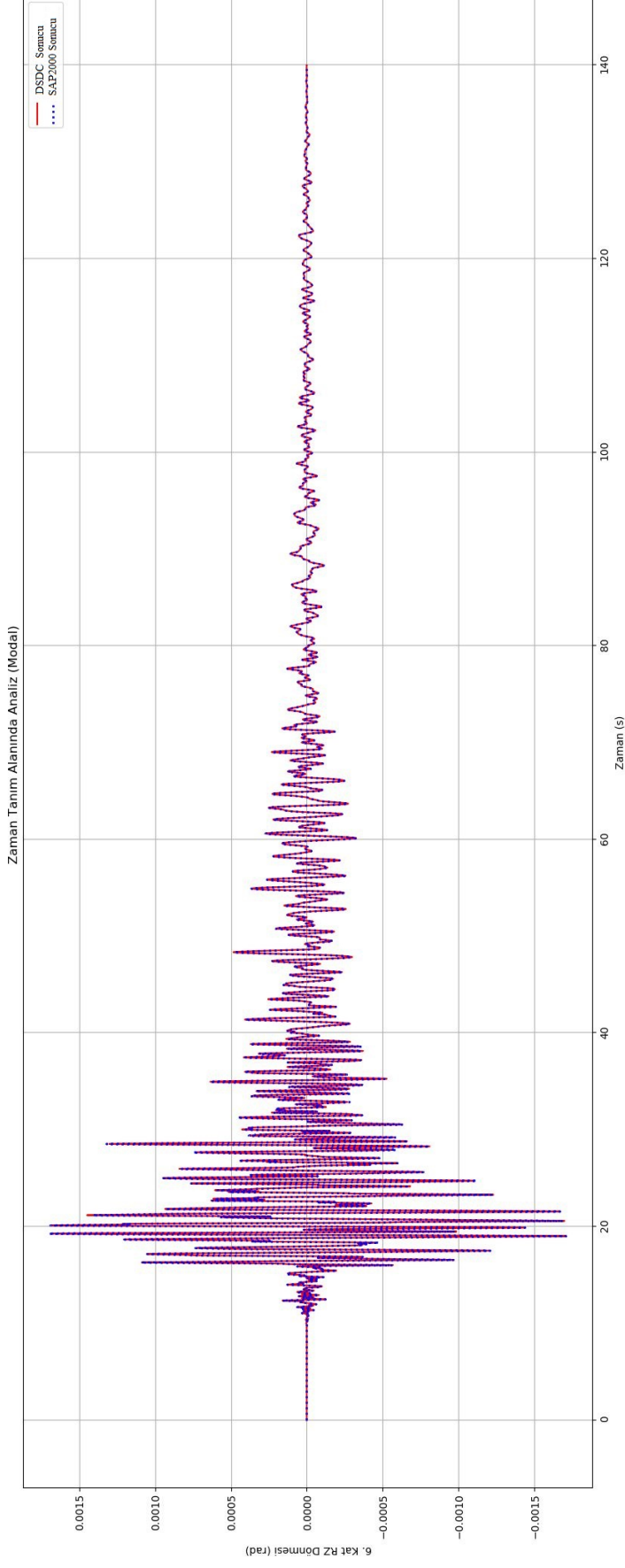
Şekil B.21 : 2A modelli Kobe depremi MS Z yerdeğiştirmesi.



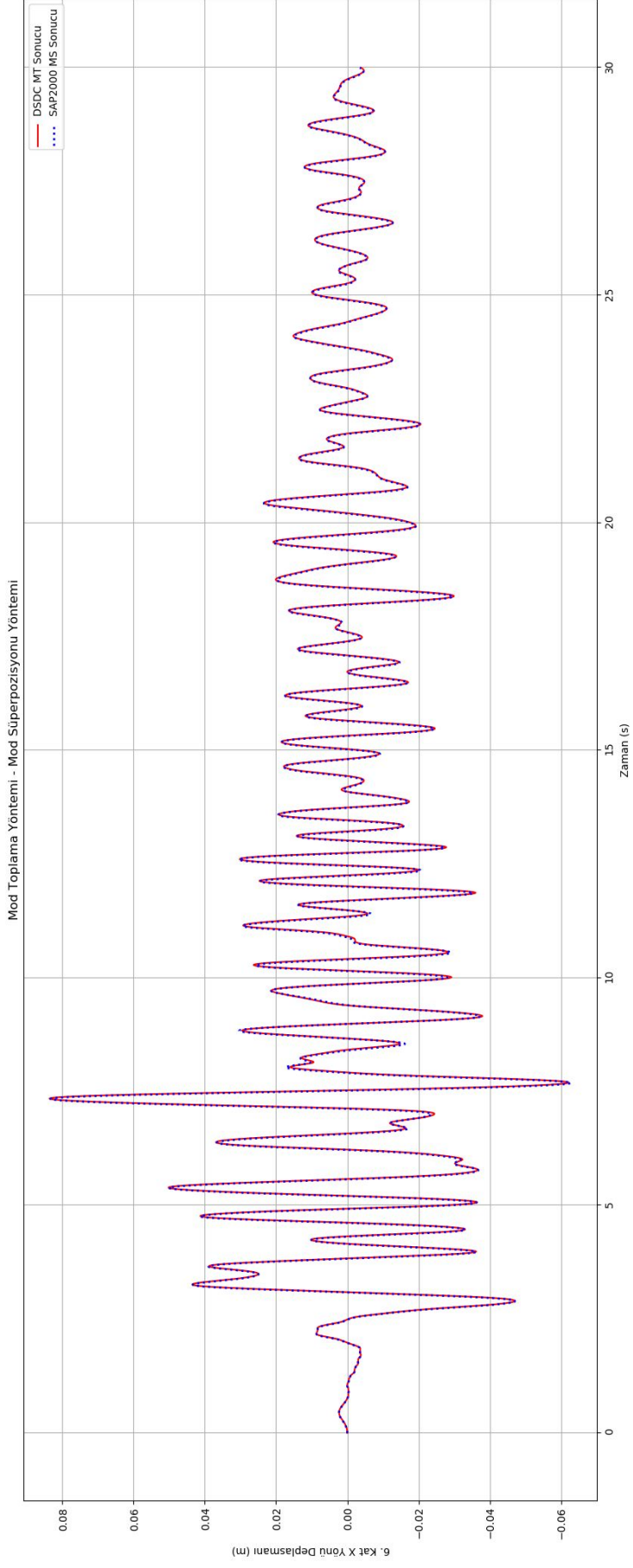
Şekil B.22 : 2A modelli Kobe depremi MS RX dönmesi.



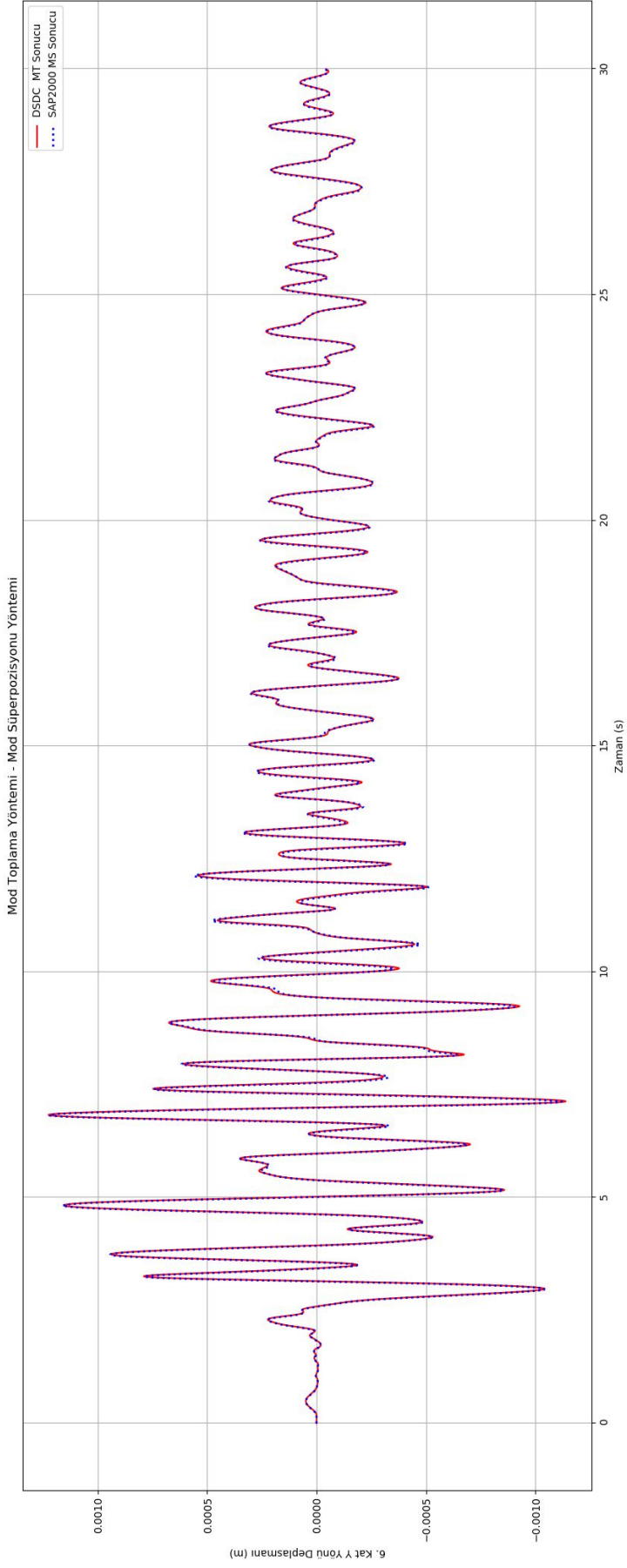
Şekil B.23 : 2A modelli Kobe depremi MS RY dönmesi.



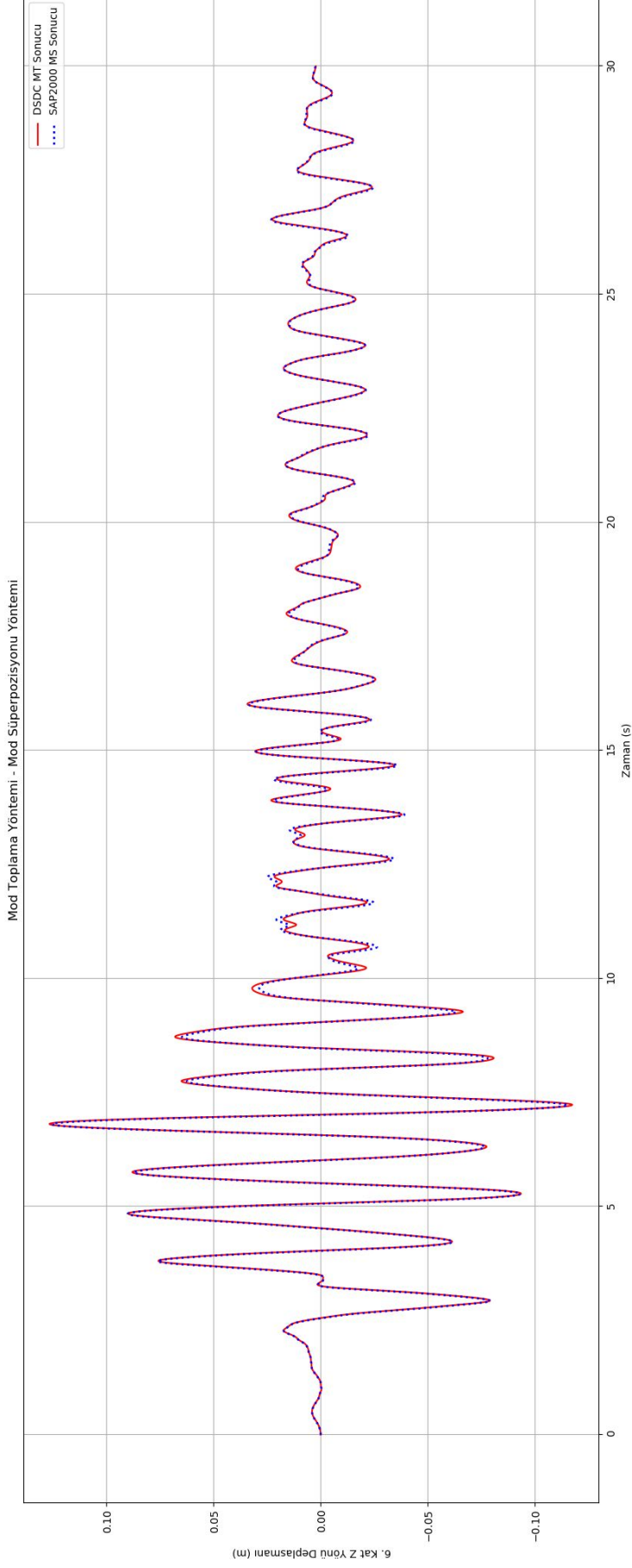
Şekil B.24 : 2A modelli Kobe depremi MS RZ dönmesi.



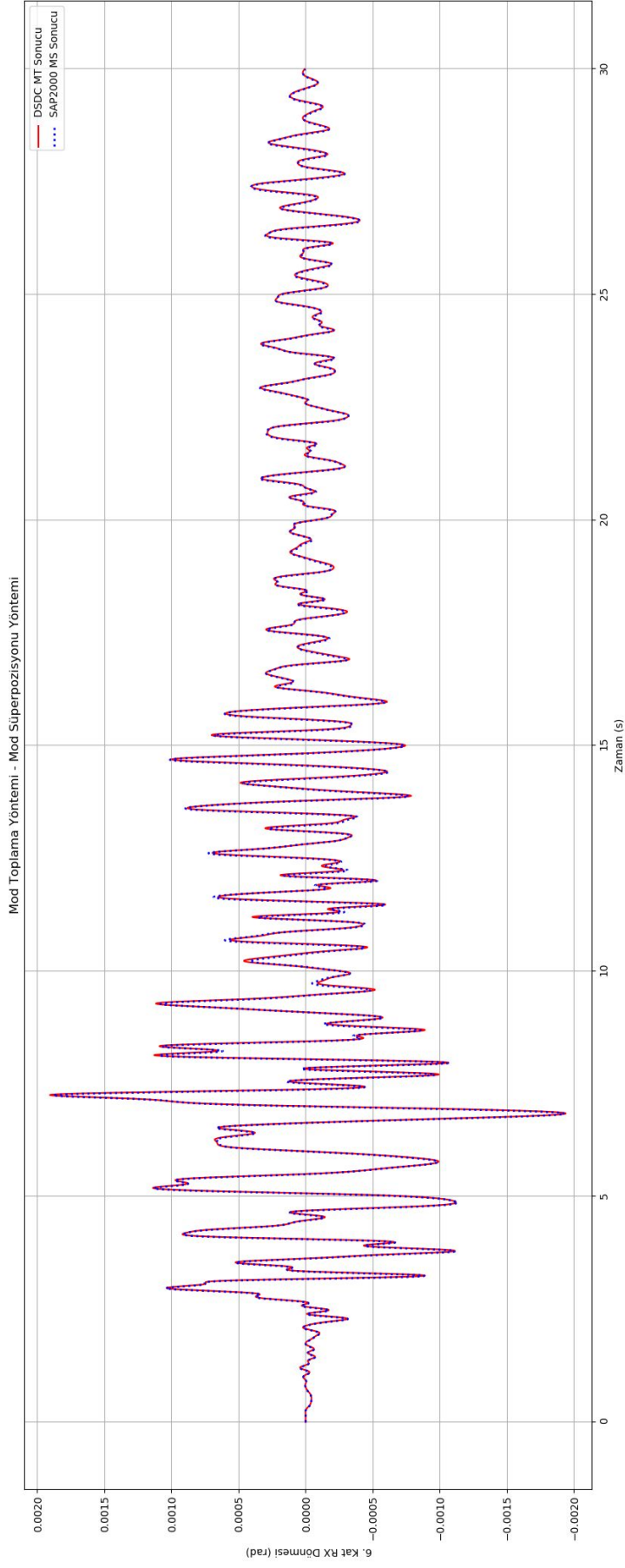
Şekil B.25 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.



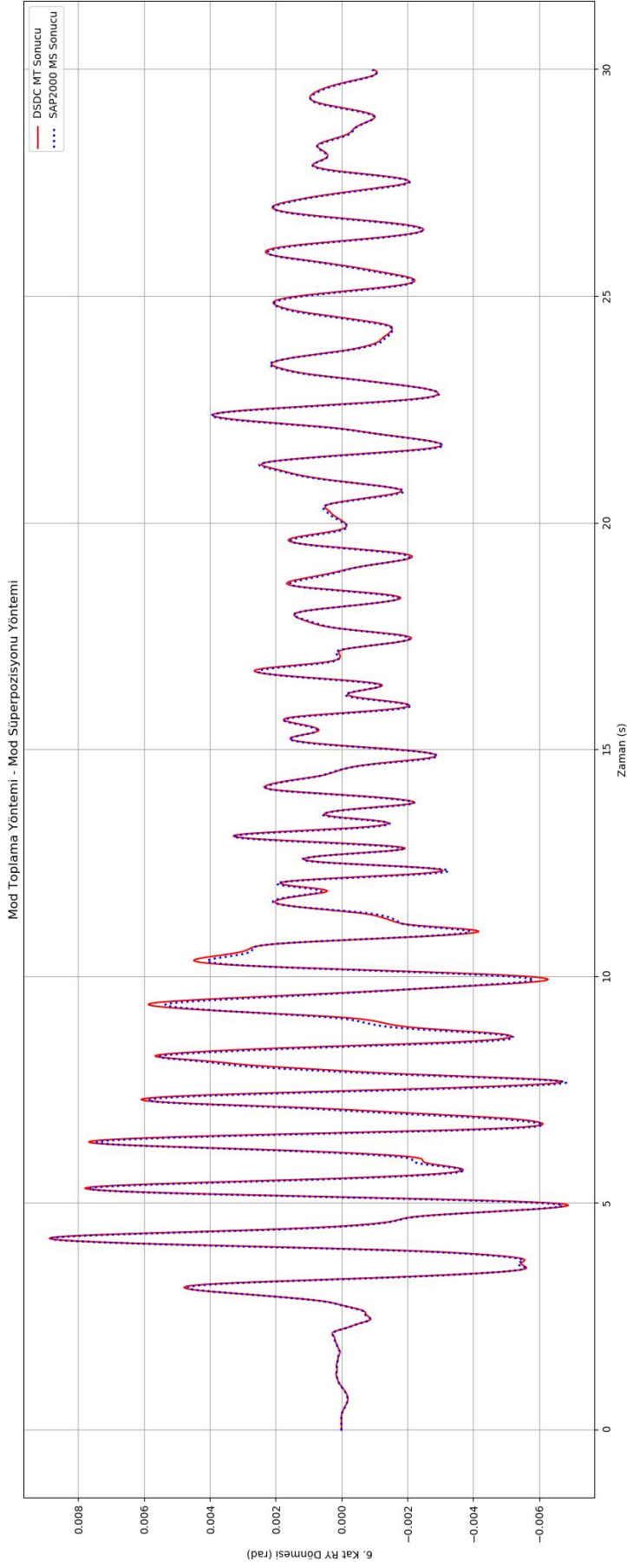
Şekil B.26 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.



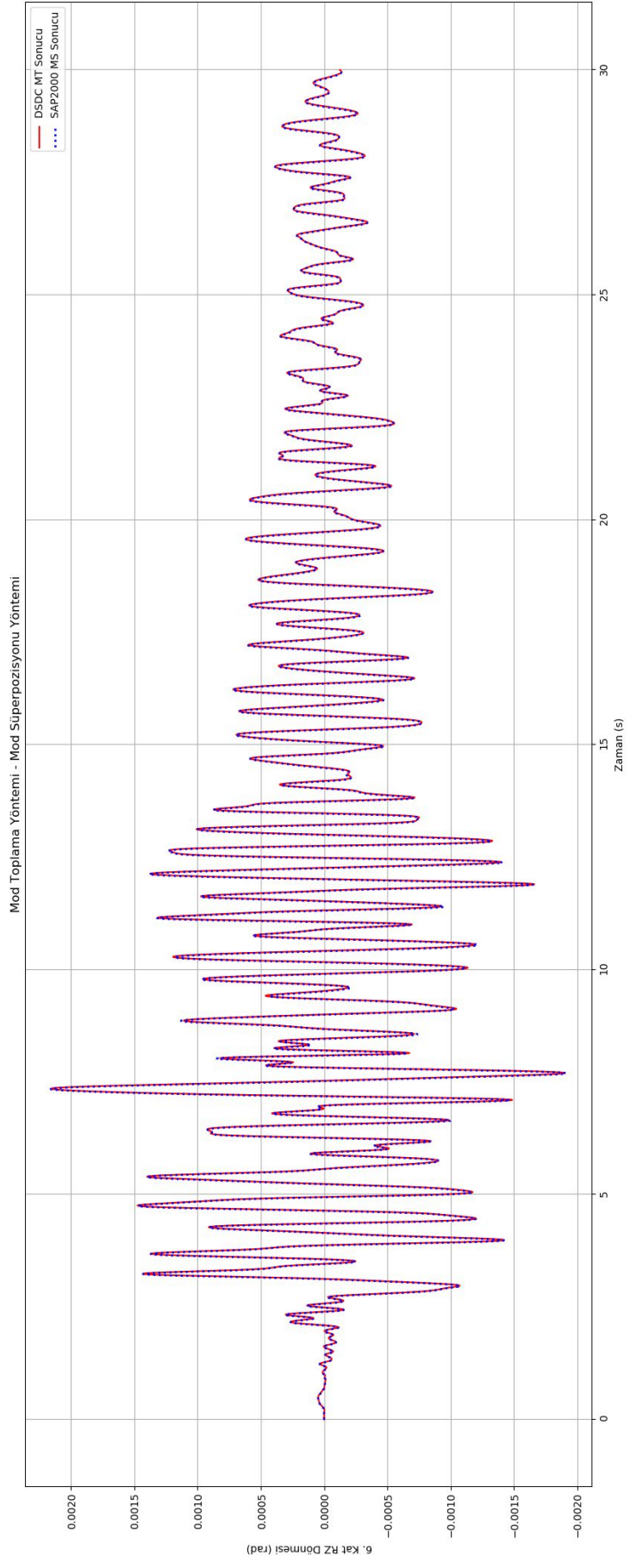
Şekil B.27 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.



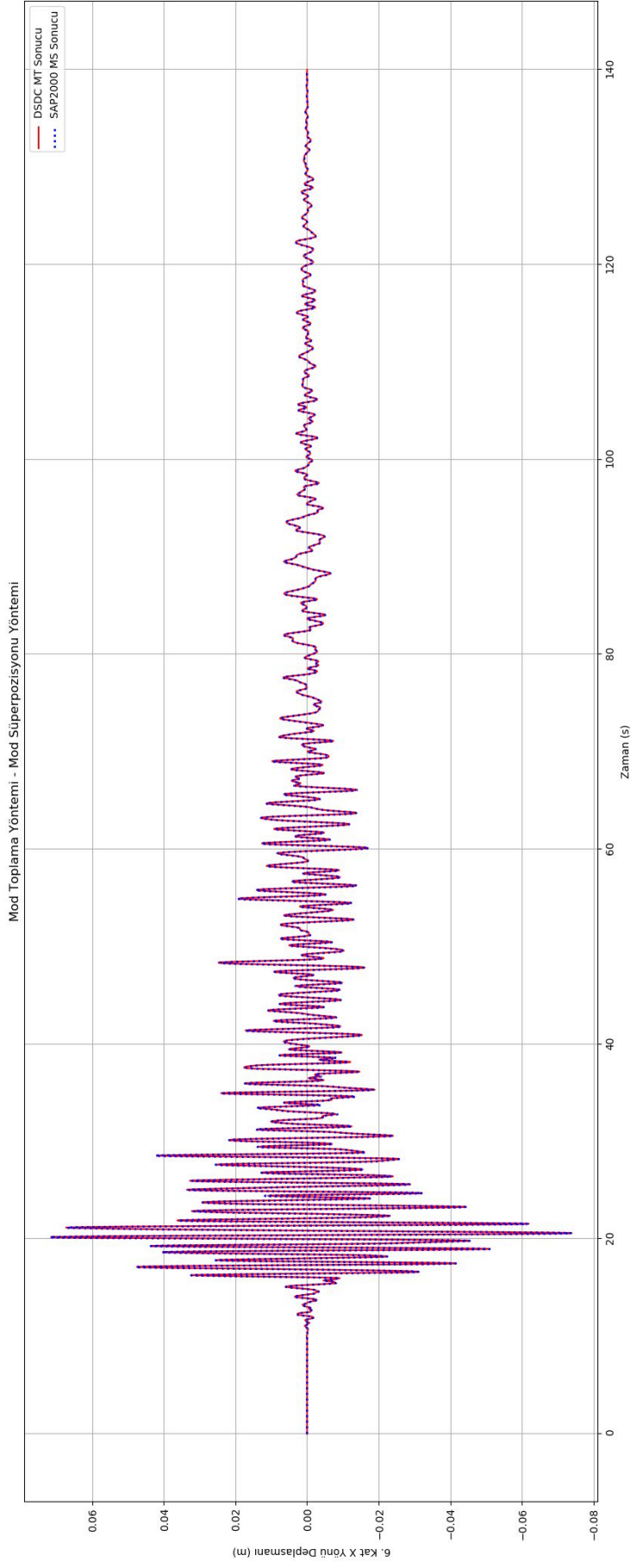
Şekil B.28 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.



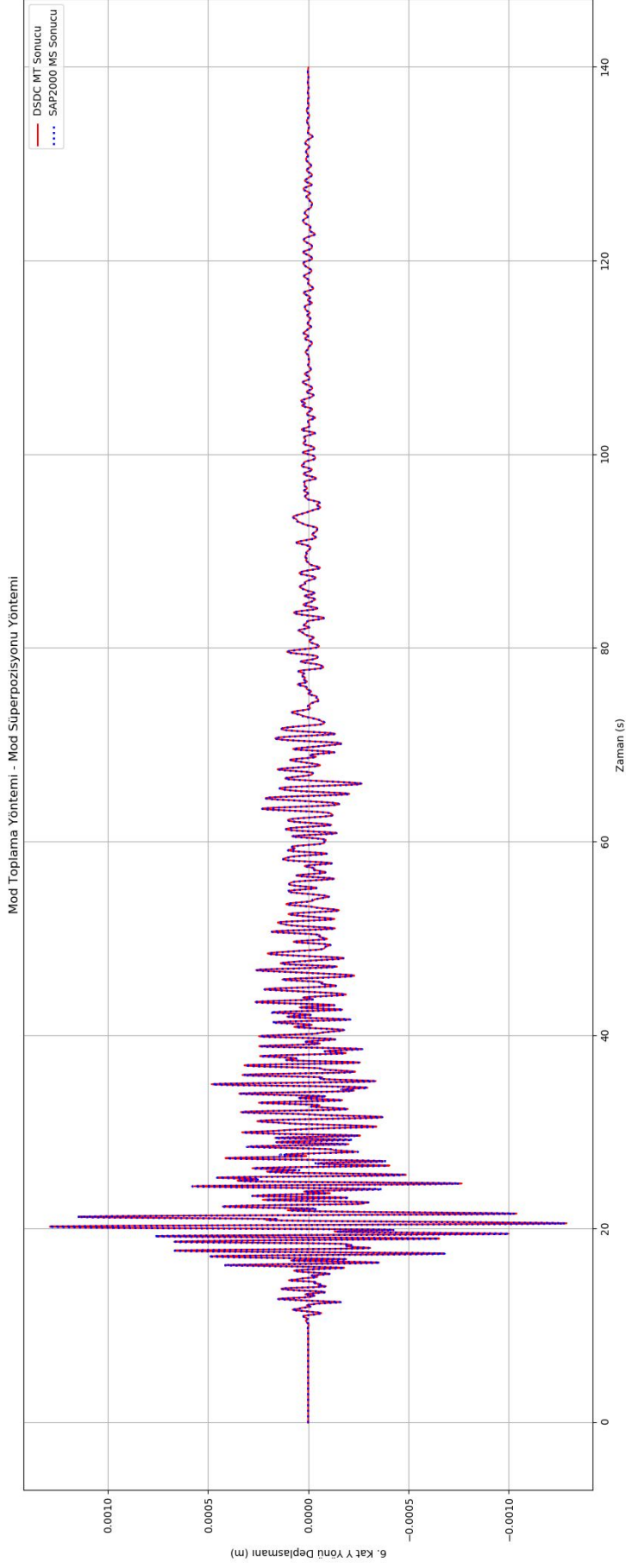
Şekil B.29 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RY dönmesi.



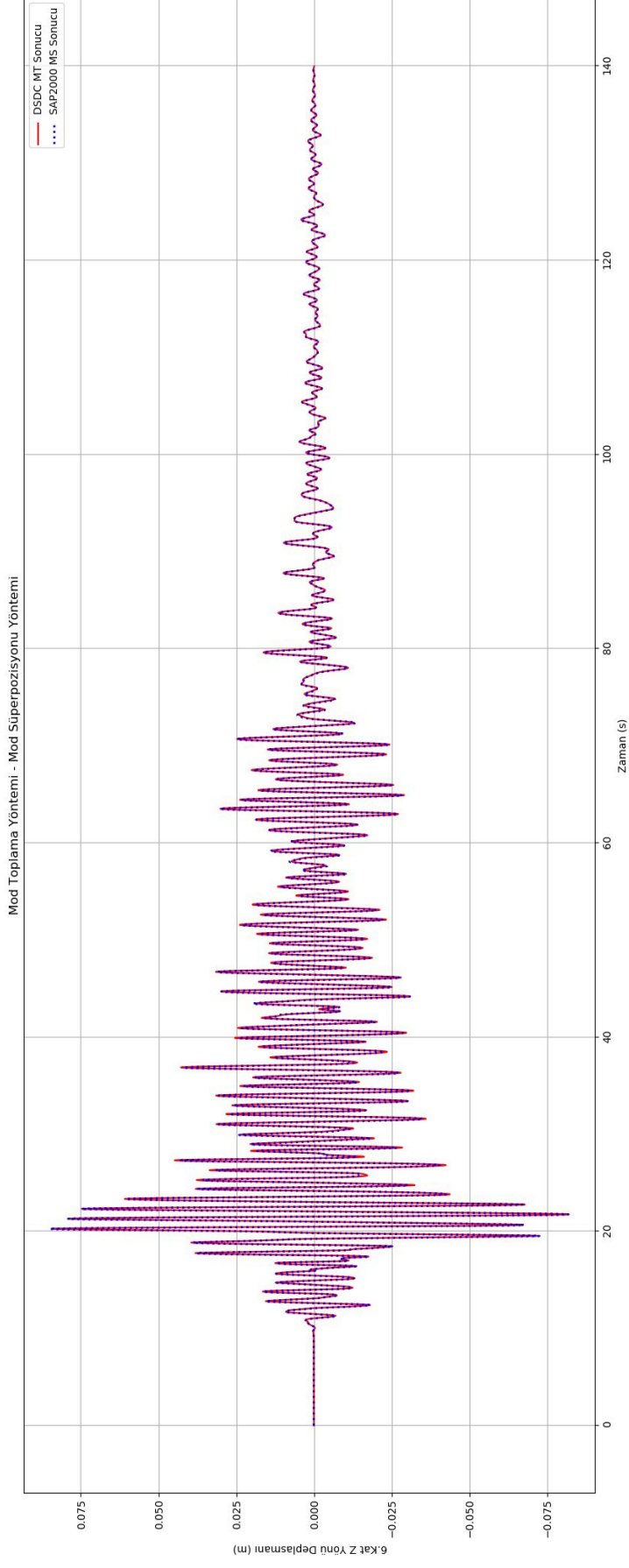
Şekil B.30 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RZ dönmesi.



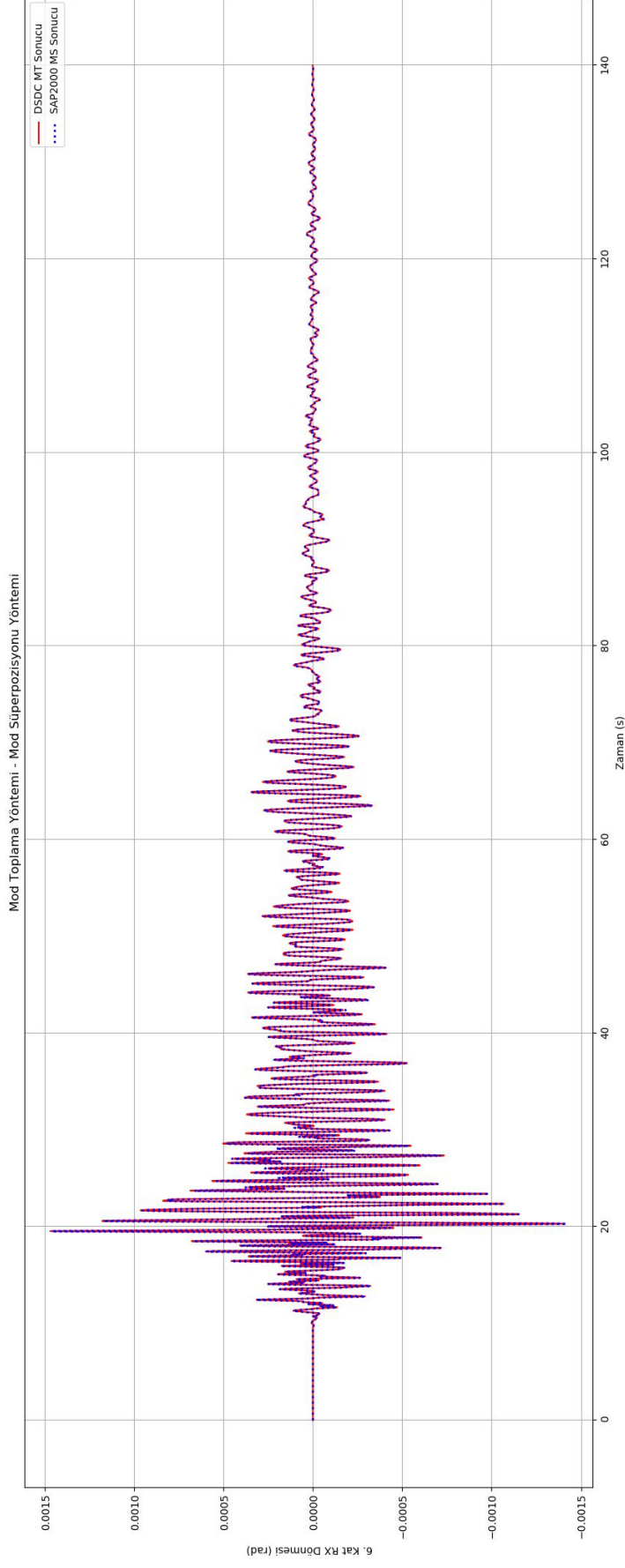
Şekil B.31 : 2A modeli Kobe depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.



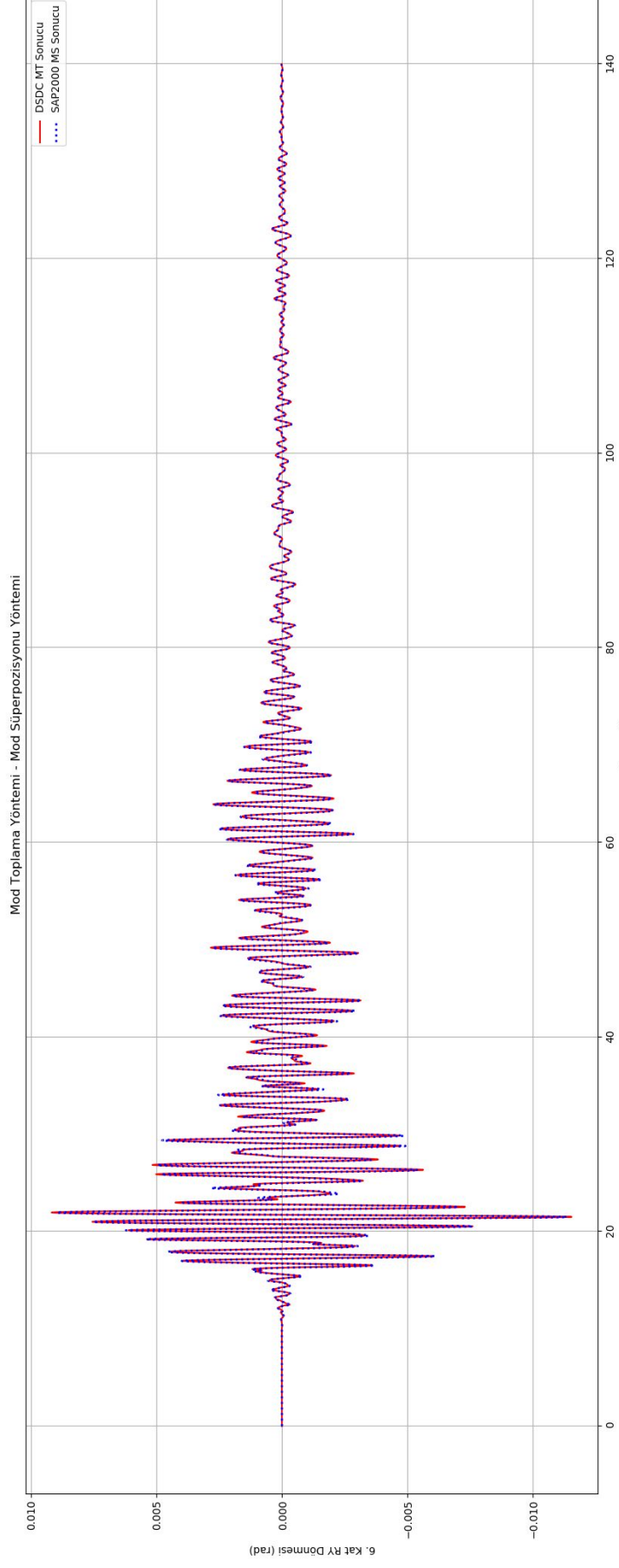
Şekil B.32 : 2A modeli Kobe depremi MT - MS Y yerdeğiştirilmesi.



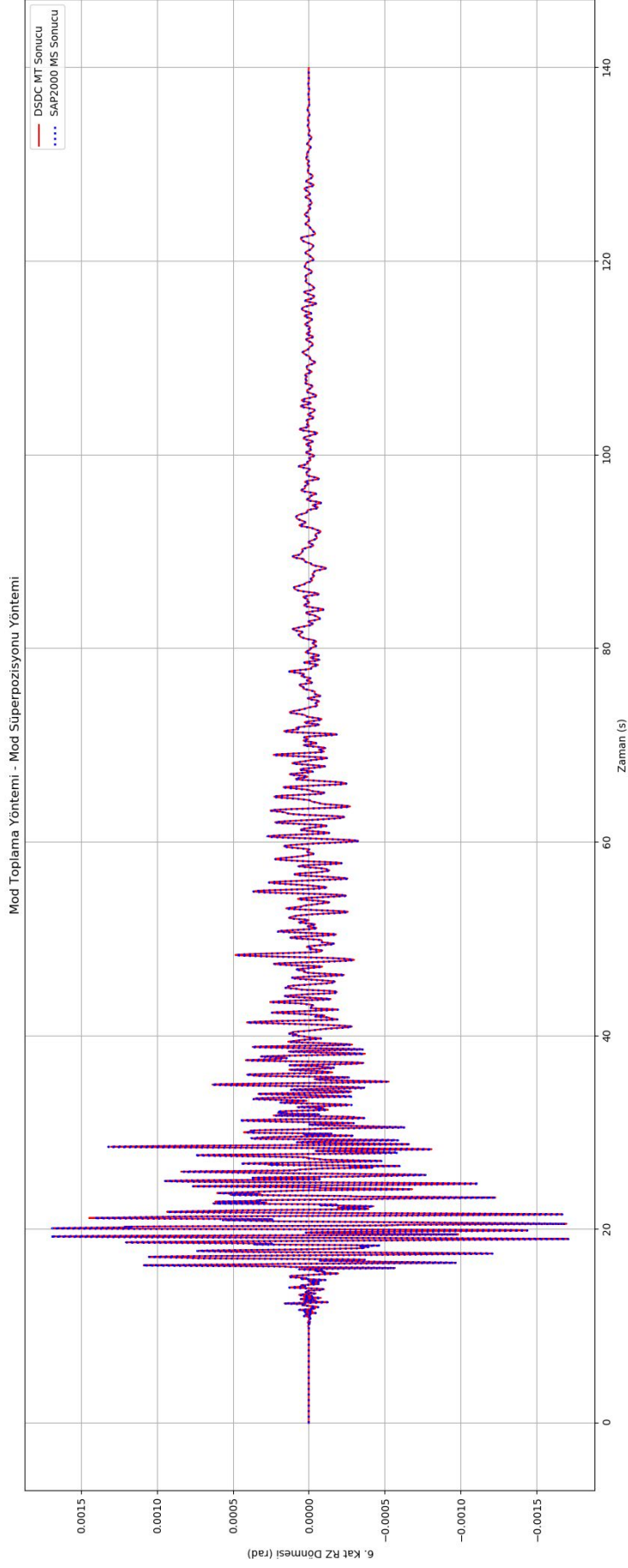
Şekil B.33 : 2A modeli Kobe depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.



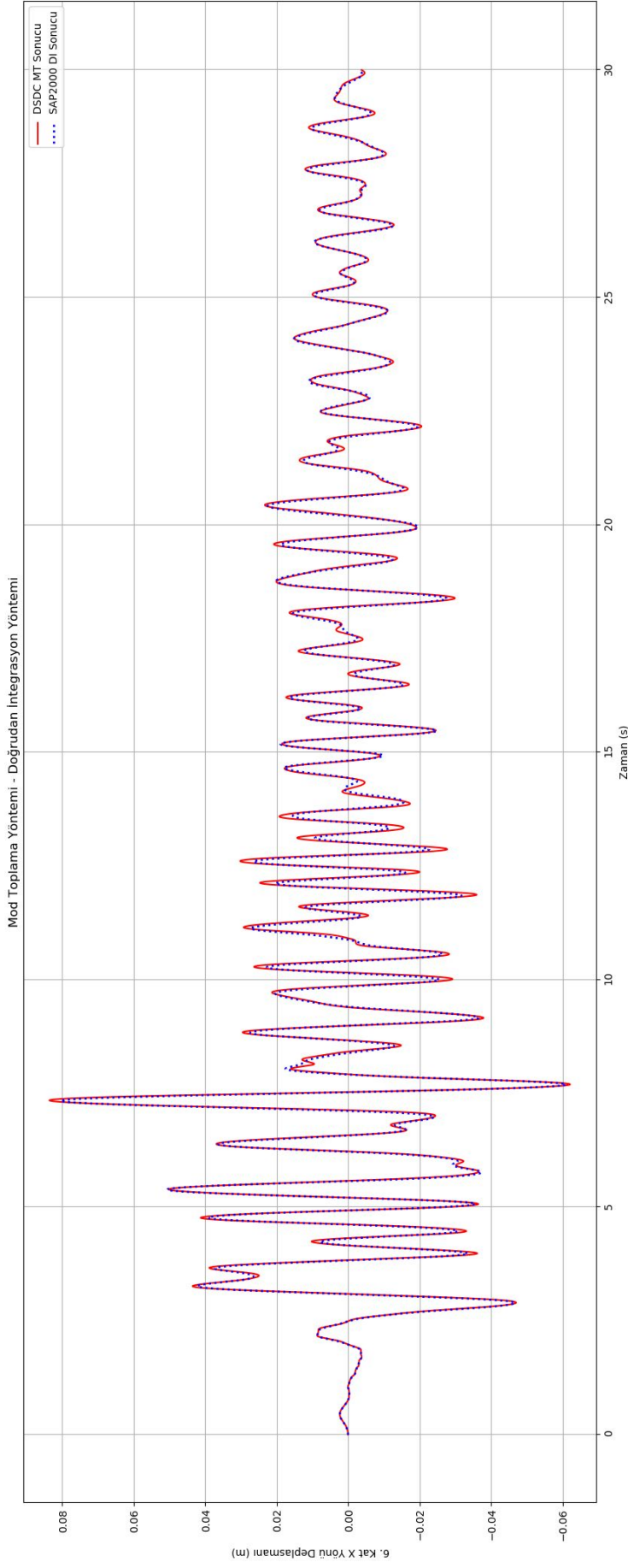
Şekil B.34 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.



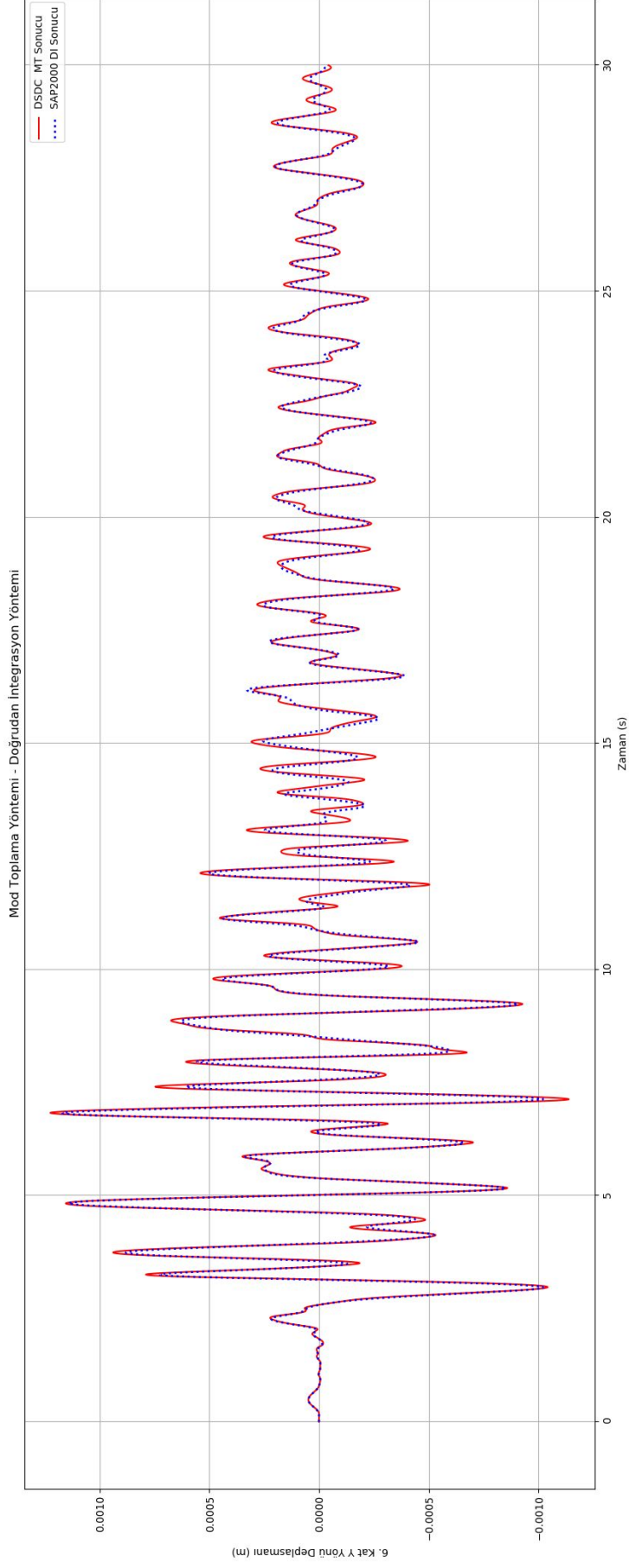
Şekil B.35 : 2A modelli Kobe depremi MT - MS RY dönmesi.



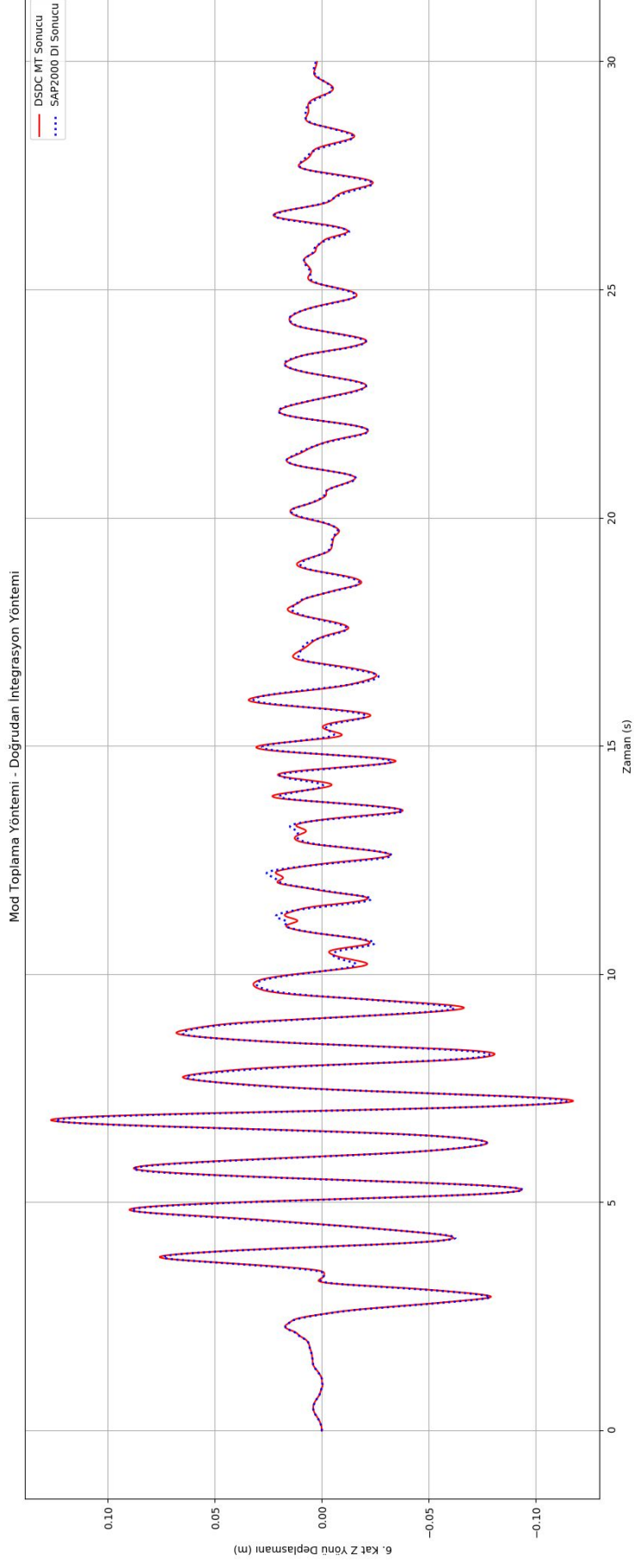
Şekil B.36 : 2A modeli Kobe depremi MT - MS RZ dönmesi.



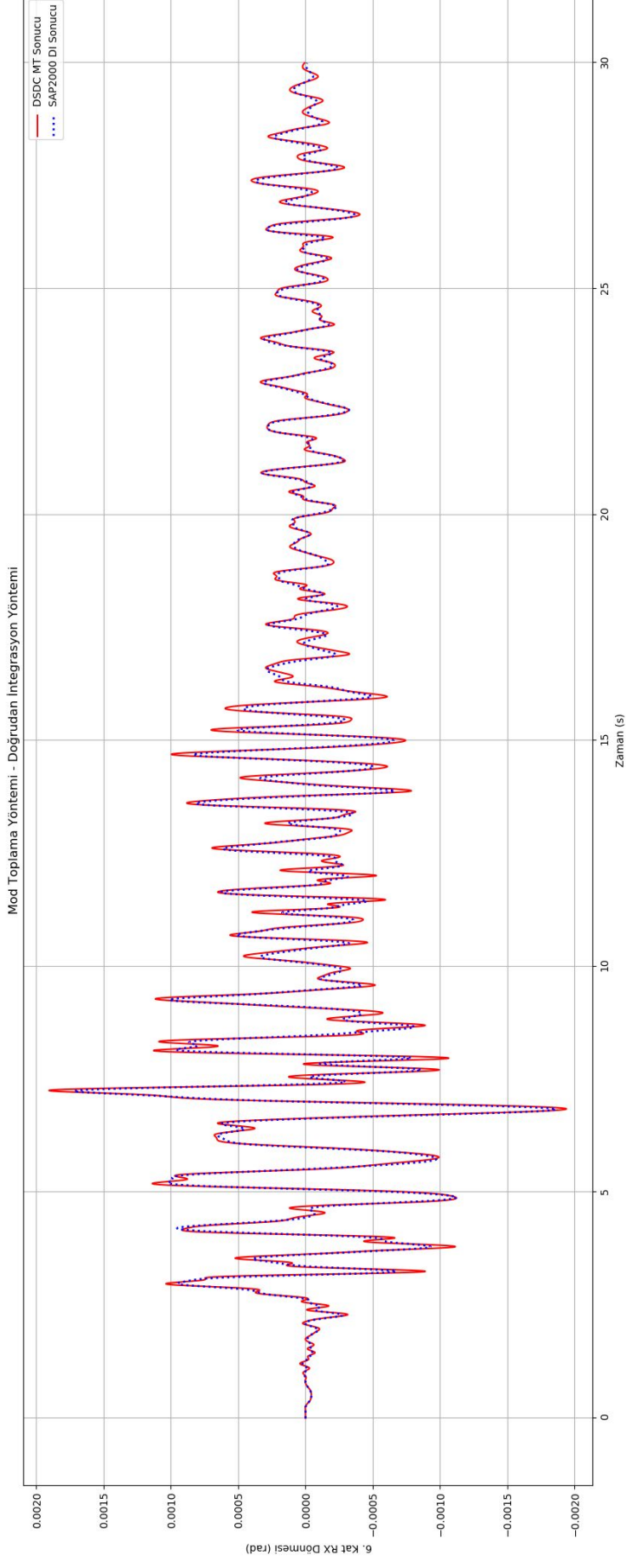
Şekil B.37 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.



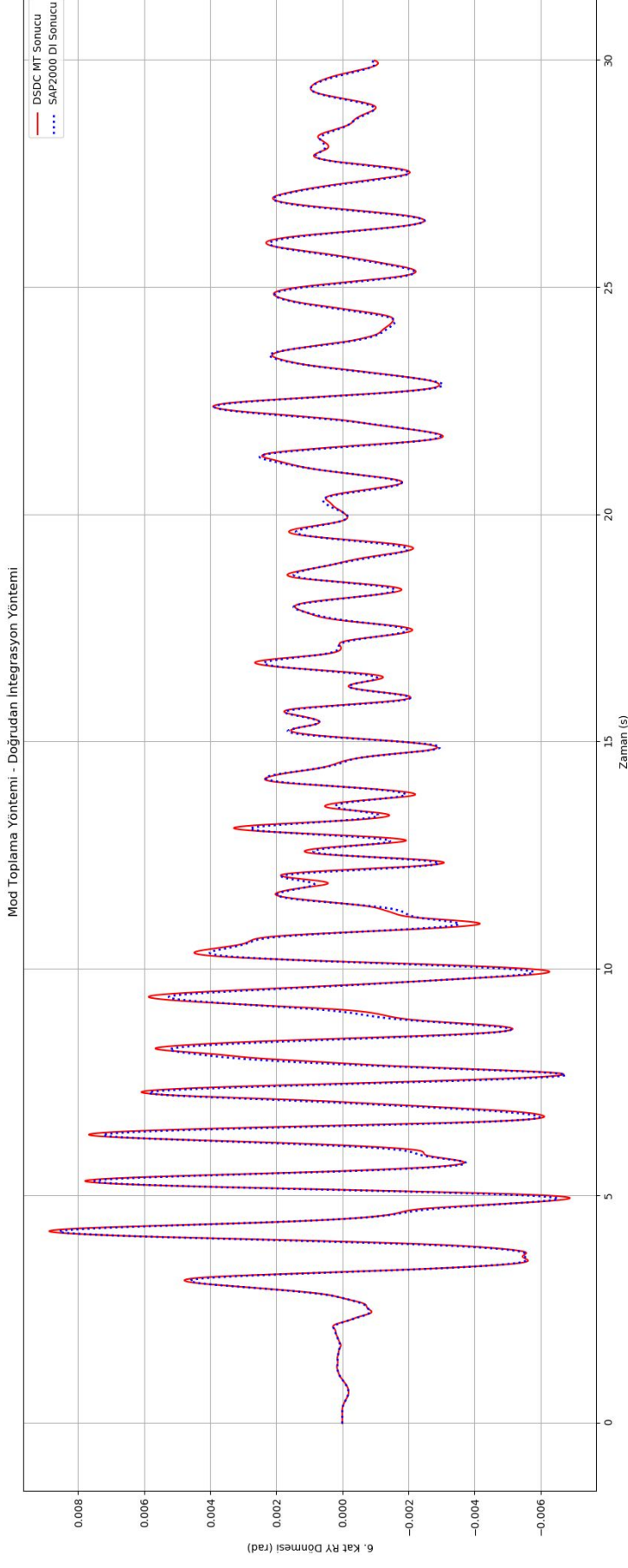
Şekil B.38 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.



Şekil B.39 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.

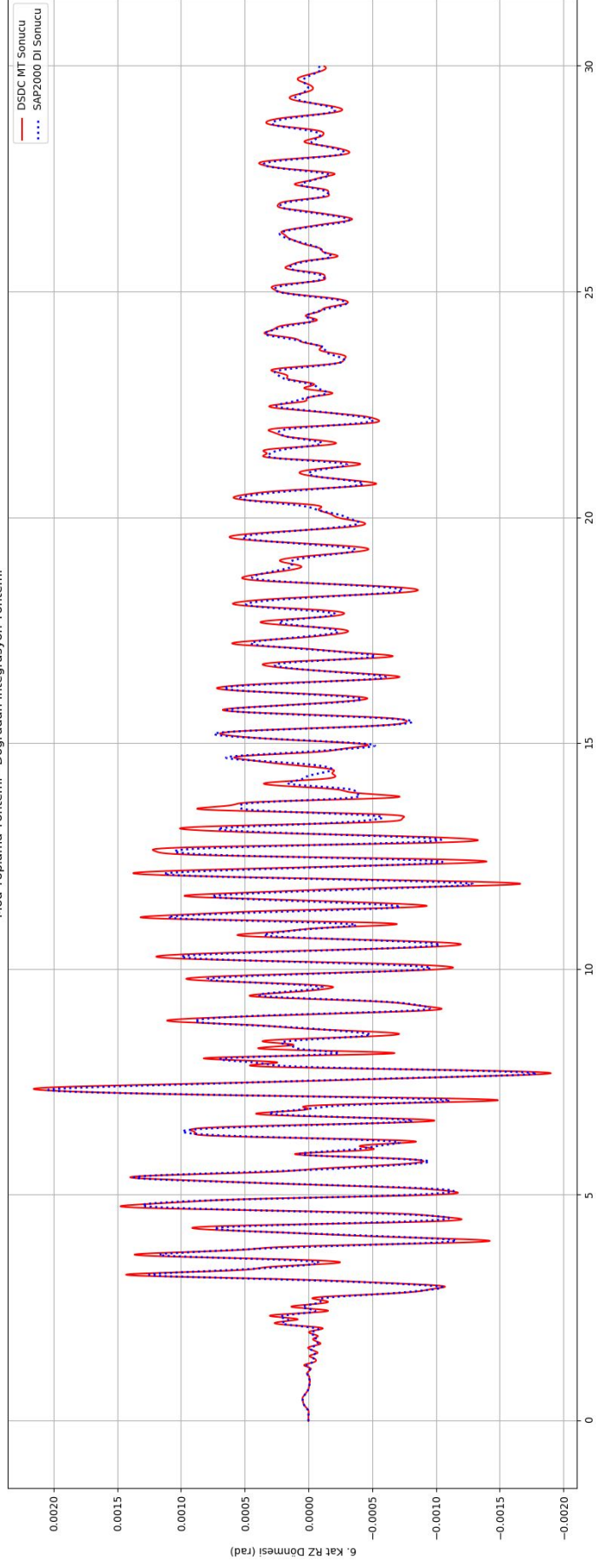


Şekil B.40 : 2A modelli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.

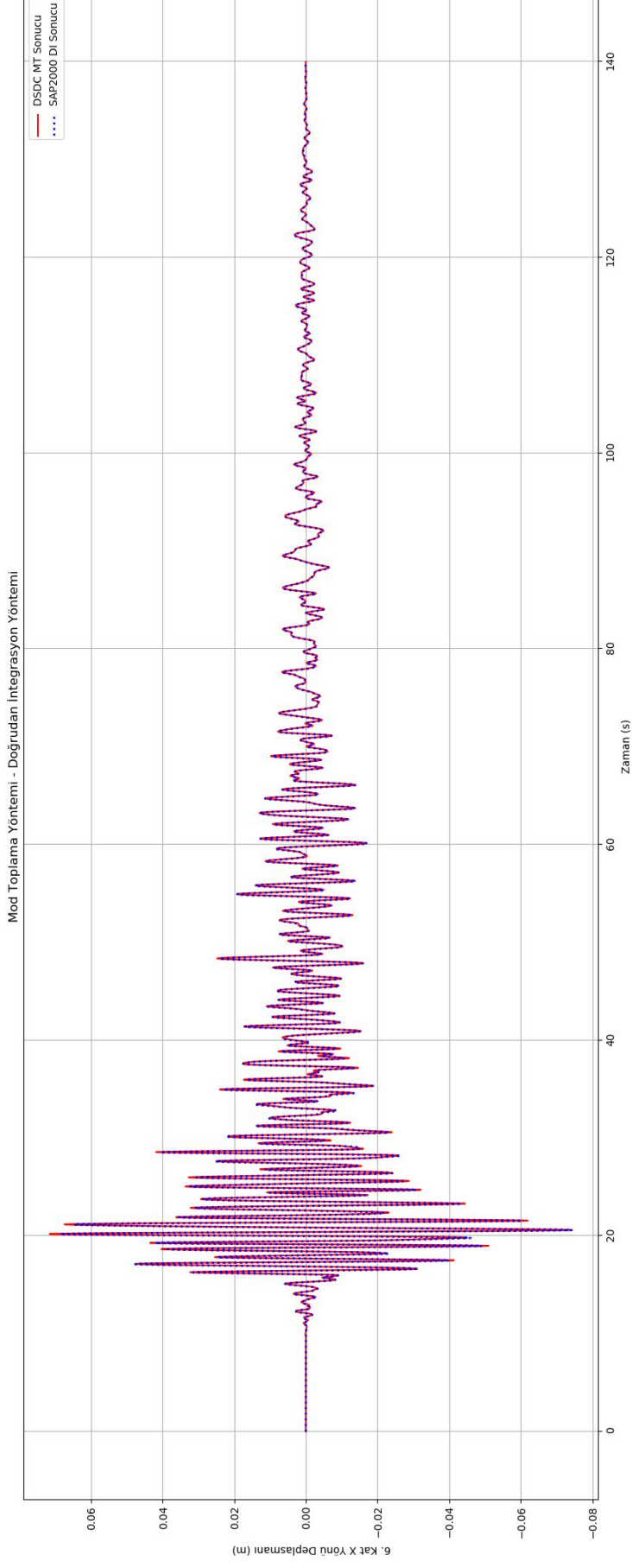


Şekil B.41 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RY dönmesi.

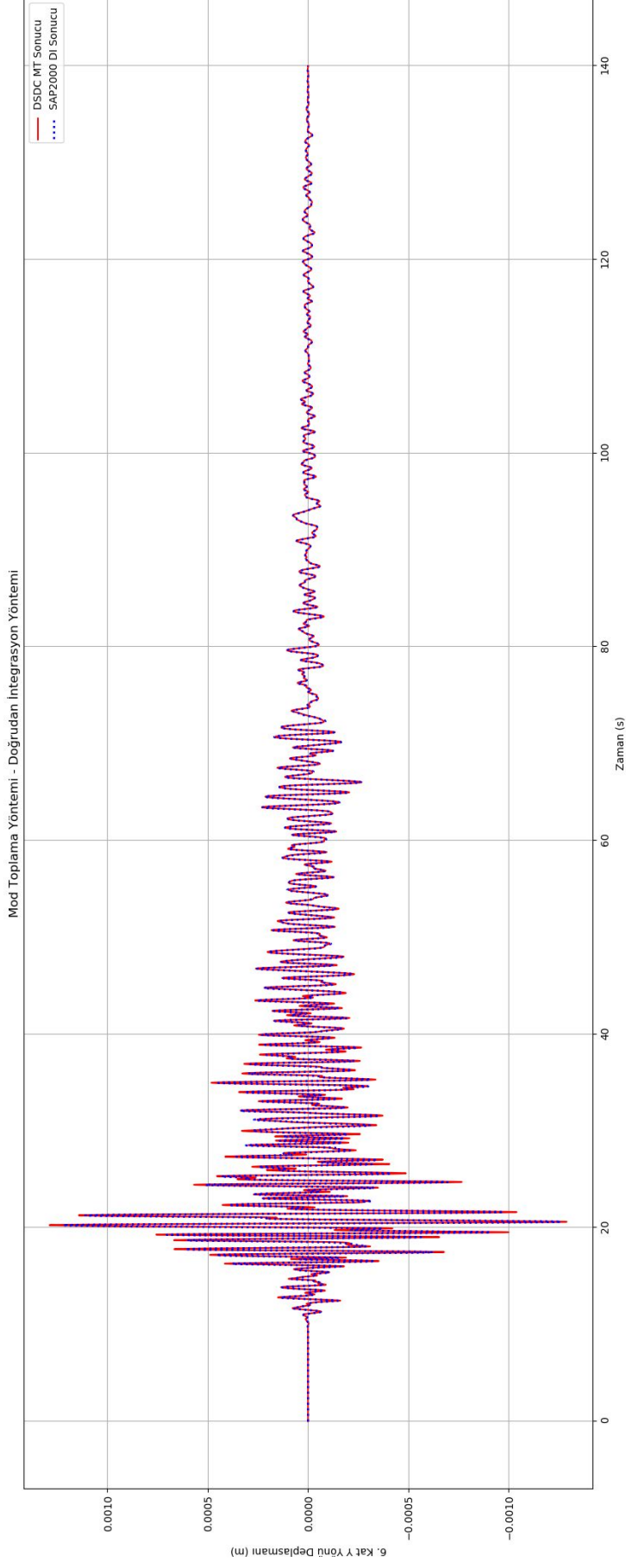
Mod Toplama Yöntemi - Doğrudan İntegrasyon Yöntemi



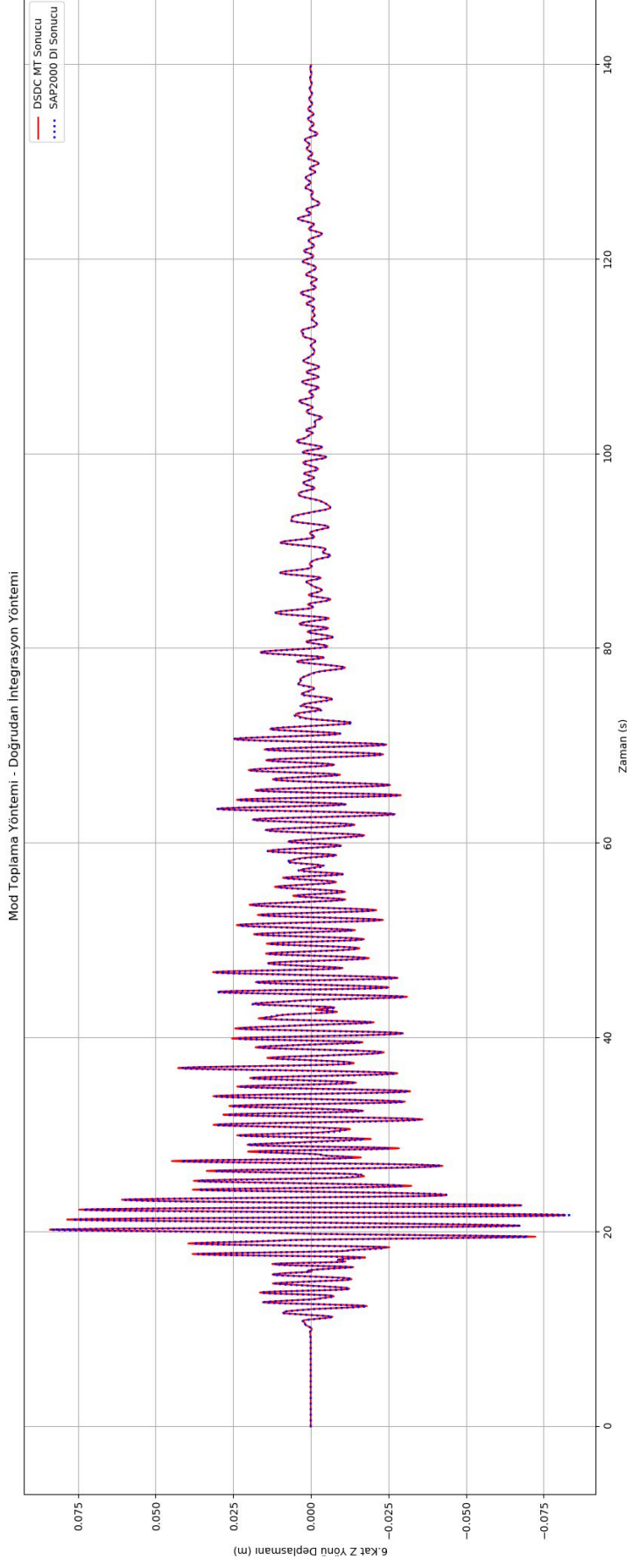
Şekil B.42 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RZ dönmesi.



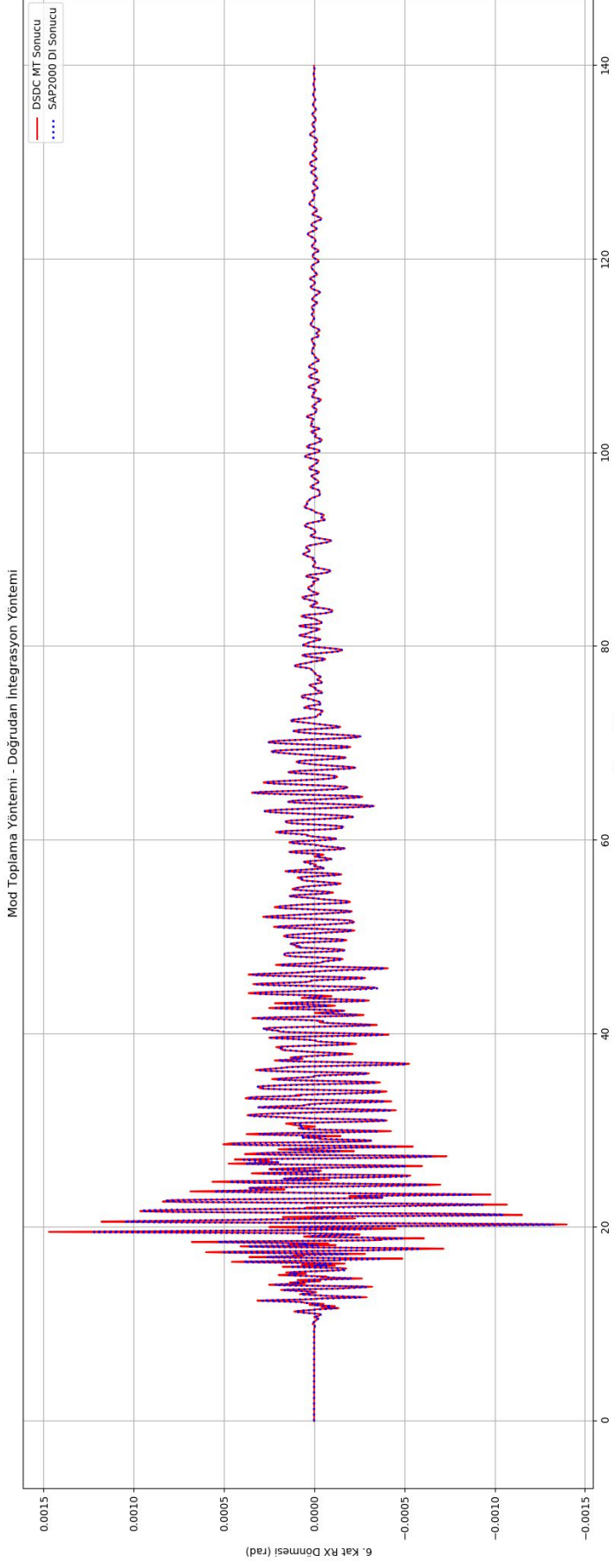
Şekil B.43 : 2A modelli Kobe depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.



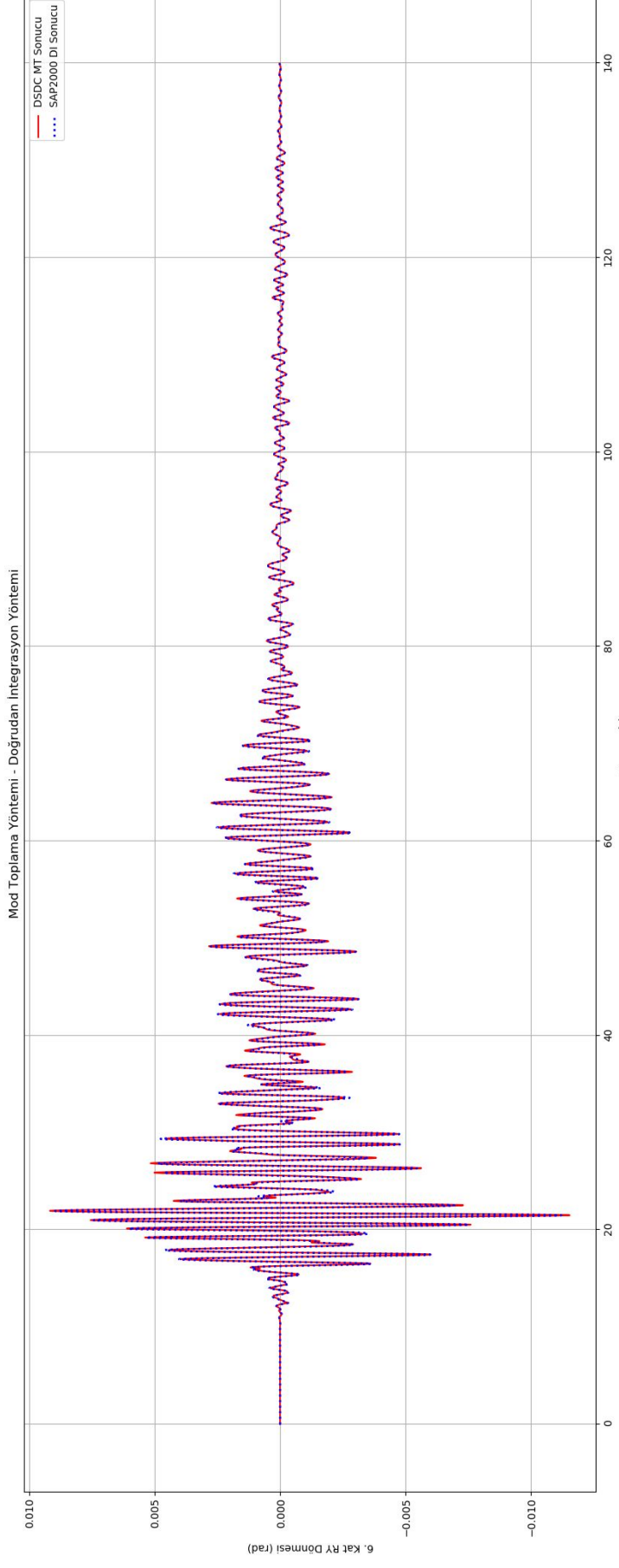
Şekil B.44 : 2A modelli Kobe depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.



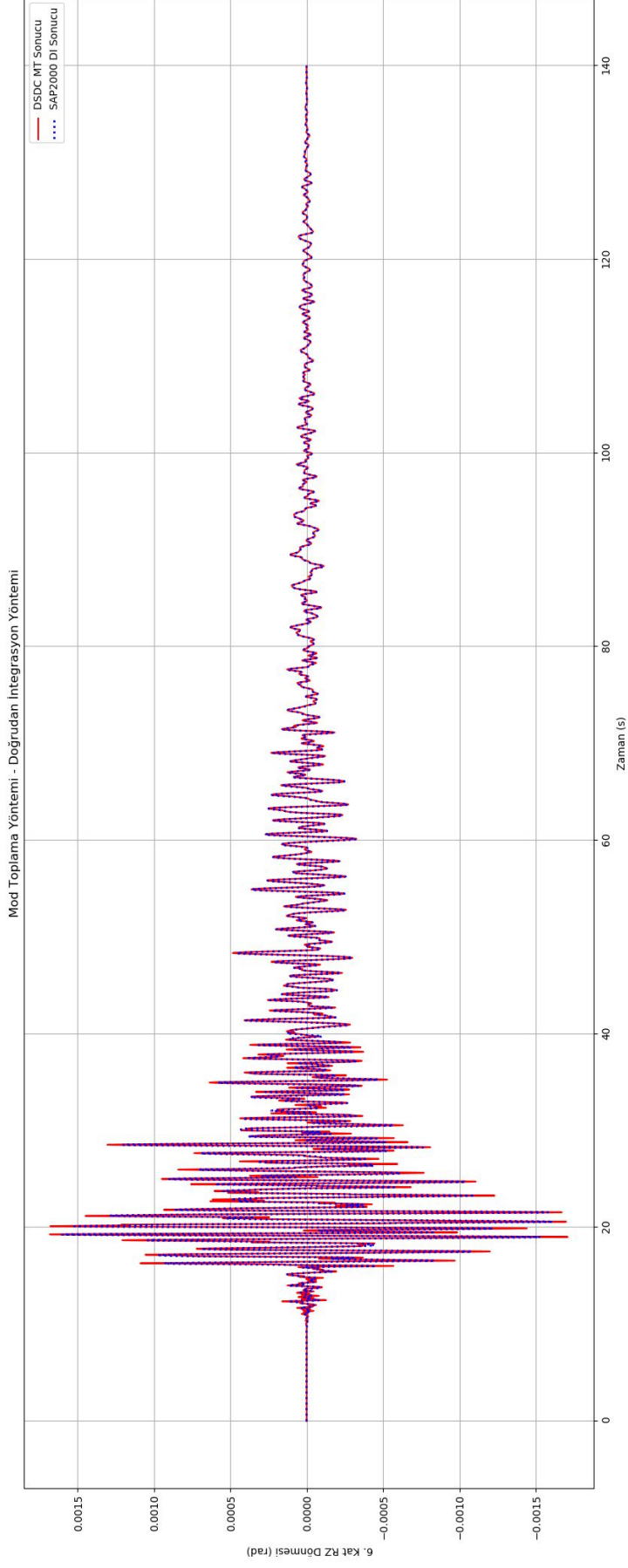
Şekil B.45 : 2A modelli Kobe depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.



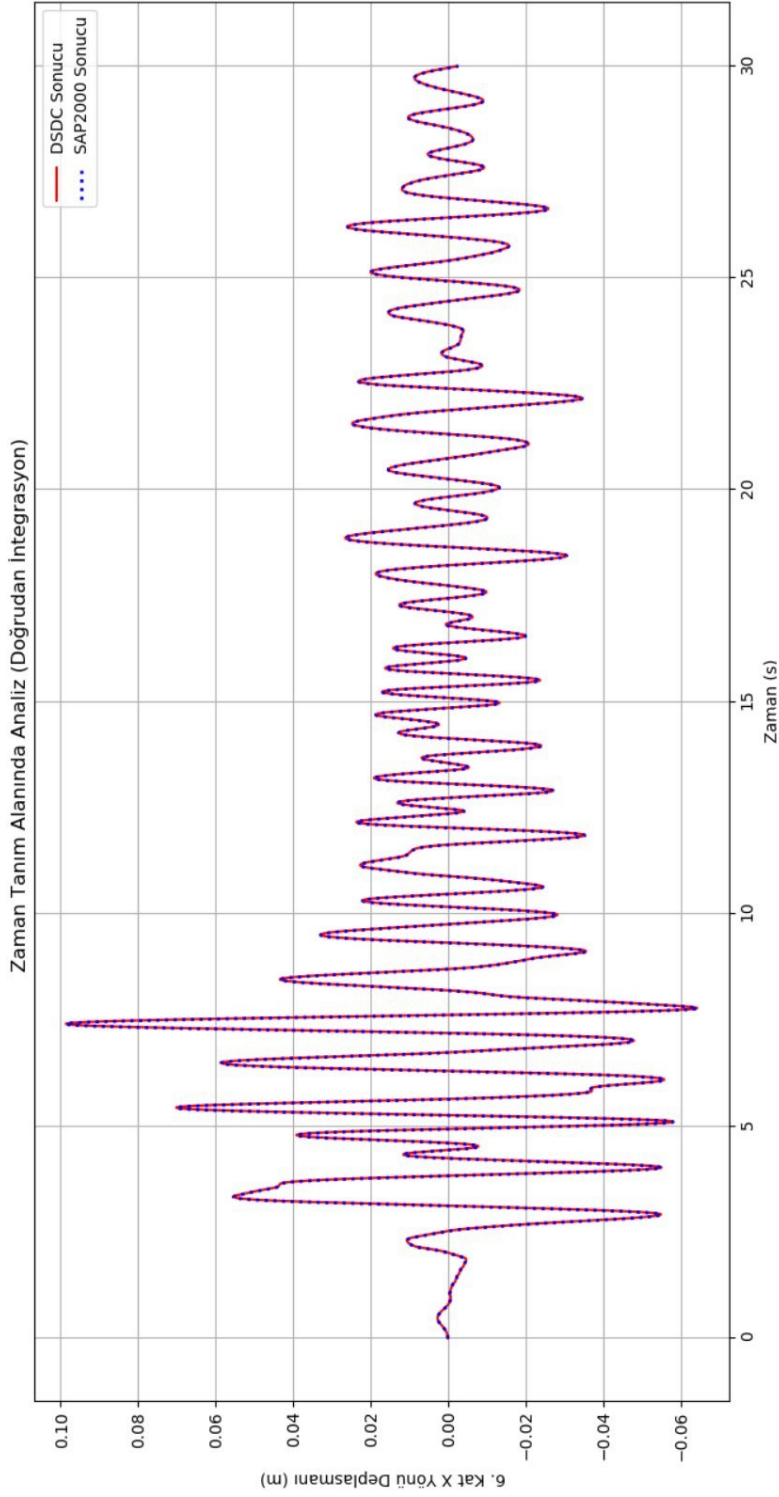
Şekil B.46 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.



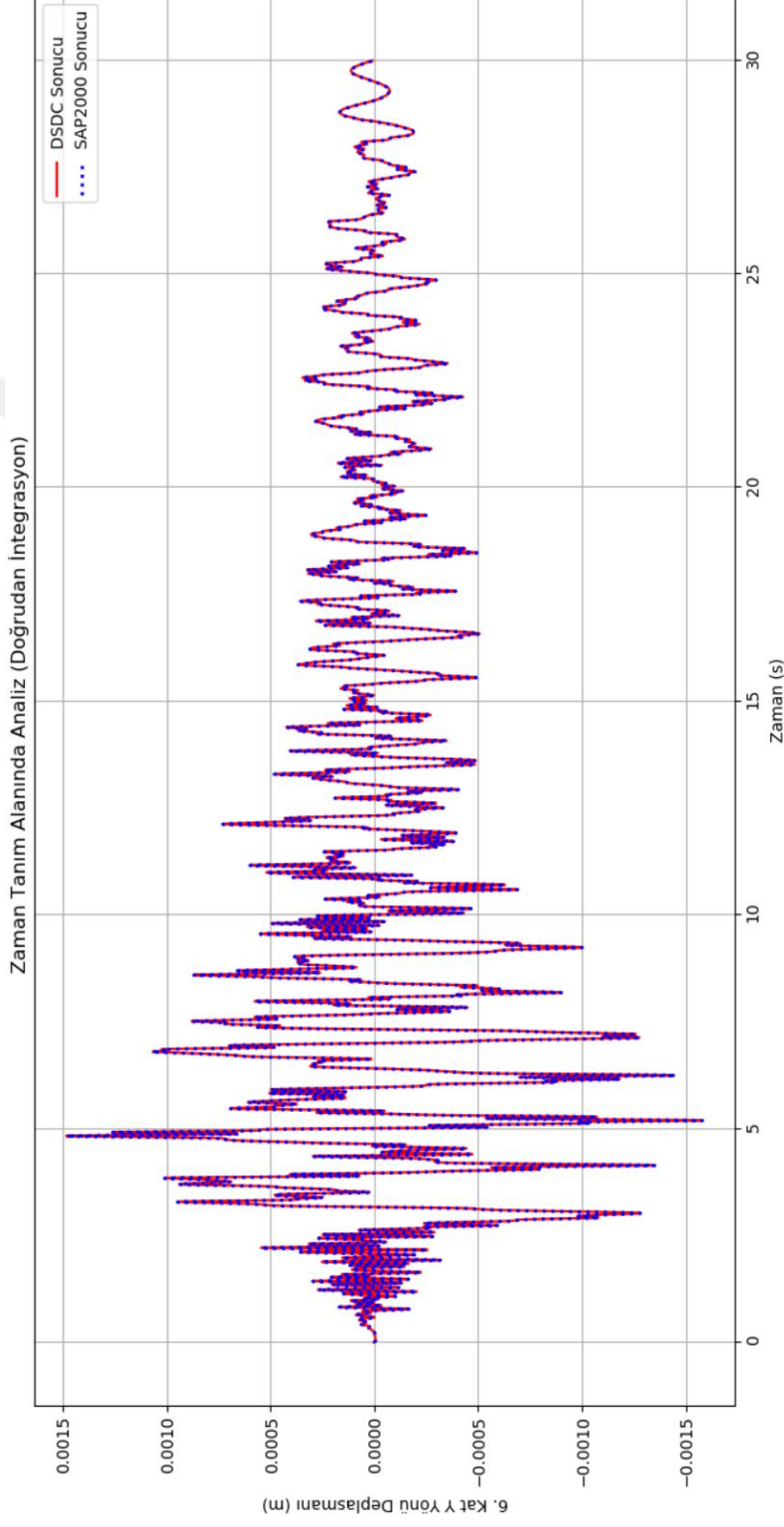
Şekil B.47 : 2A modelli Kobe depremi MT - DI RY dönmesi.



Şekil B.48 : 2A modelli Kobe depremi MT - DI RZ dönmesi.

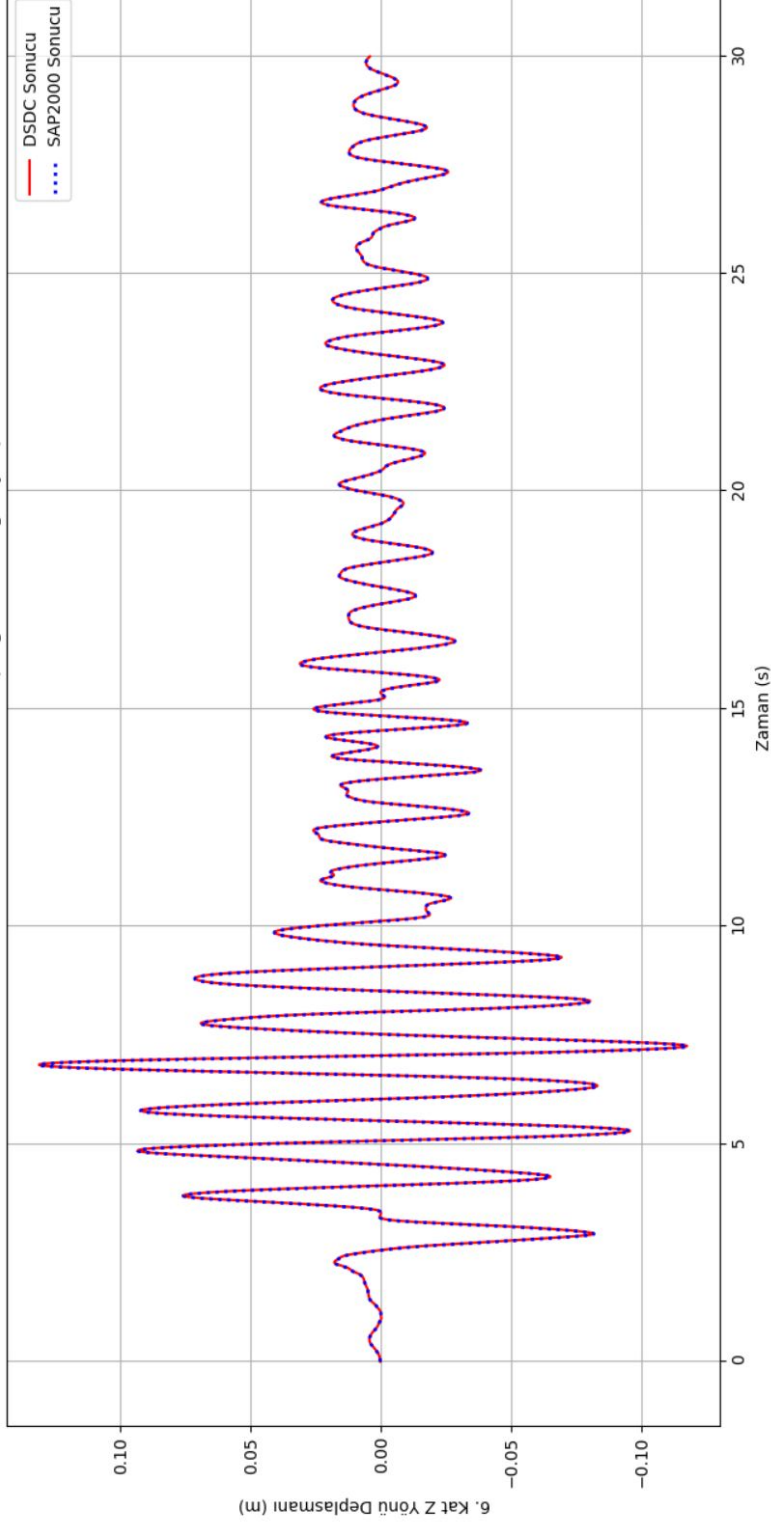


Şekil B.49 : 2B modelli Kocaeli depremi DI X yerdeğiştirmesi.

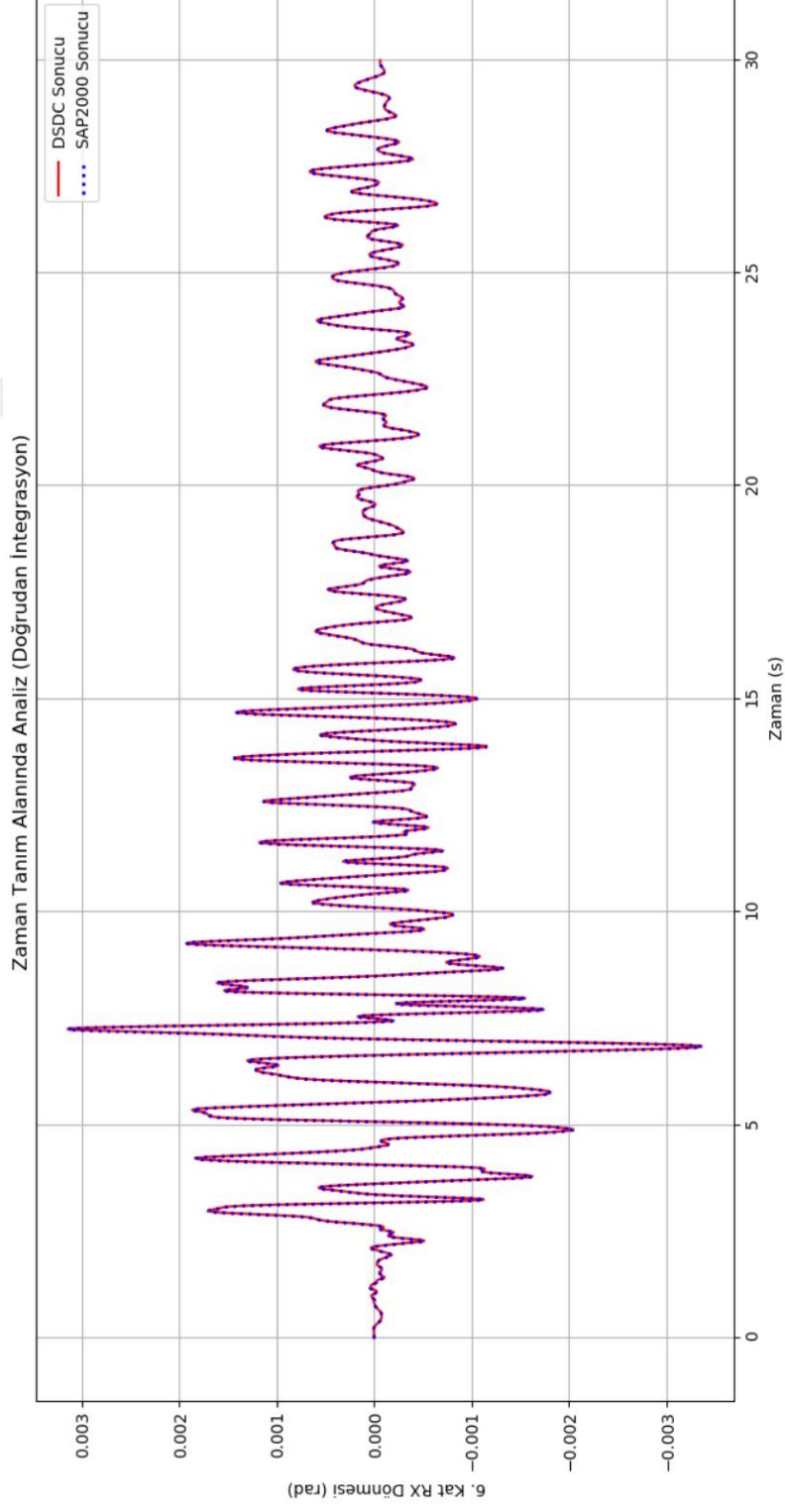


Şekil B.50 : 2B modelli Kocaeli depremi DI Y yerdeğiştirilmesi.

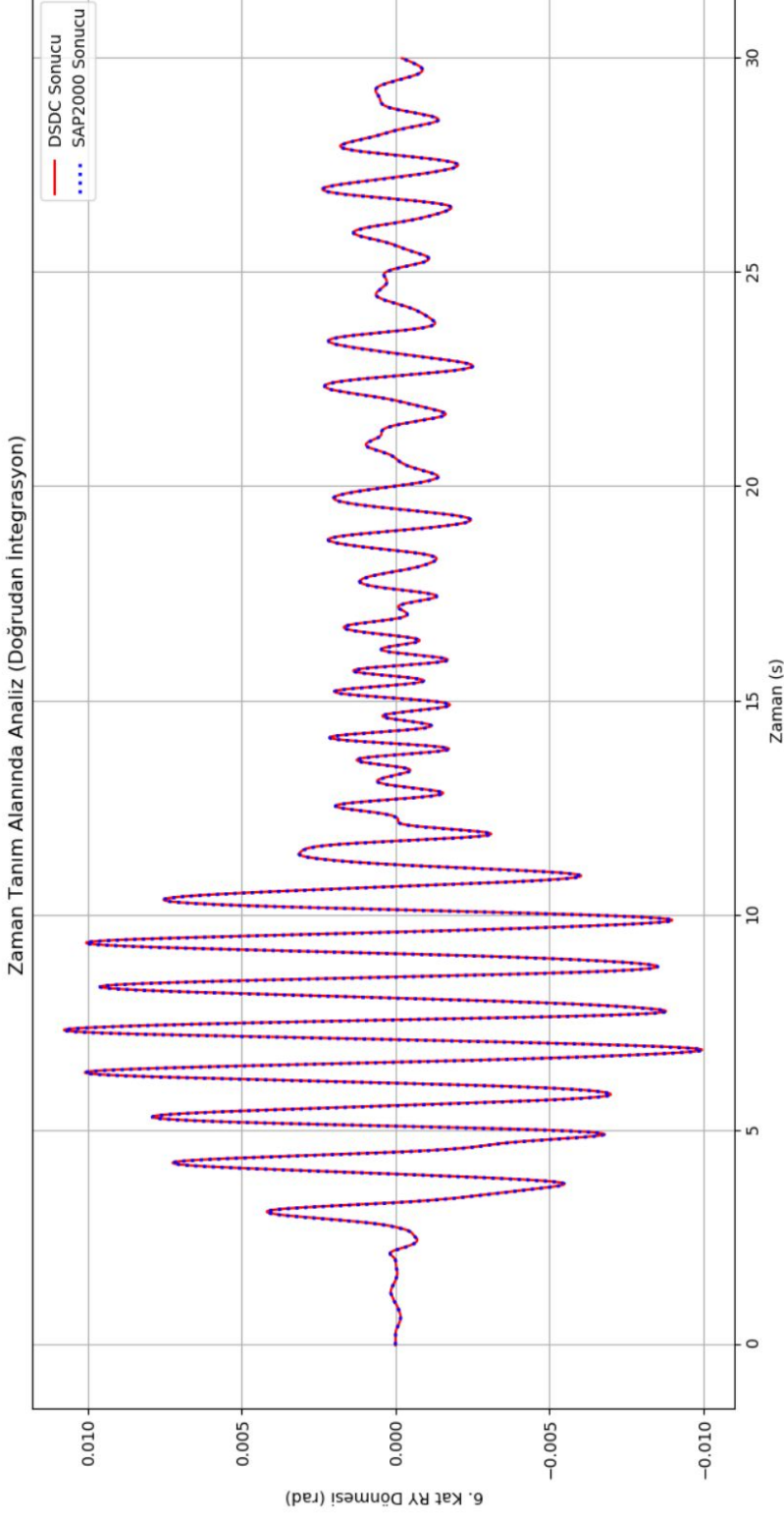
Zaman Tanım Alanında Analiz (Doğrudan İntegrasyon)



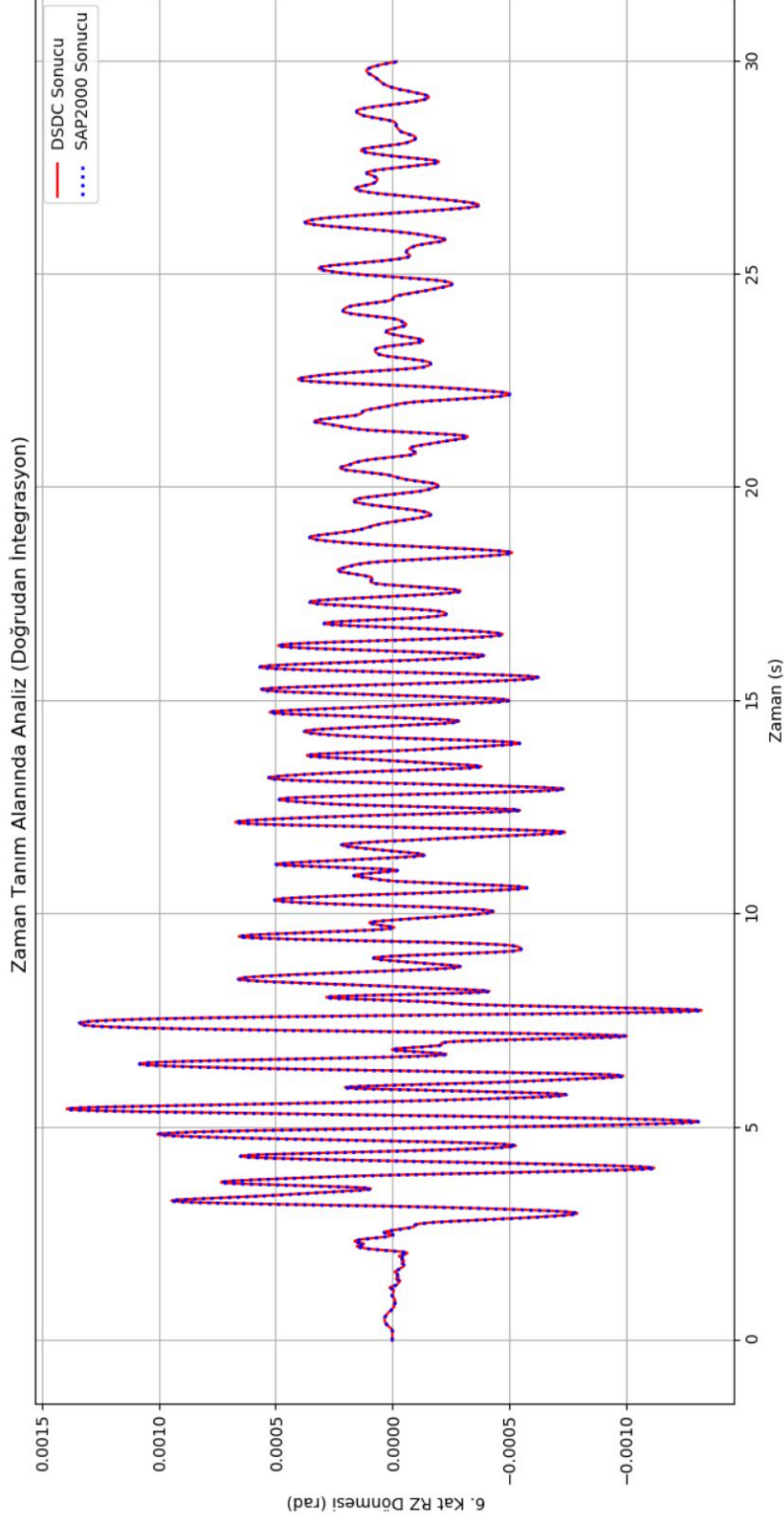
Şekil B.51 : 2B modelli Kocaeli depremi DI Z yerdeğiştirilmesi.



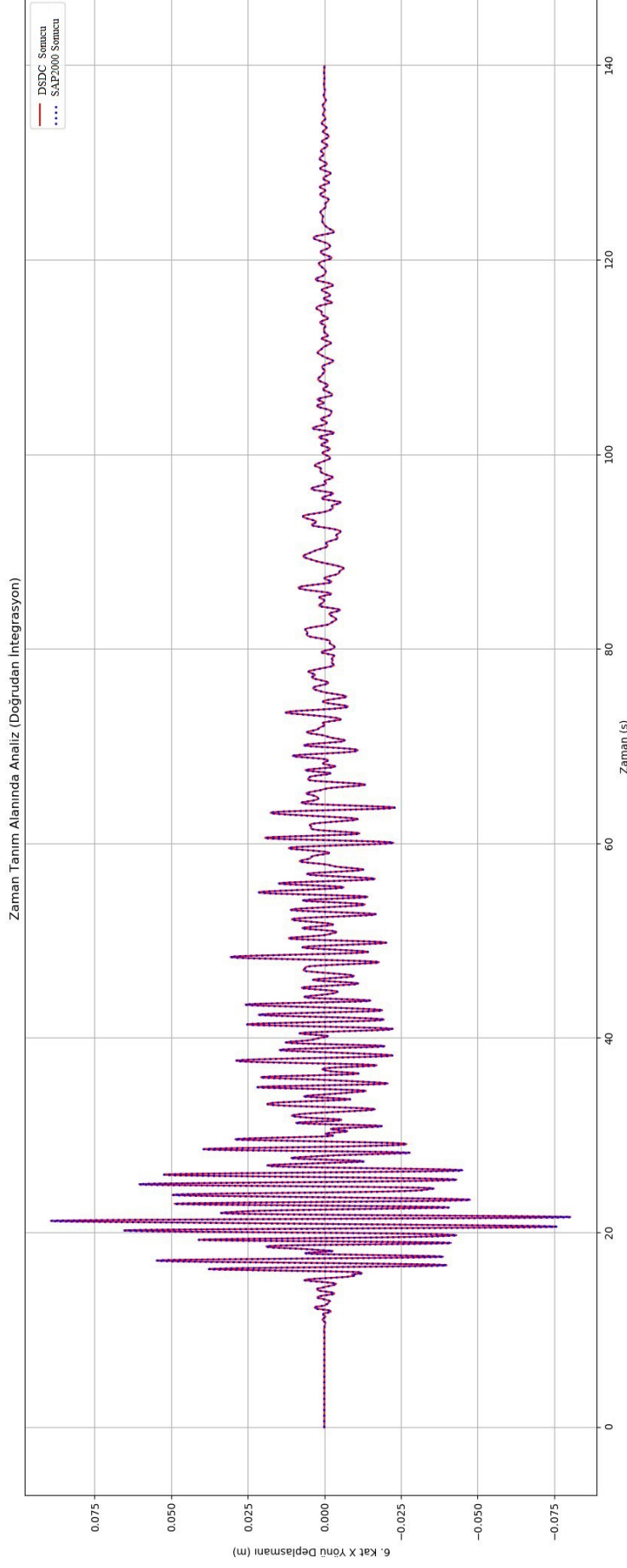
Şekil B.52 : 2B modeli Kocaeli depremi DI RX dönmesi.



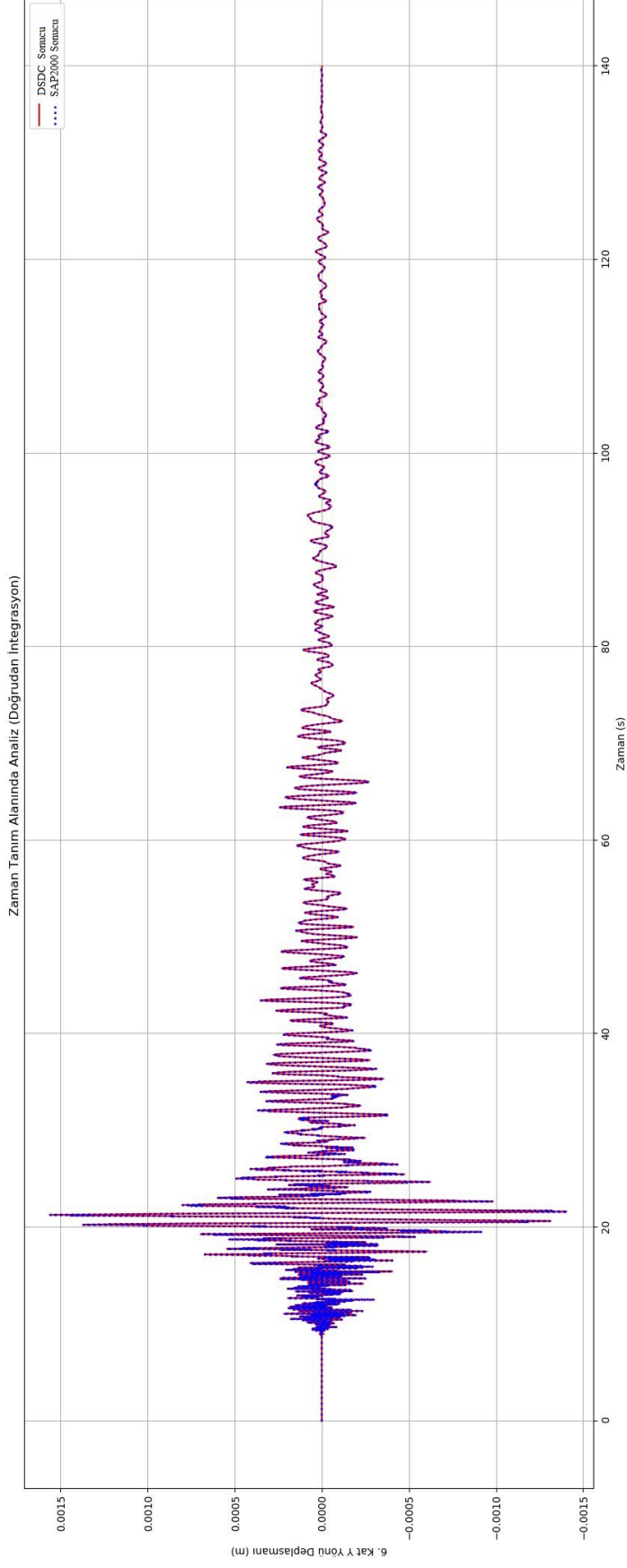
Şekil B.53 : 2B modeli Kocaeli depremi DI RY dönmesi.



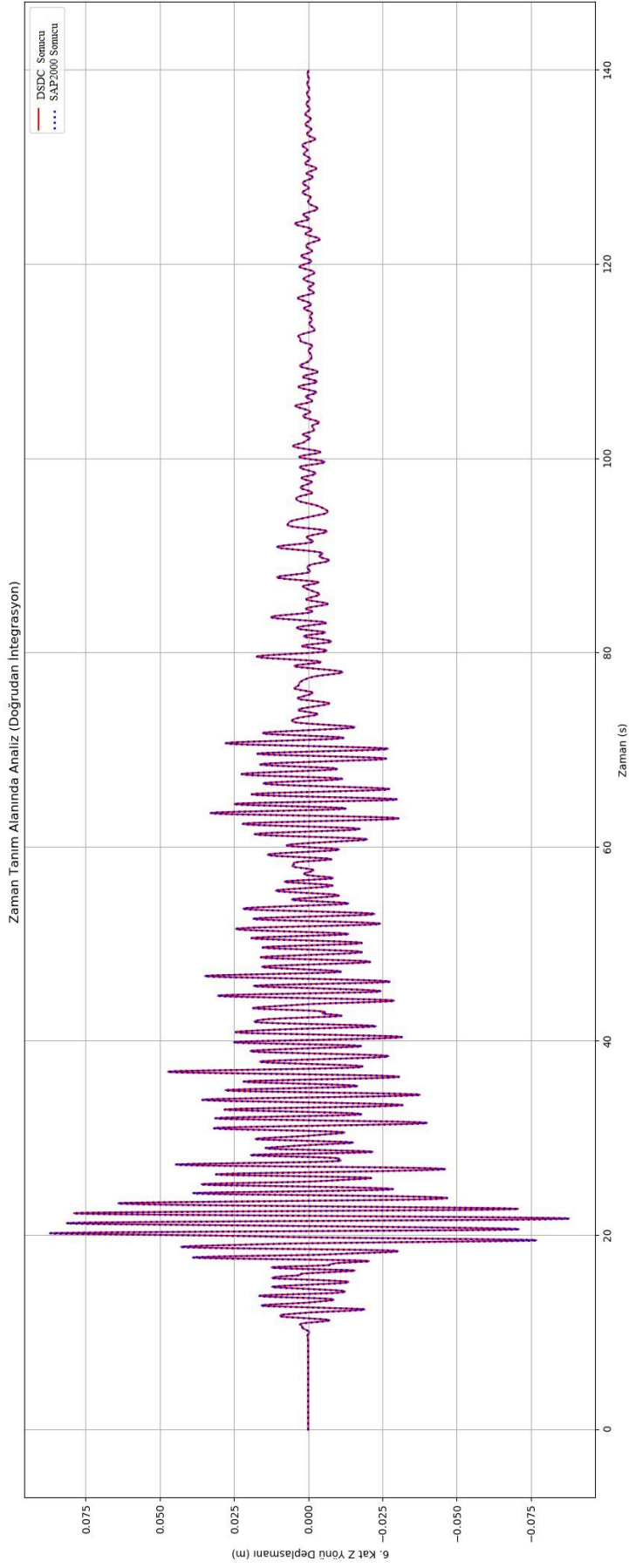
Şekil B.54 : 2B modeli Kocaeli depremi DI RZ dönmesi.



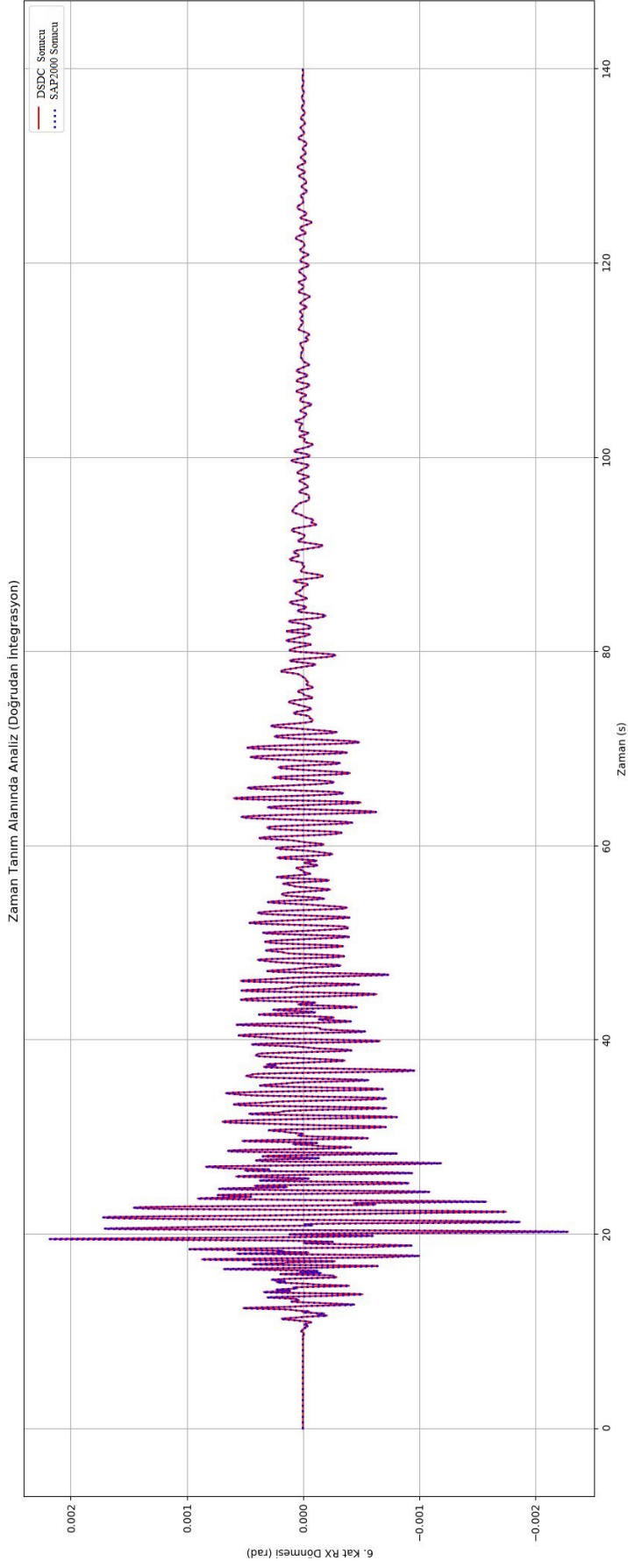
Şekil B.55 : 2B modelli Kobe depremi DI X yerdeğiştirmesi.



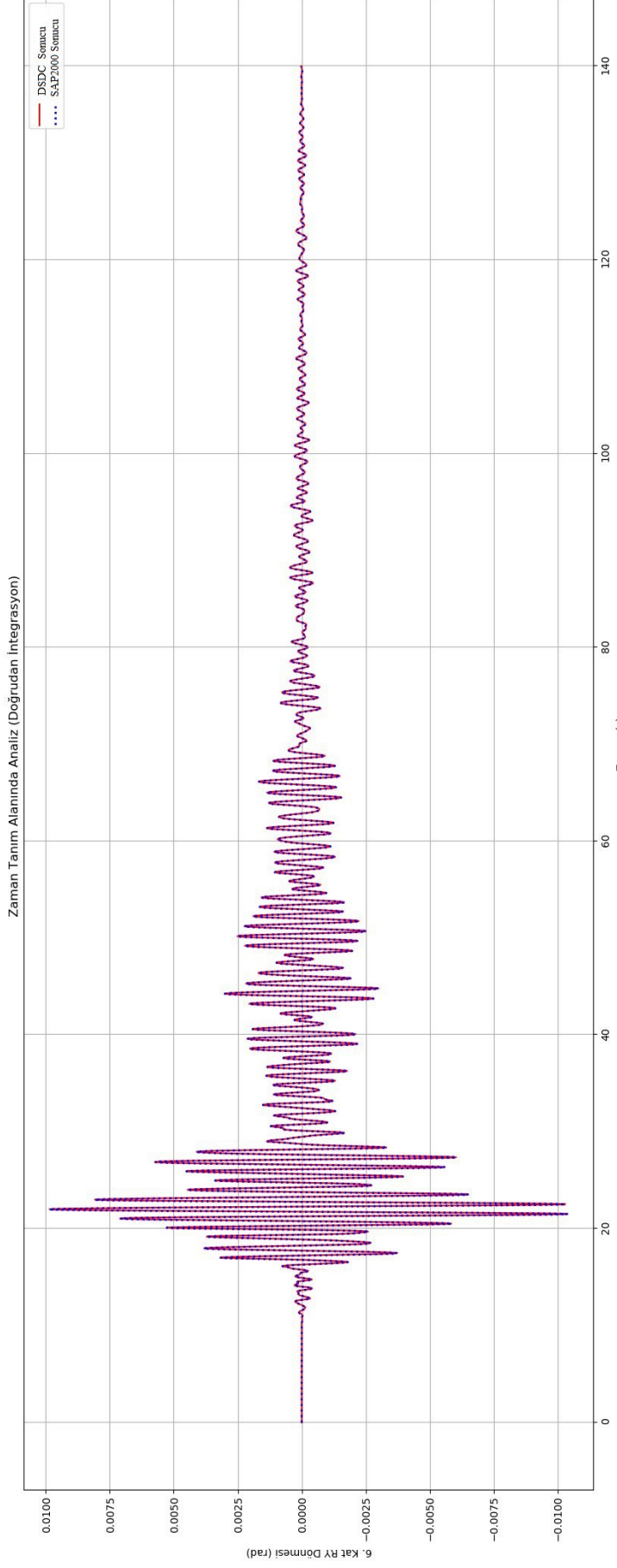
Şekil B.56 : 2B modelli Kobe depremi DI Y yerdeğiştirilmesi.



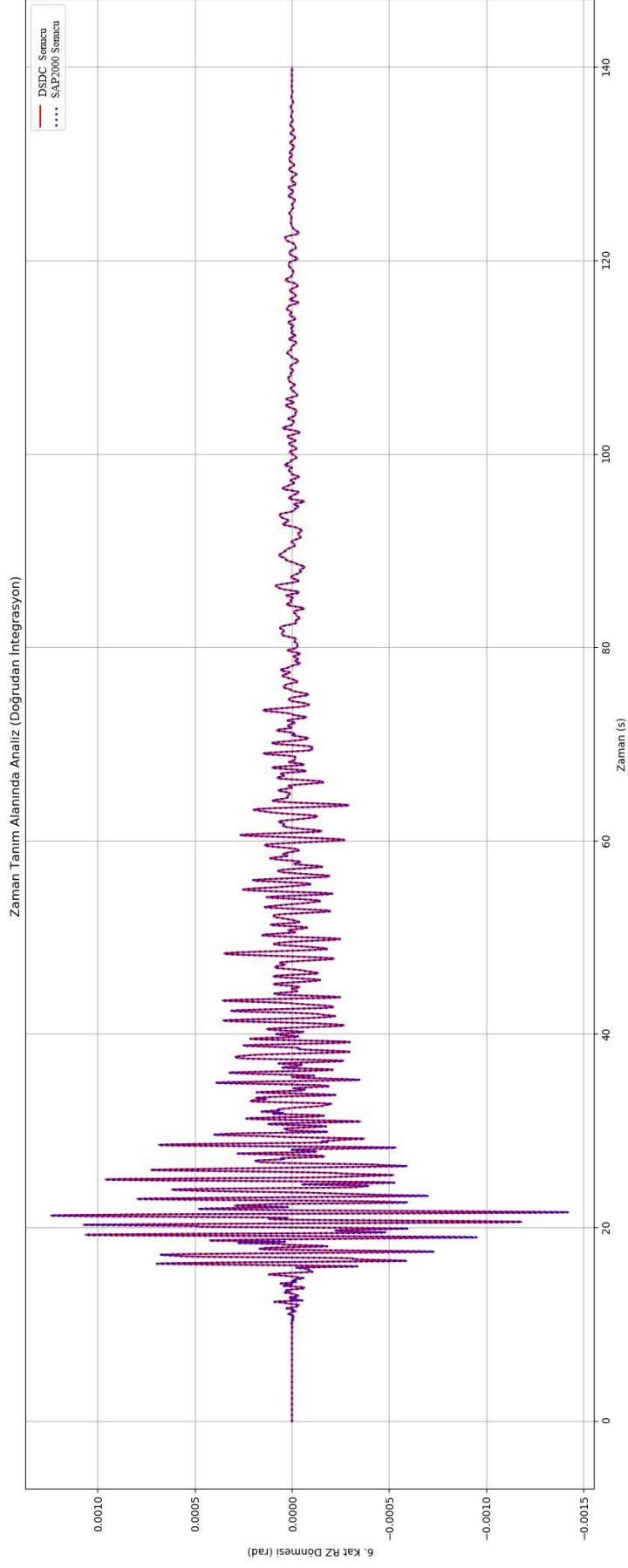
Şekil B.57 : 2B modelli Kobe depremi DI Z yerdeğiştirilmesi.



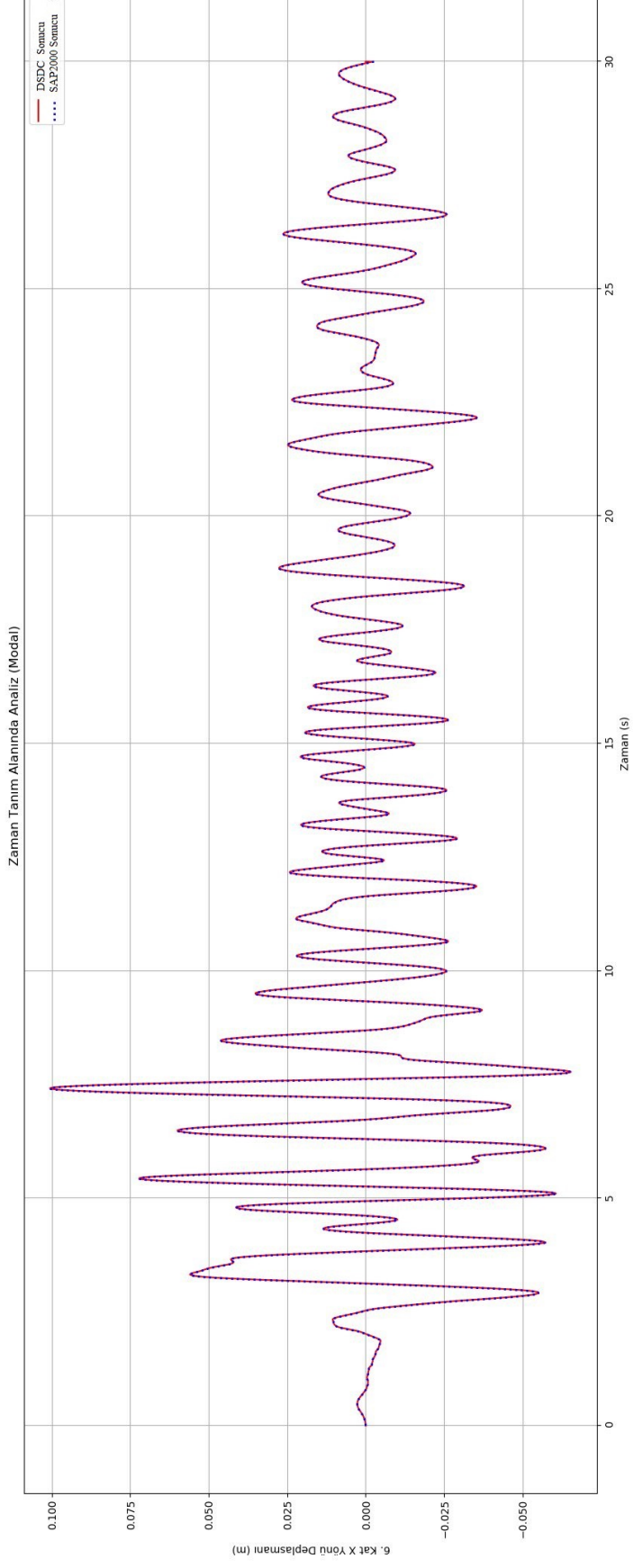
Şekil B.58 : 2B modelli Kobe depremi DI RX dönmesi.



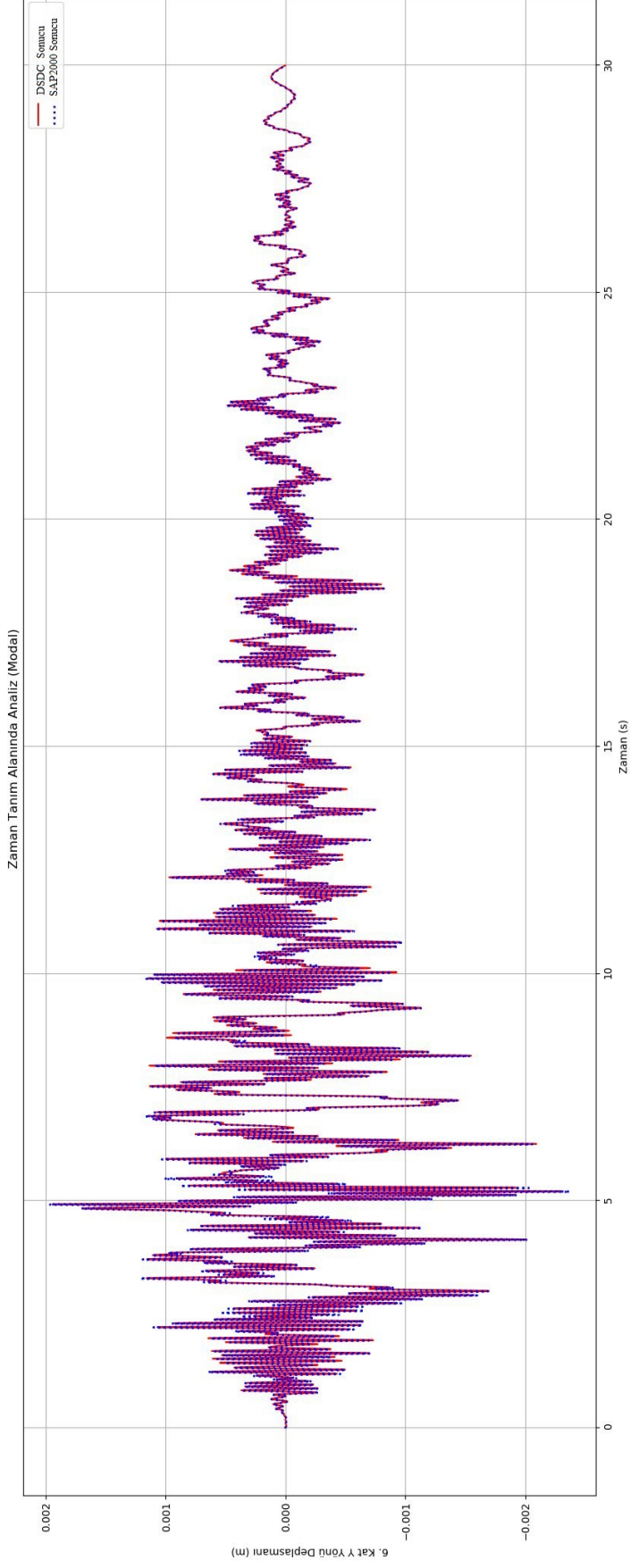
Şekil B.59 : 2B modeli Kobe depremi DI RY dönmesi.



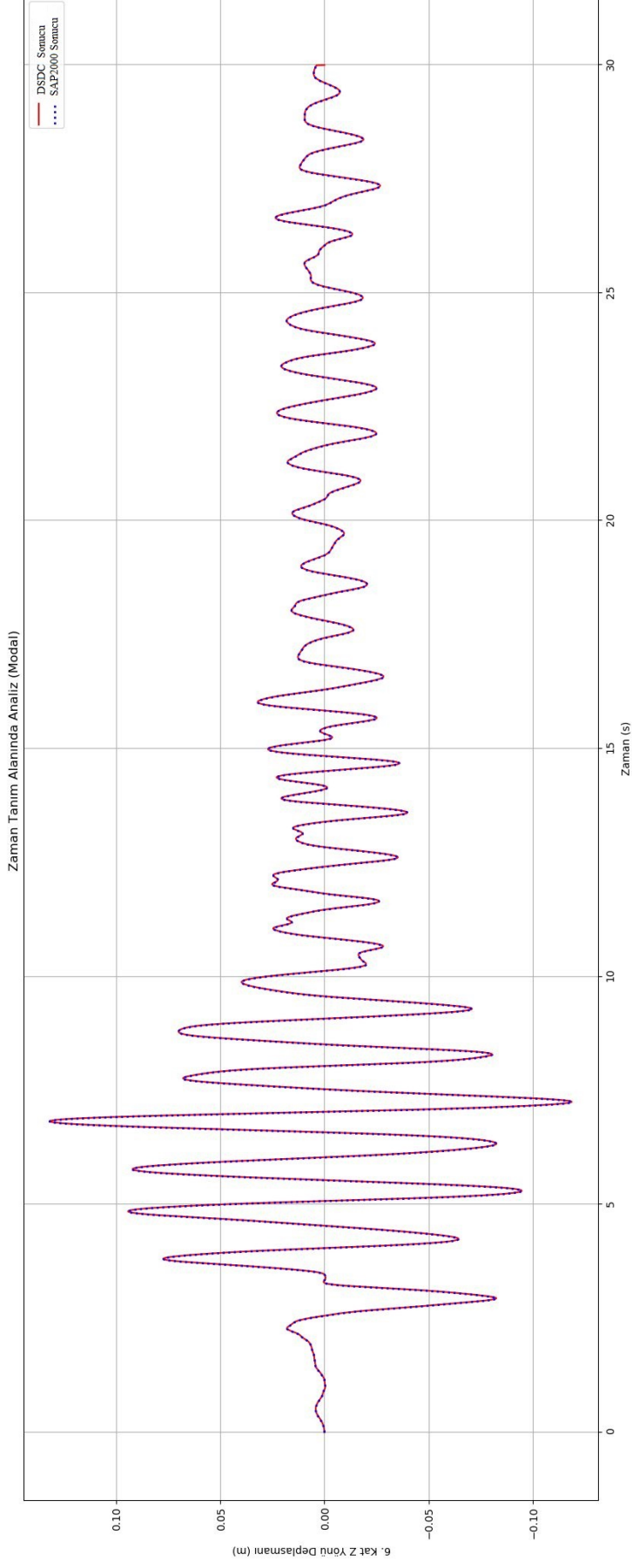
Şekil B.60 : 2B modelli Kobe depremi DI RZ dönmesi.



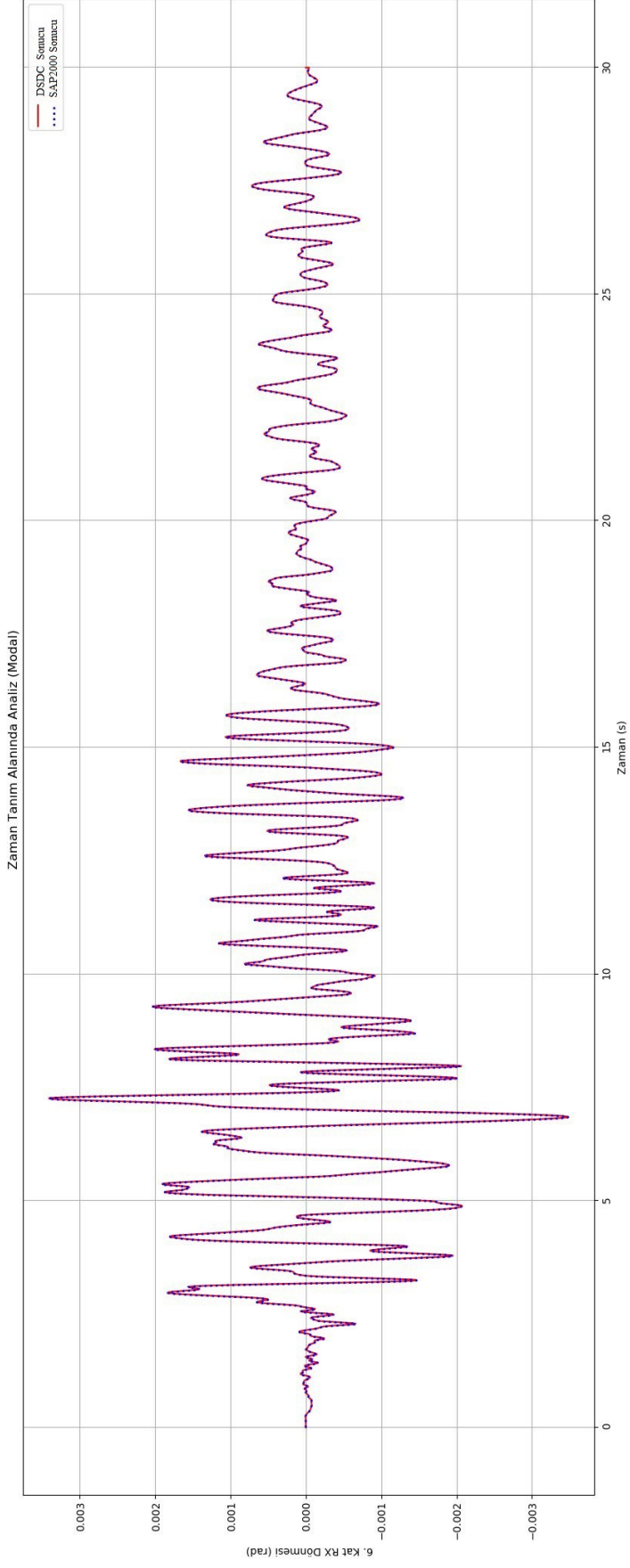
Şekil B.61 : 2B modelli Kocaeli depremi MS X yerdeğiştirmesi.



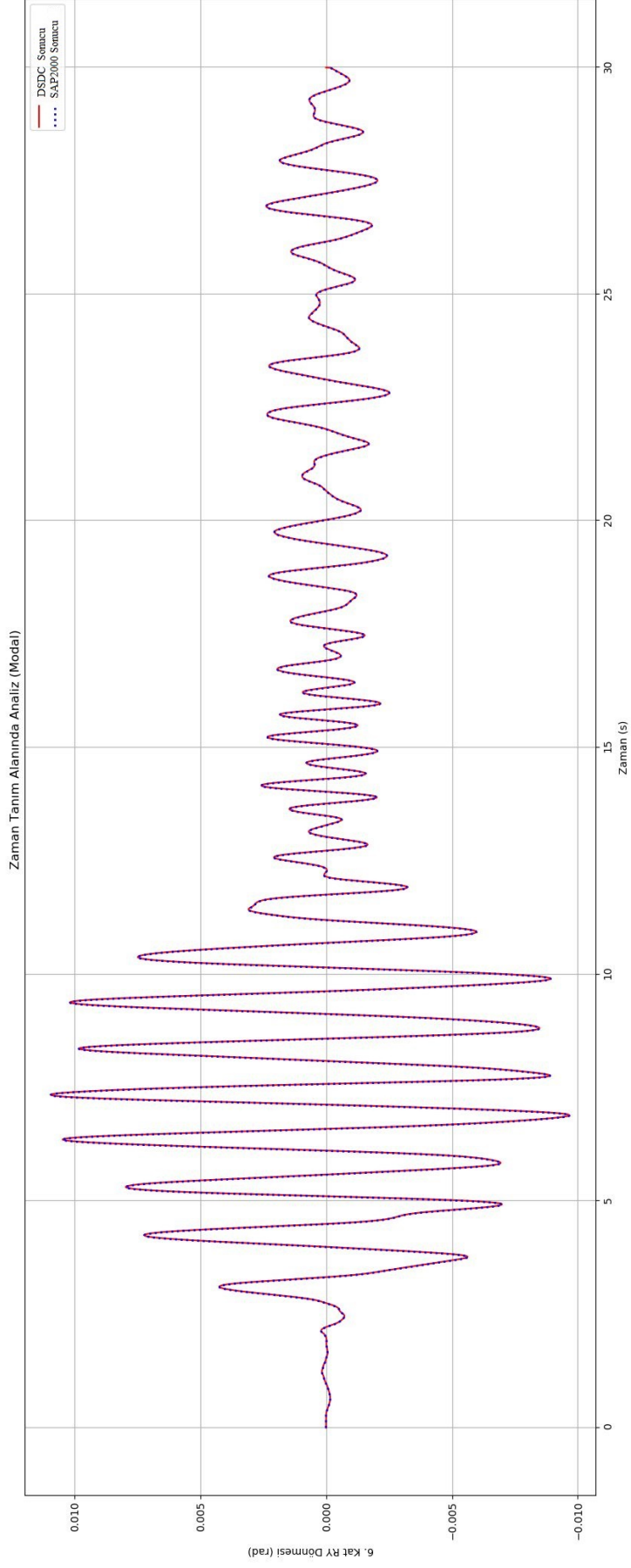
Şekil B.62 : 2B modeli Kocaeli depremi MS Y yerdeğiştirmesi.



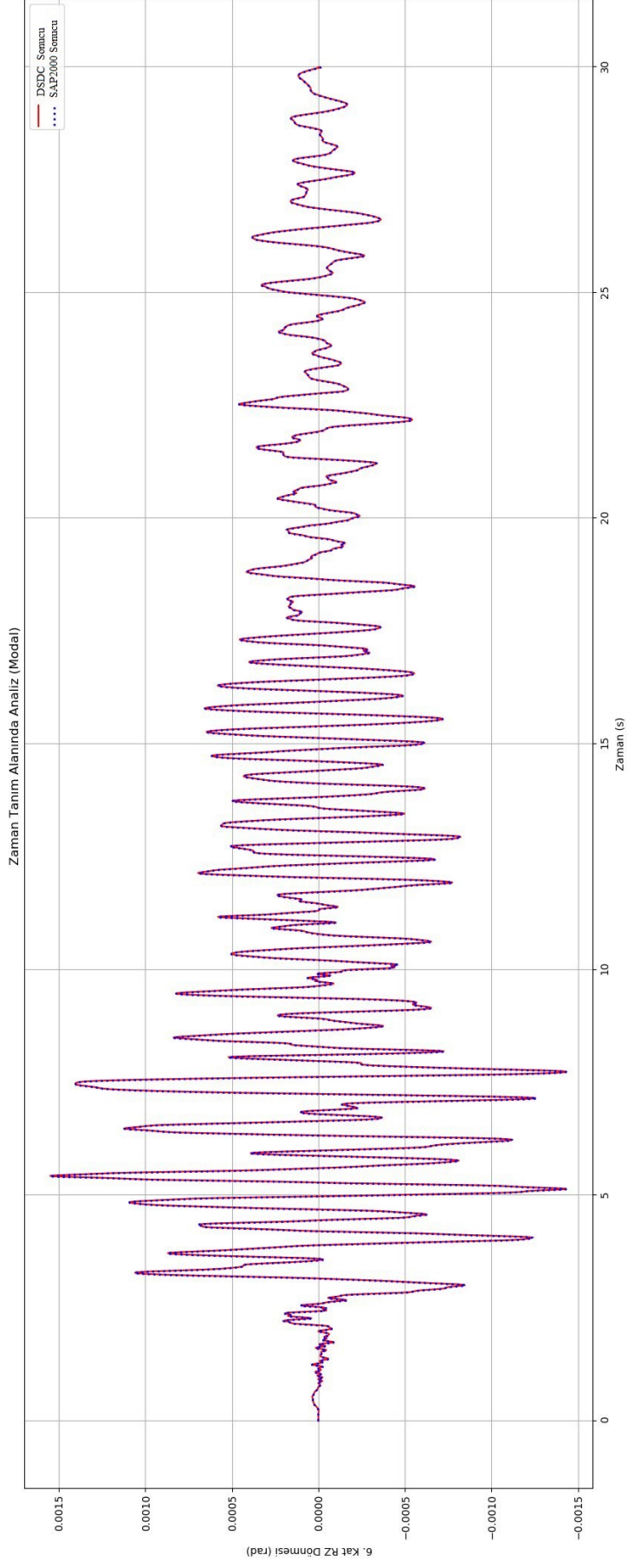
Şekil B.63 : 2B model Kocaeli depremi MS Z yerdeğiştirmesi.



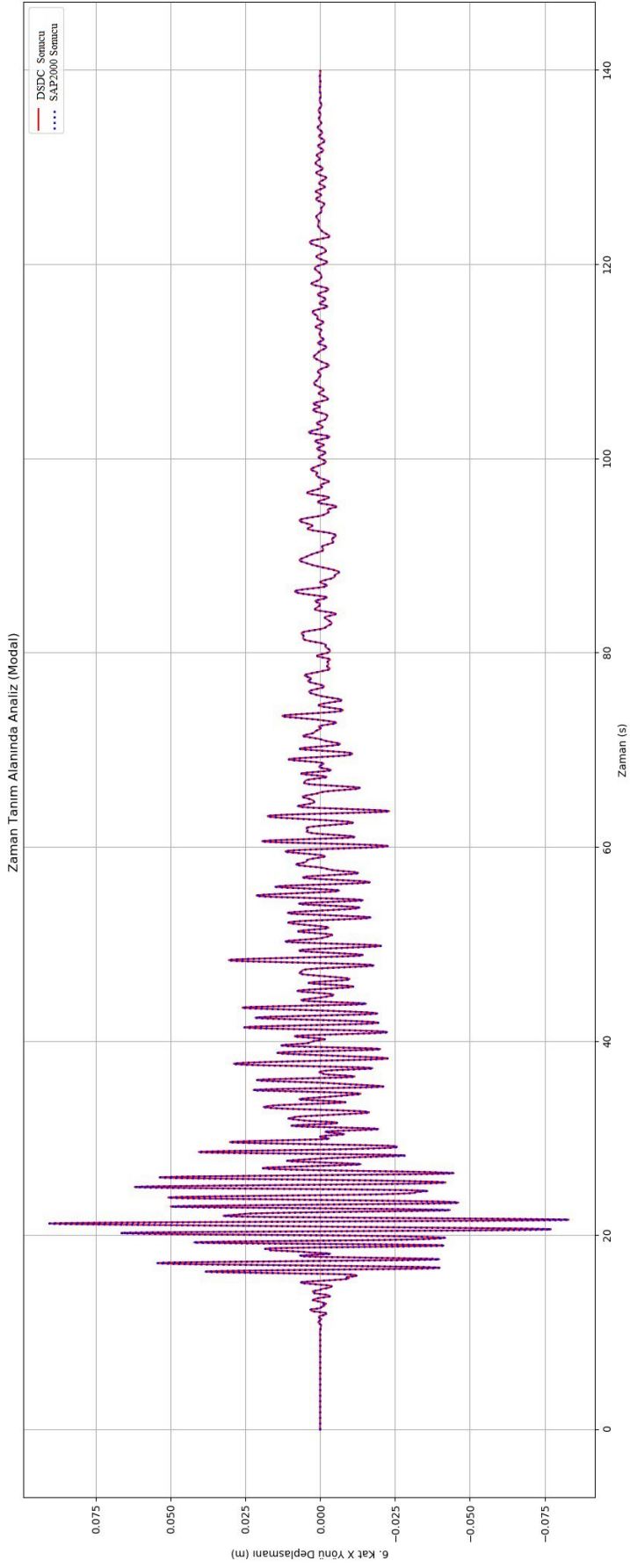
Şekil B.64 : 2B model Kocaeli depremi MS RX dönmesi.



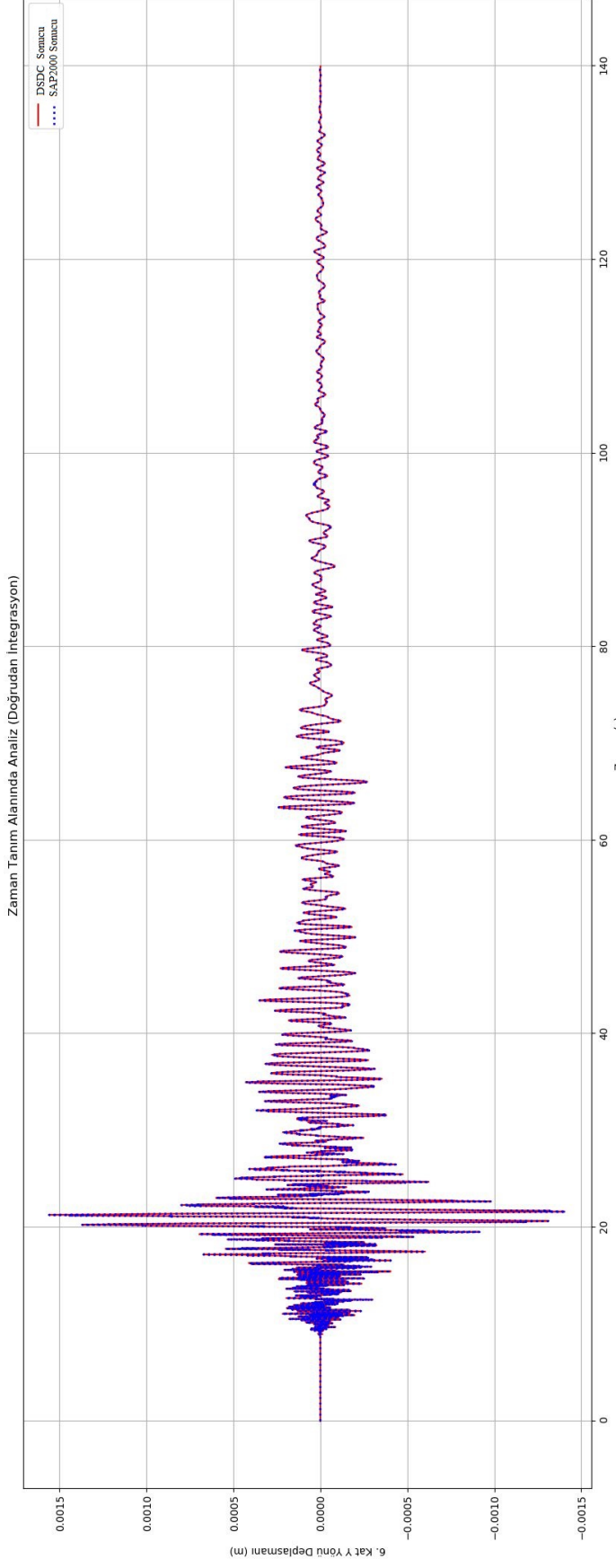
Şekil B.65 : 2B modelli Kocaeli depremi MS RY dönmesi.



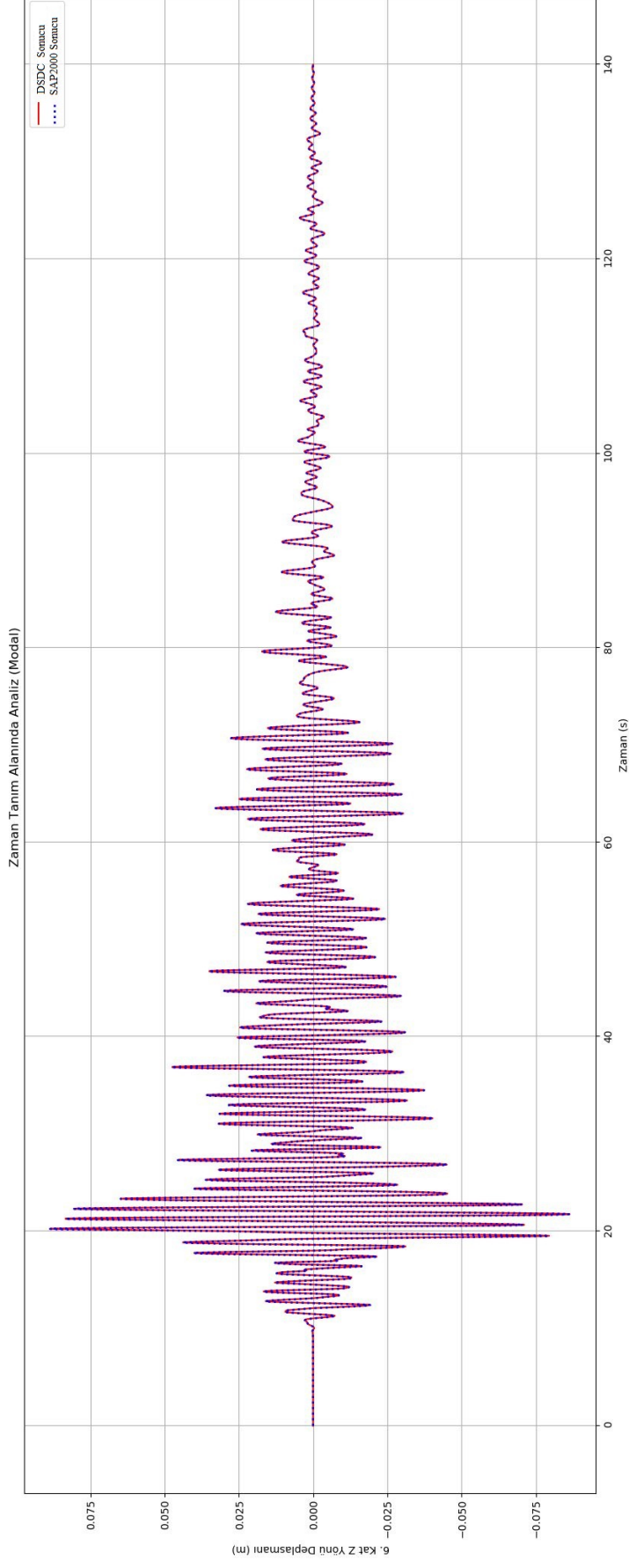
Şekil B.66 : 2B modeli Kocaeli depremi MS RZ dönmesi.



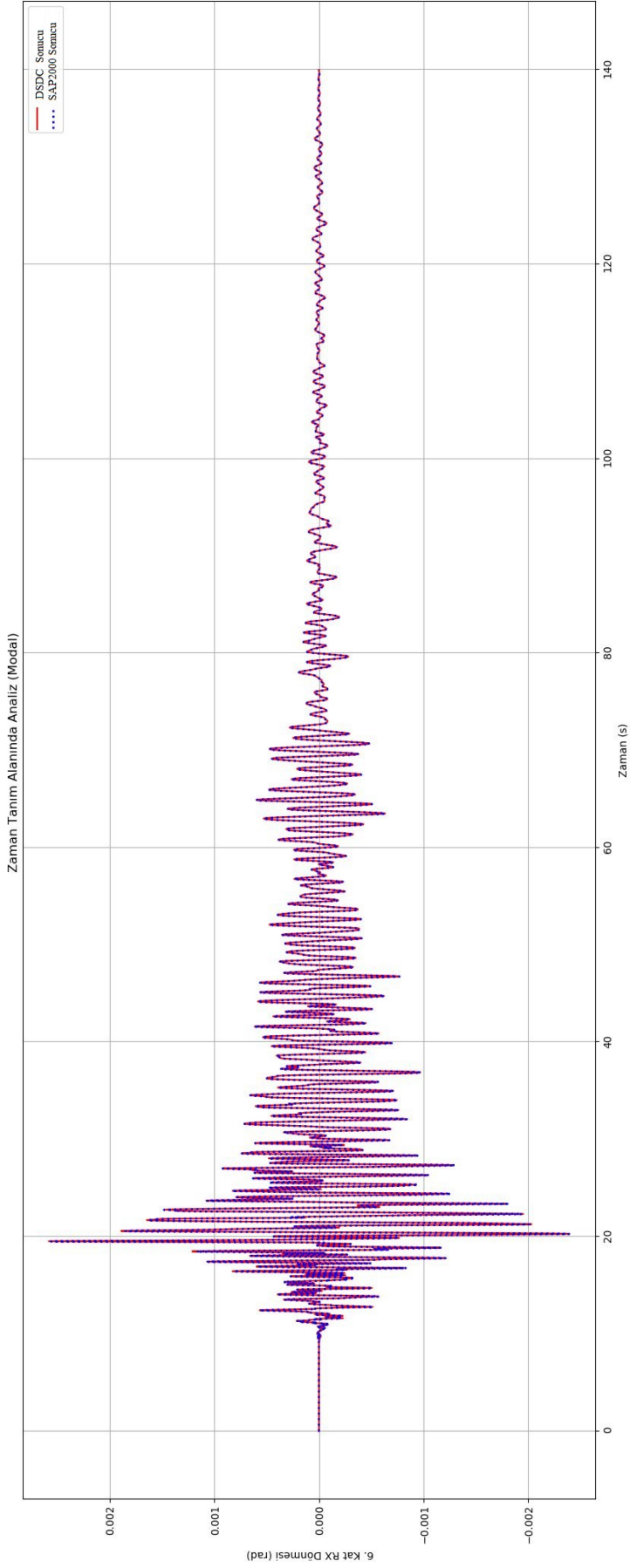
Şekil B.67 : 2B modelı Kobe depremi MS X yerdeğiştirmeği.



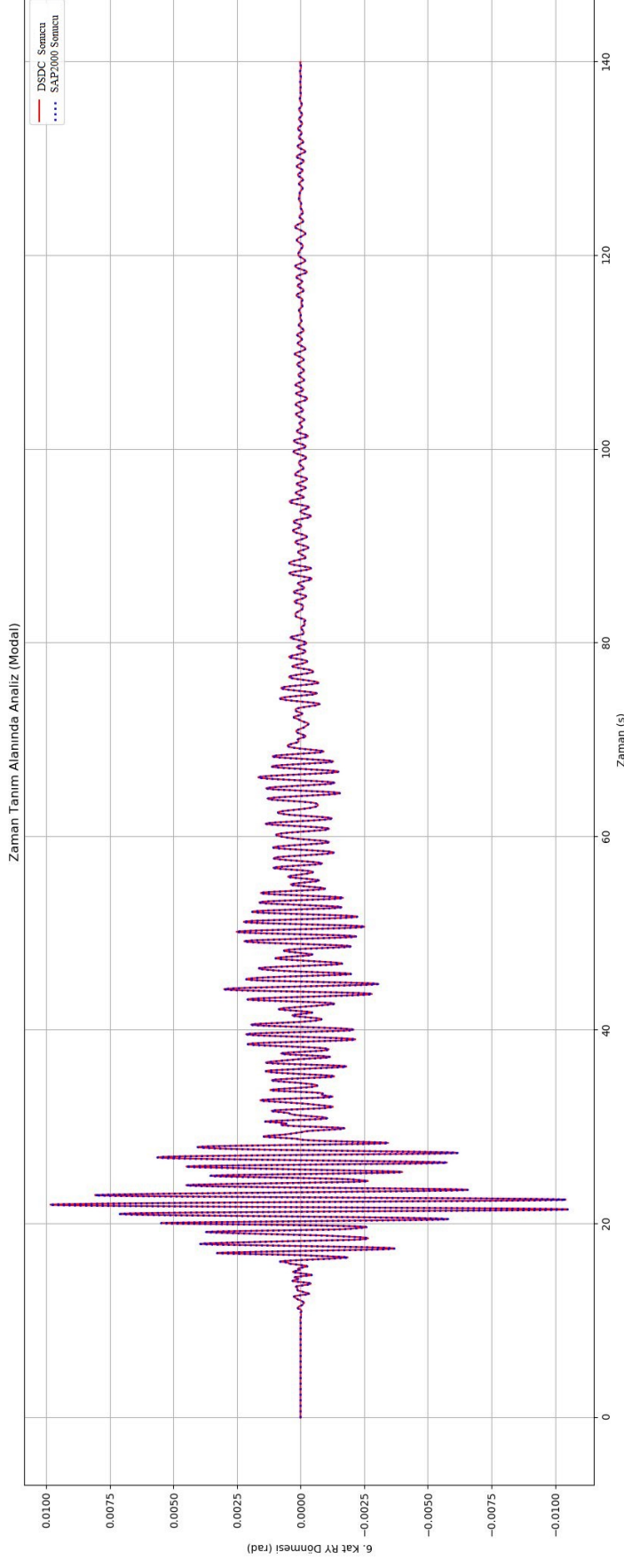
Şekil B.68 : 2B modelli Kobe depremi MS Y yerdeğiştirilmesi.



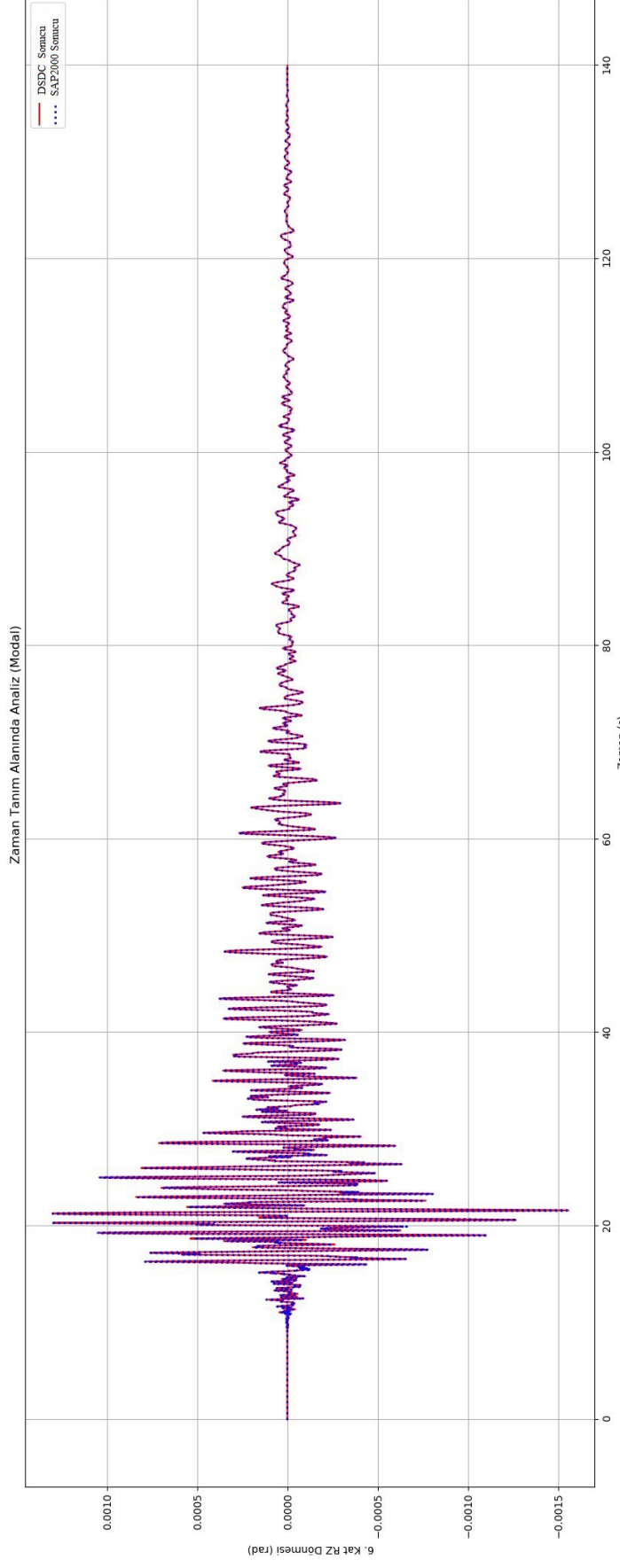
Şekil B.69 : 2B modelli Kobe depremi MS Z yerdeğiştirmesi.



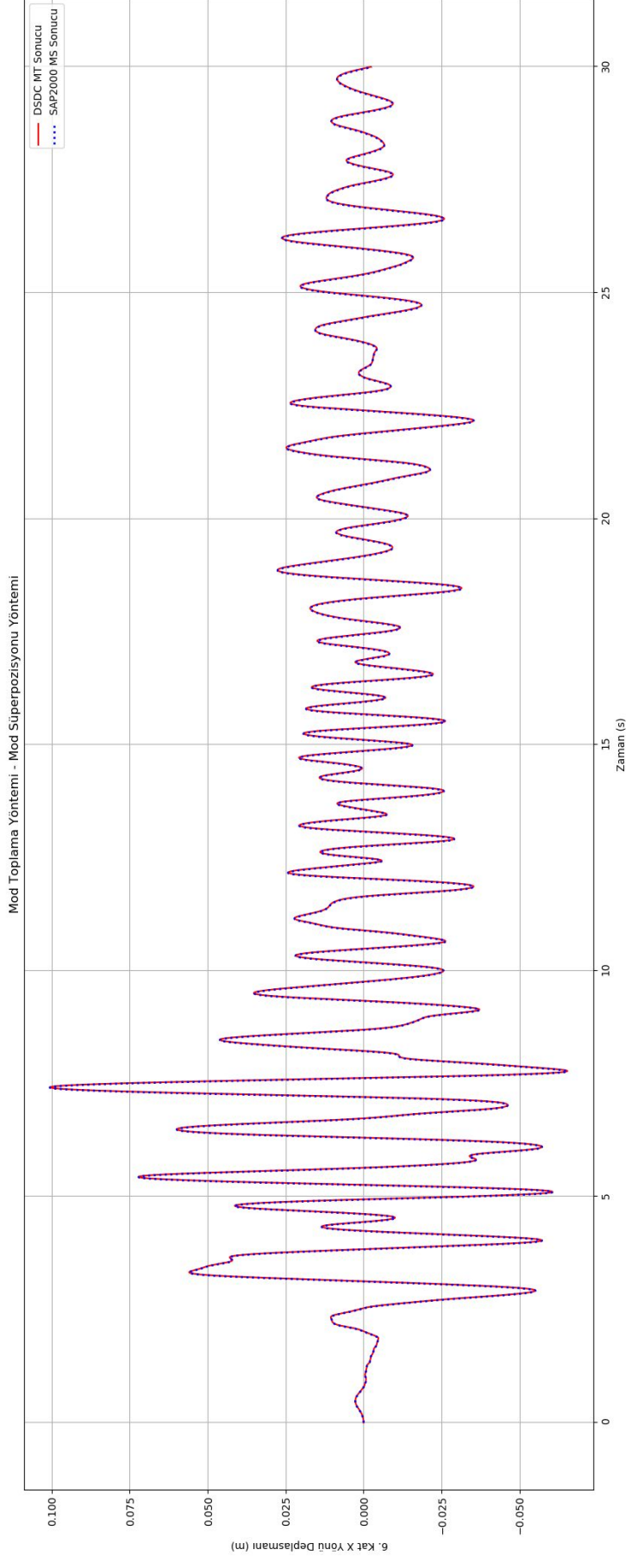
Şekil B.70 : 2B modeli Kobe depremi MS RX dönmesi.



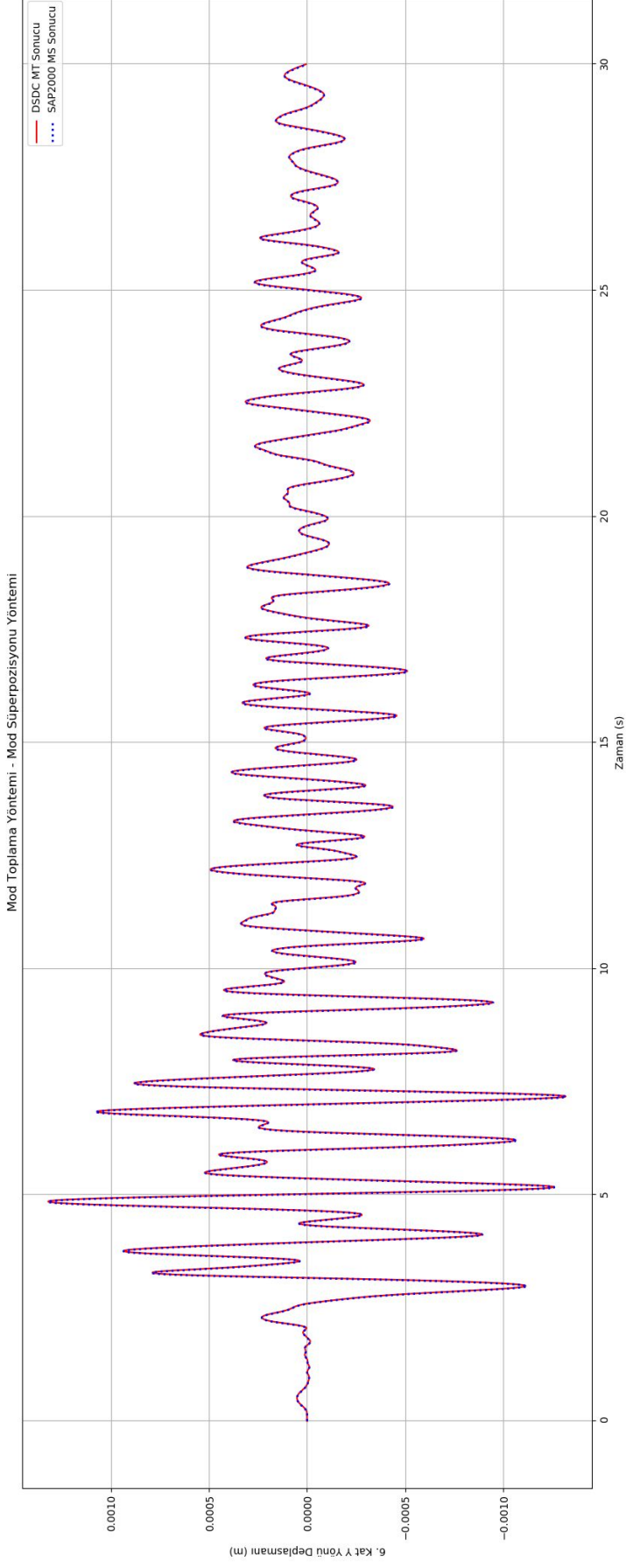
Şekil B.71 : 2B modelli Kobe depremi MS RY dönmesi.



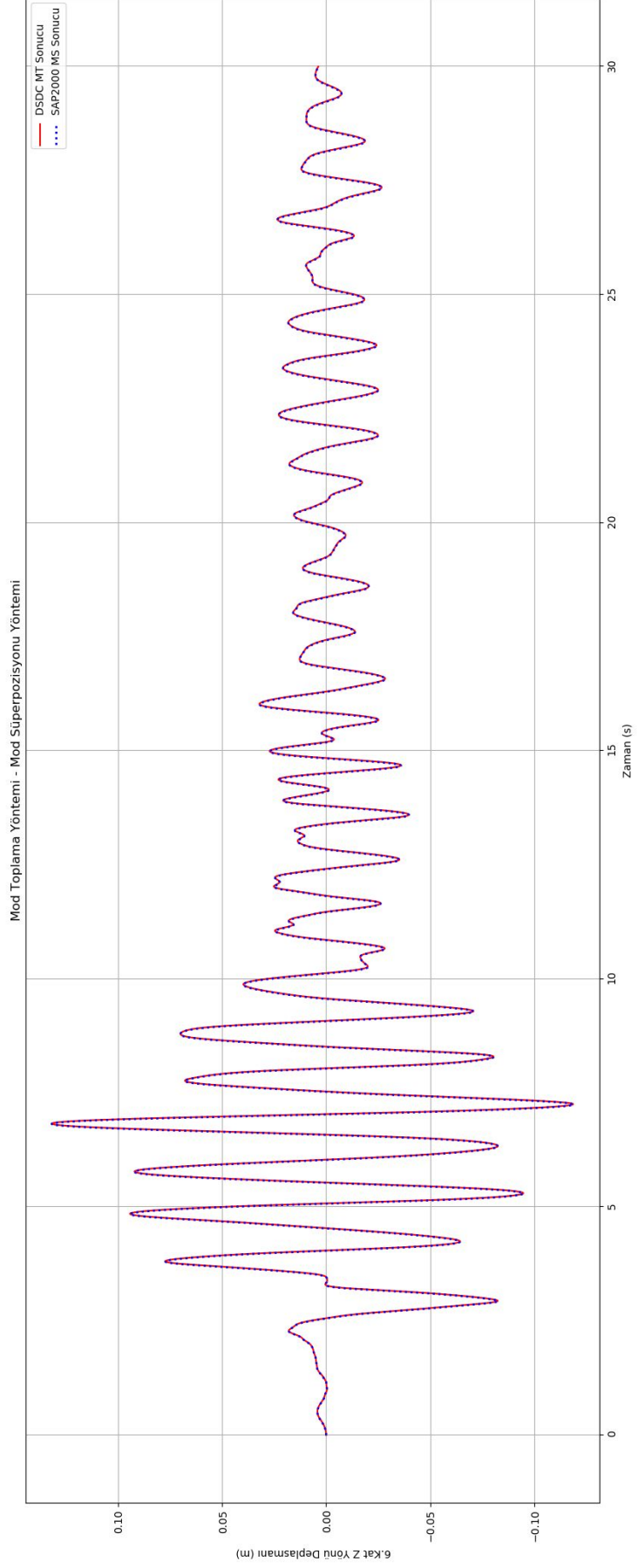
Şekil B.72 : 2B modeli Kobe depremi MS RZ dönmesi.



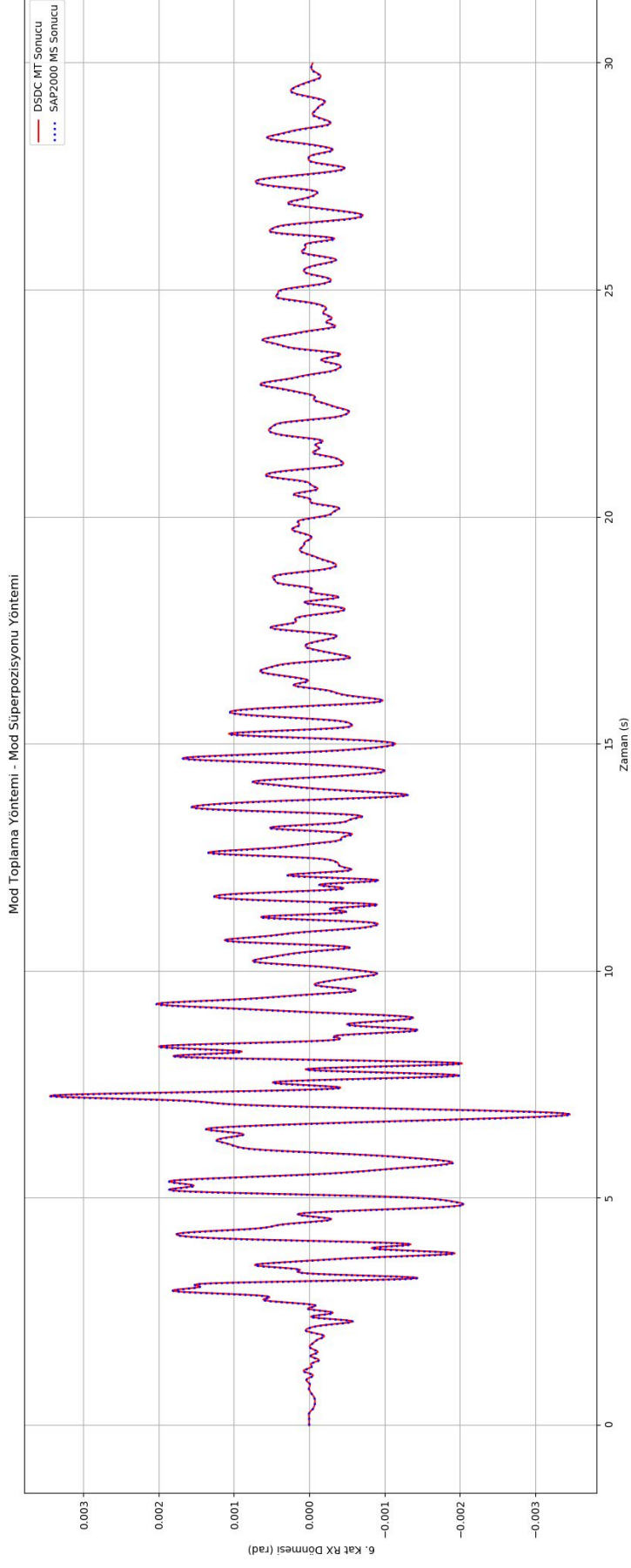
Şekil B.73 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.



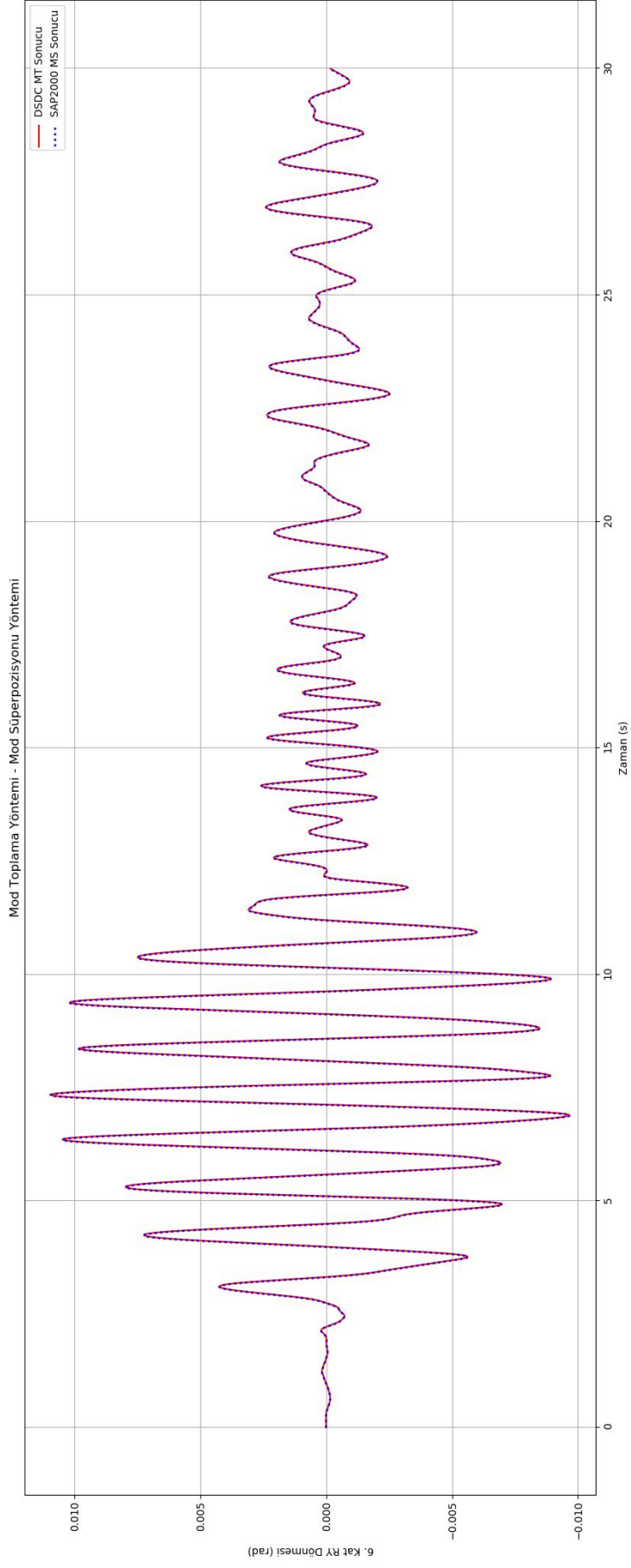
Şekil B.74 : 2B model Kocaeli depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.



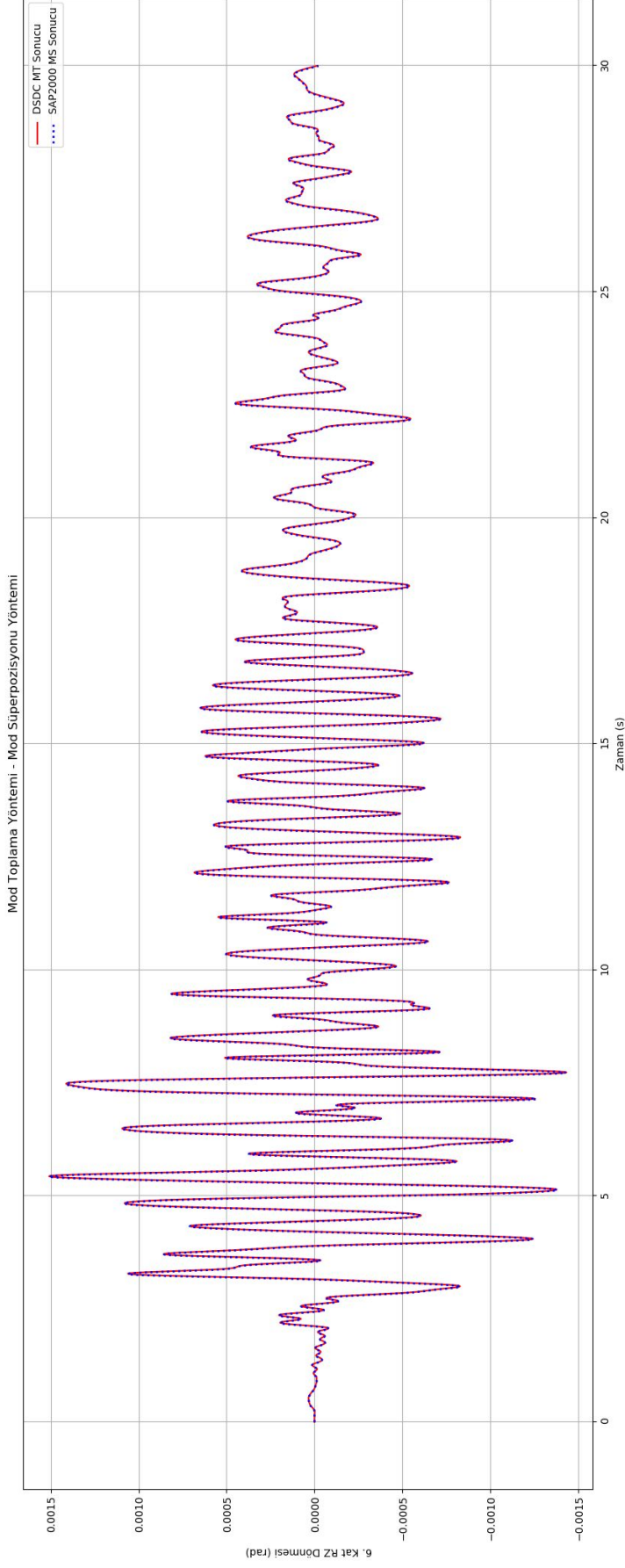
Şekil B.75 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.



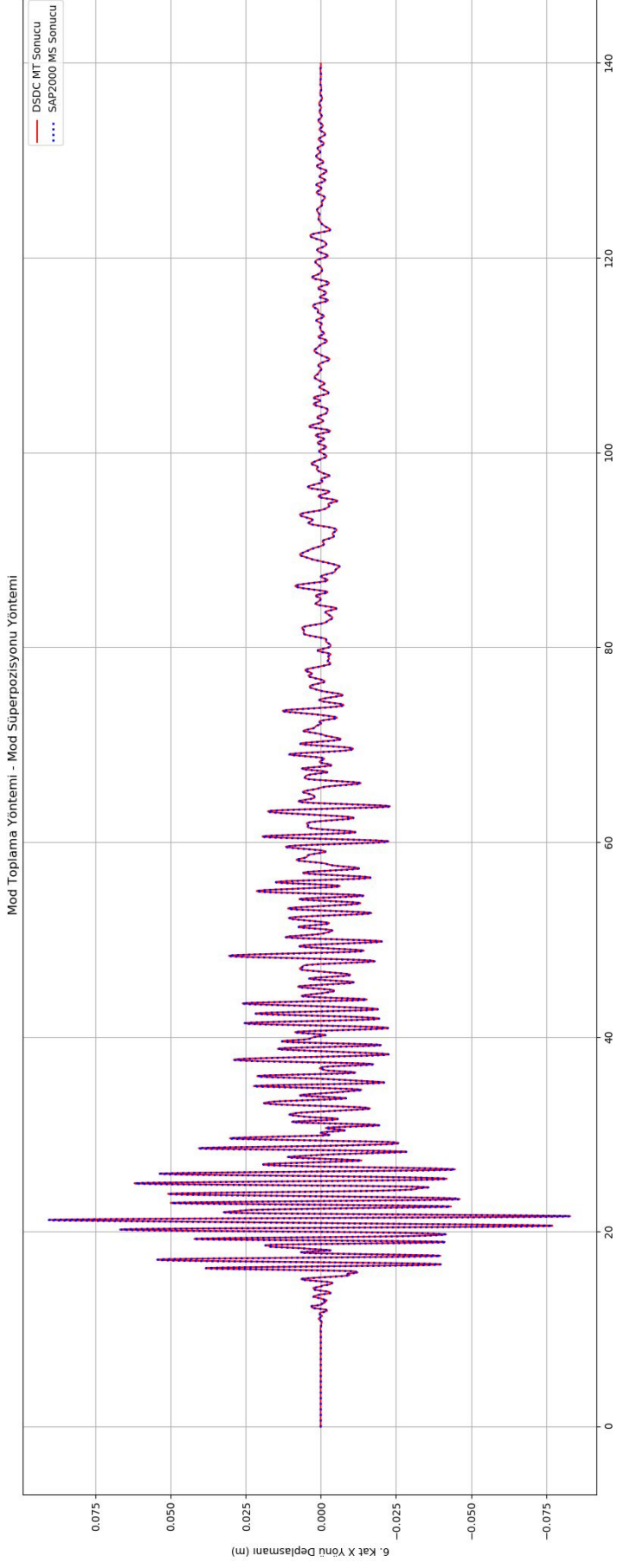
Şekil B.76 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.



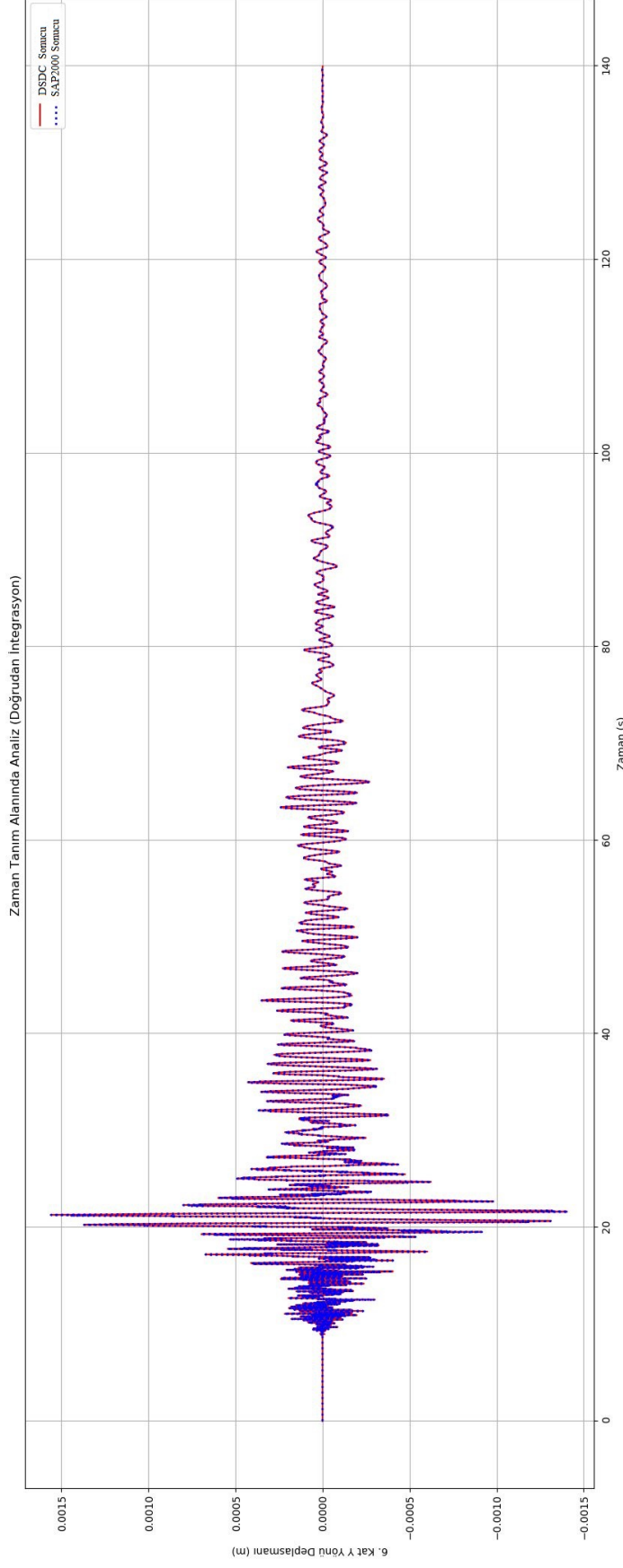
Şekil B.77 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RY dönmesi.



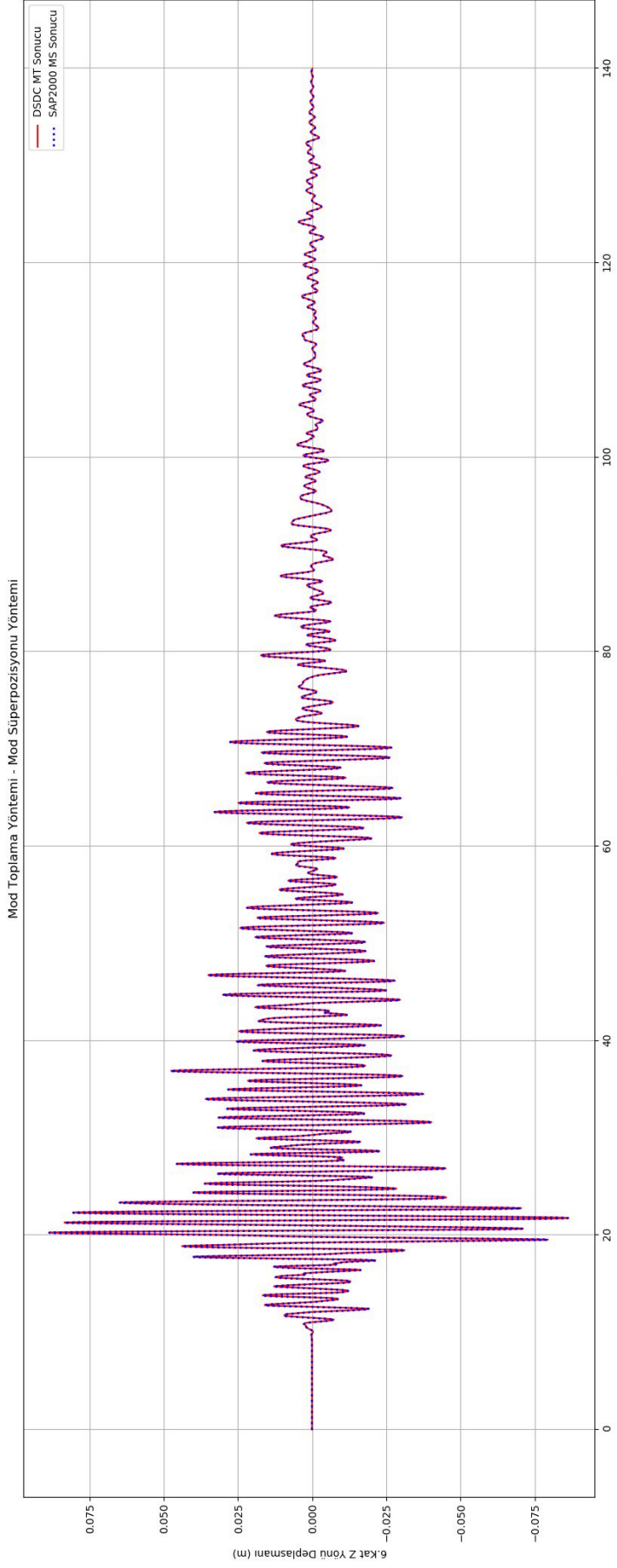
Şekil B.78 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RZ dönmesi.



Şekil B.79 : 2B modeli Kobe depremi MT - MS X yerdeğiştirmesi.

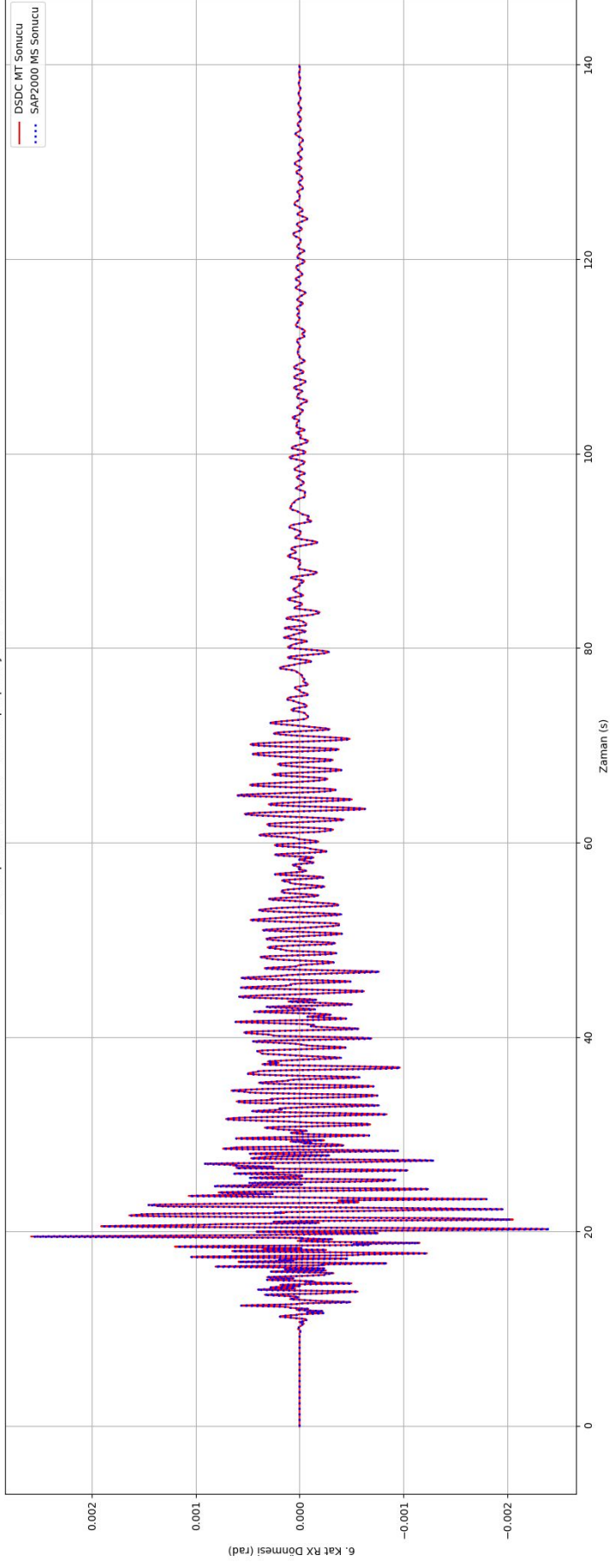


Şekil B.80 : 2B modelli Kobe depremi MT - MS Y yerdeğiştirmesi.

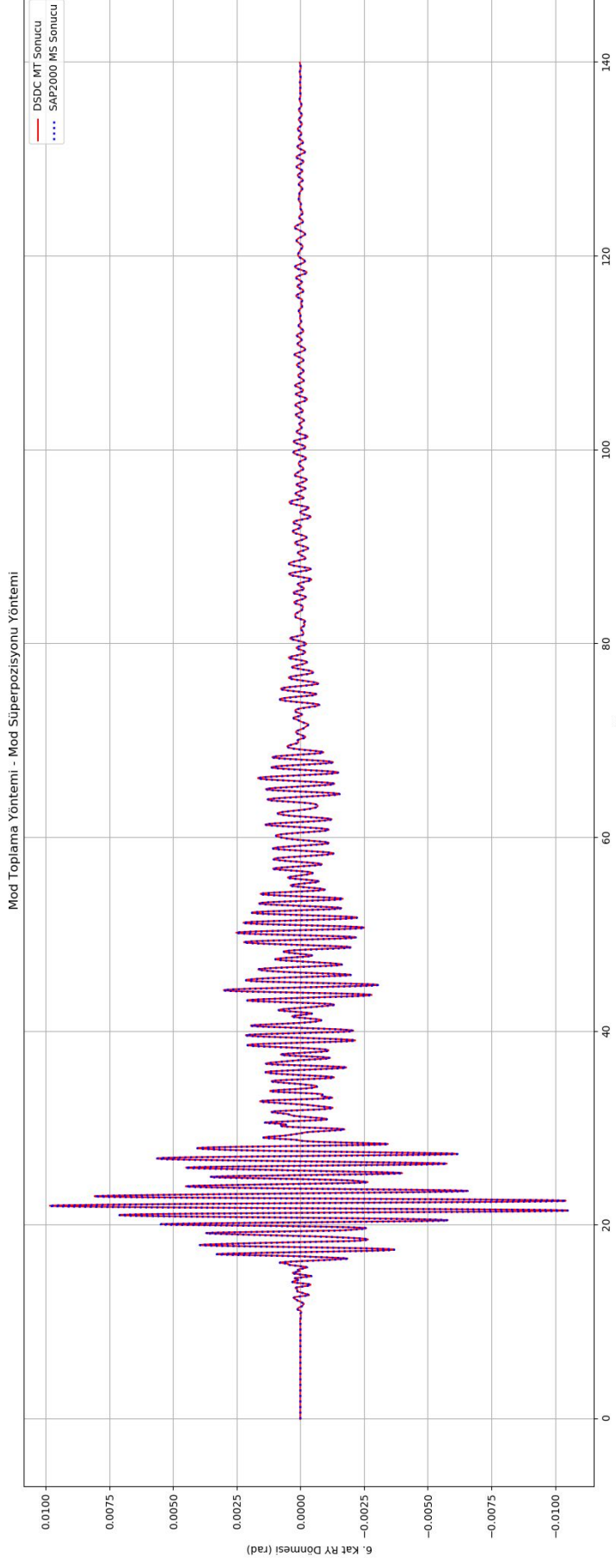


Şekil B.81 : 2B modeli Kobe depremi MT - MS Z yerdeğiştirmesi.

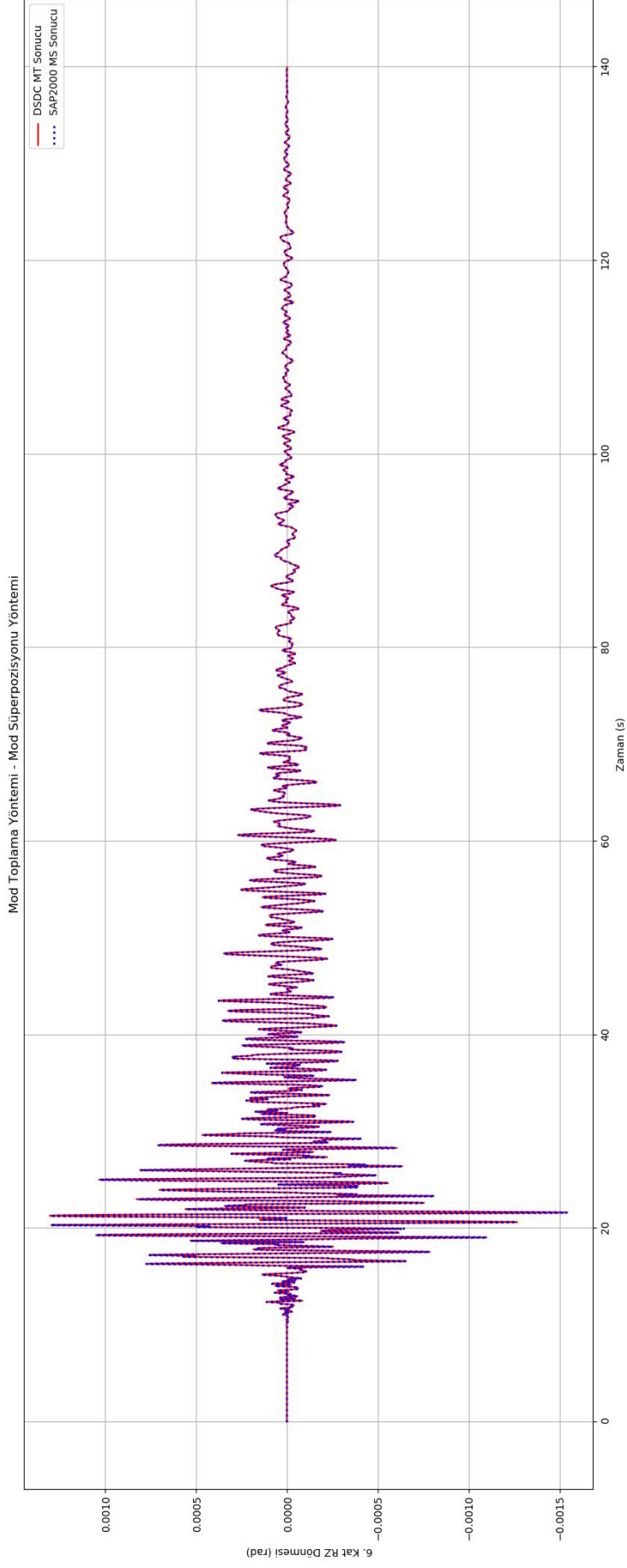
Mod Toplama Yöntemi - Mod Süperpozisyonu Yöntemi



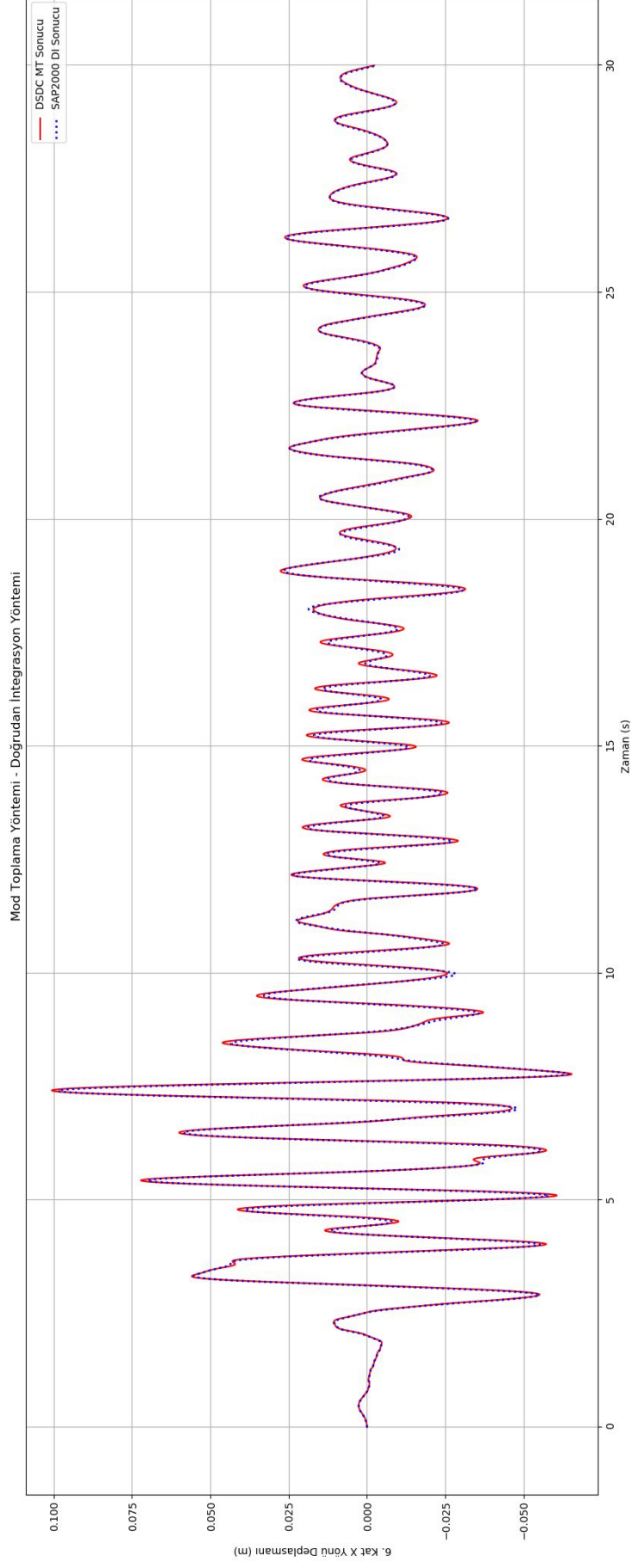
Şekil B.82 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - MS RX dönmesi.



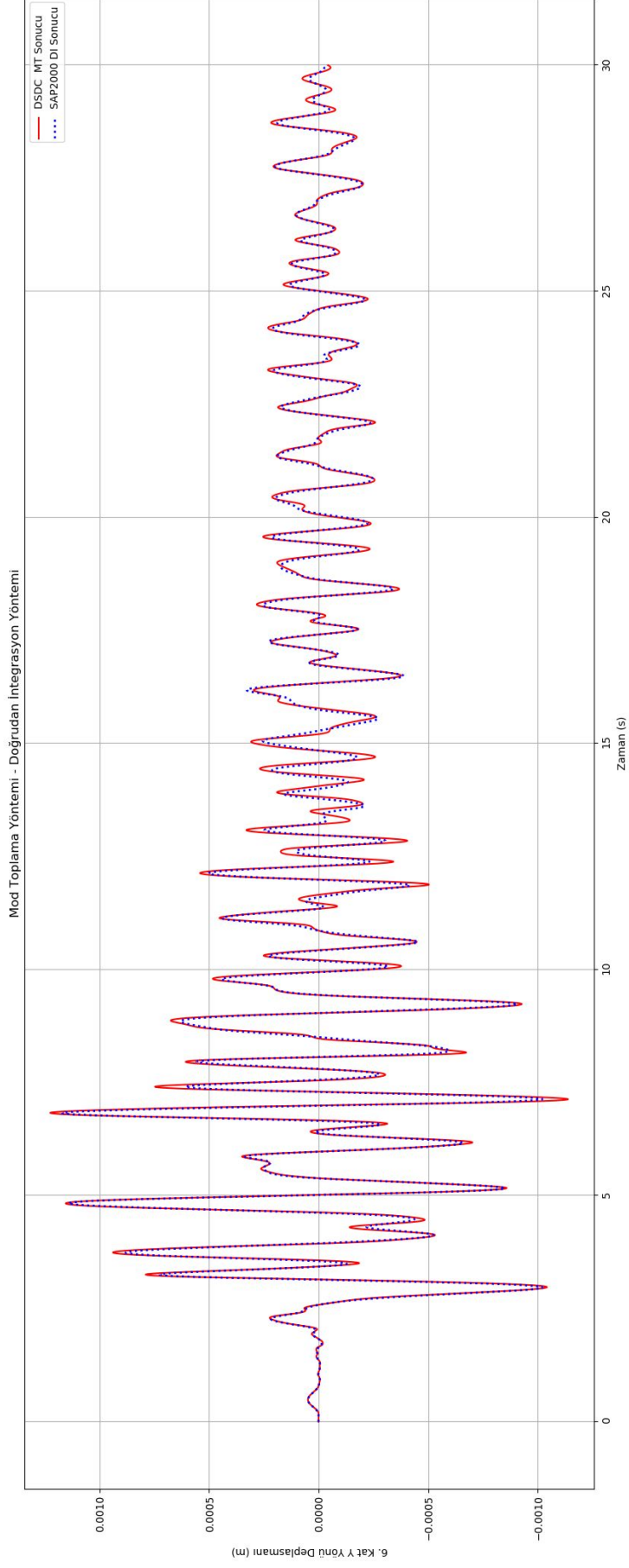
Şekil B.83 : 2B modeli Kobe depremi MT - MS RY dönmesi.



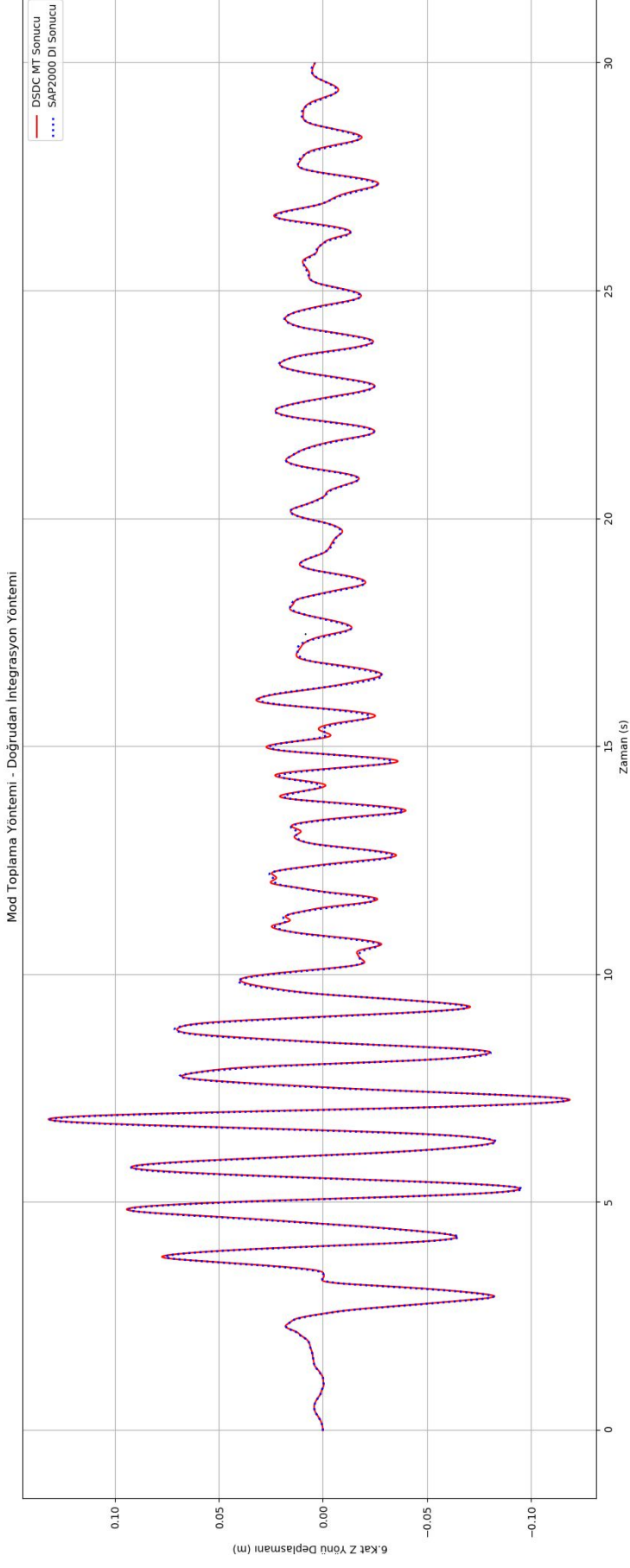
Şekil B.84 : 2B modelli Kobe depremi MT - MS RZ dönmesi.



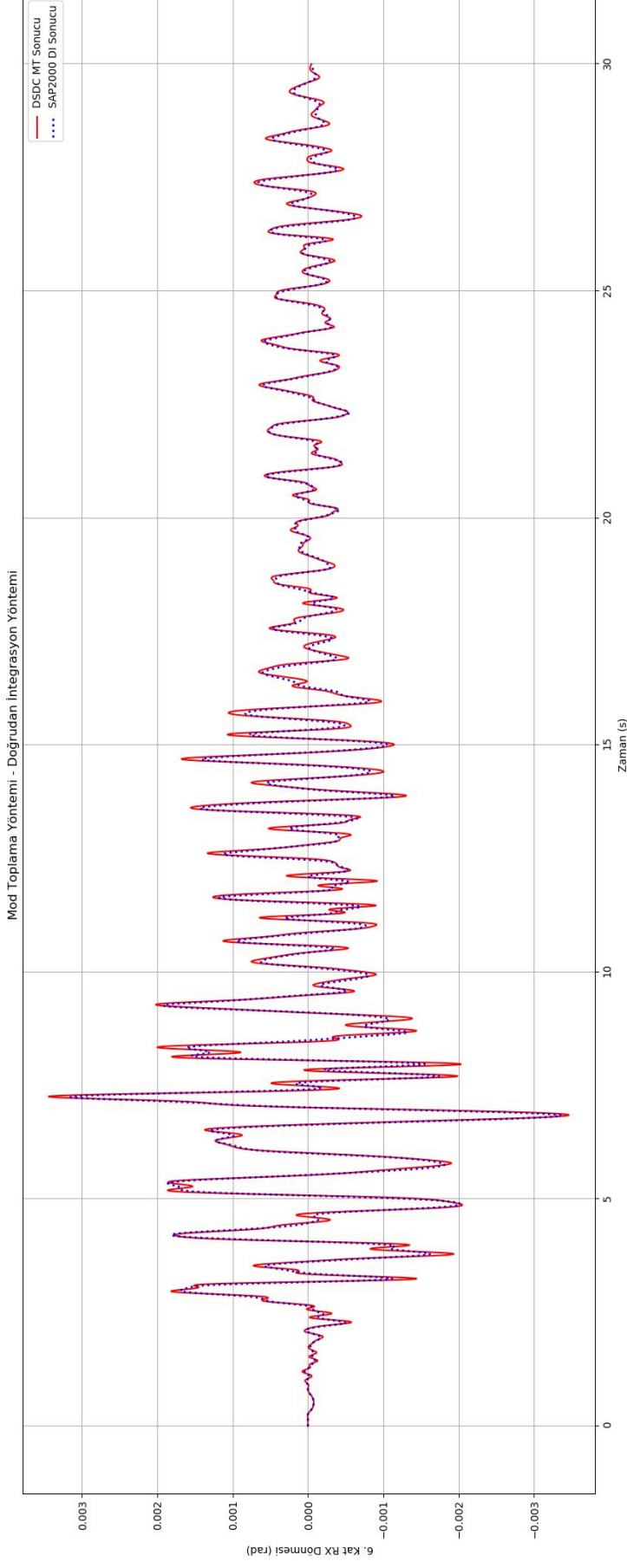
Şekil B.85 : 2B modelli Kocaeli depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.



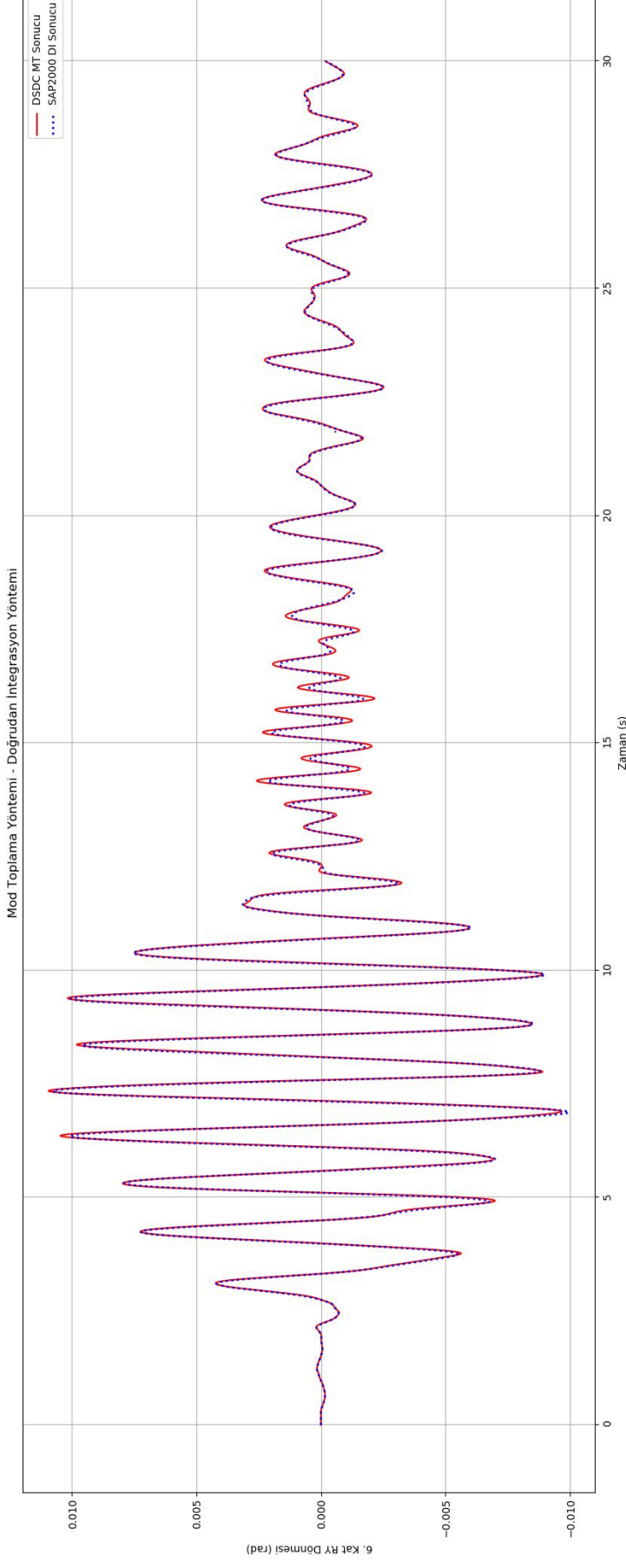
Şekil B.86 : 2A modeli Kocaeli depremi MT - DI Y yerdeğiştirmesi.



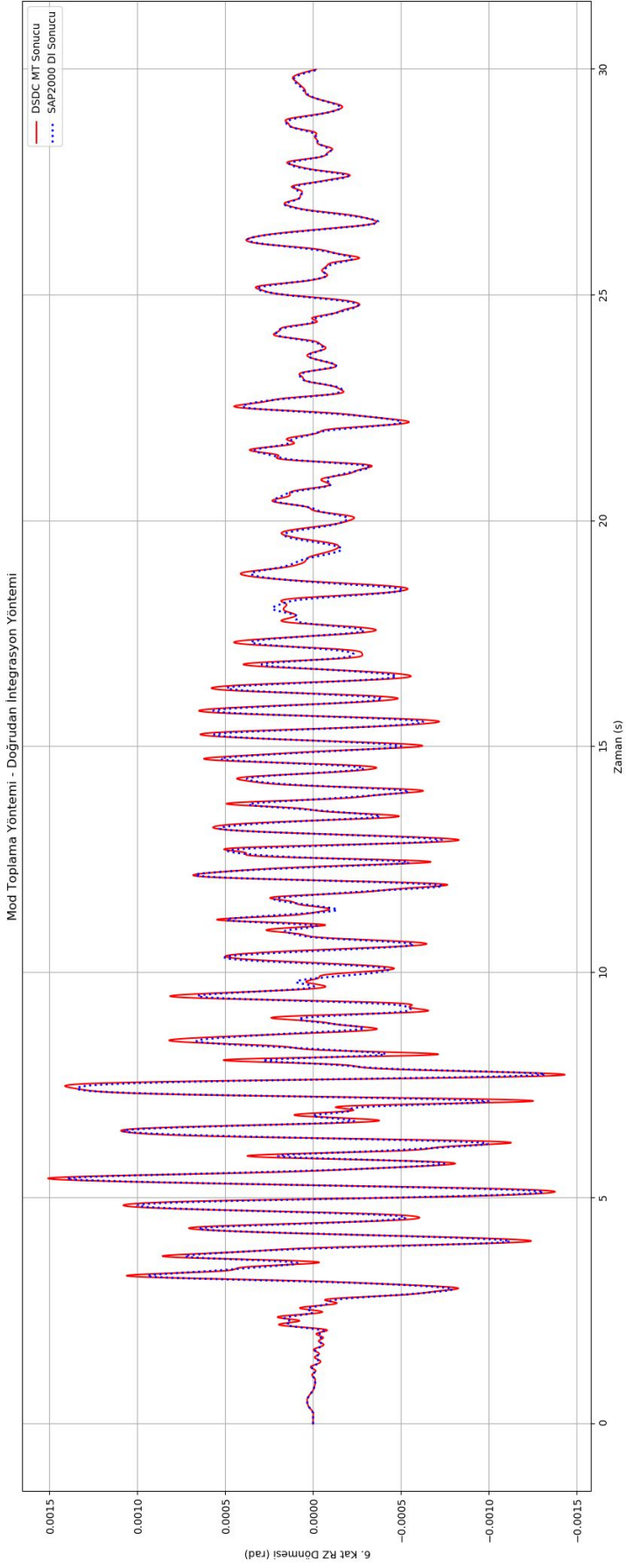
Şekil B.87 : 2B modelli Kocaeli depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.



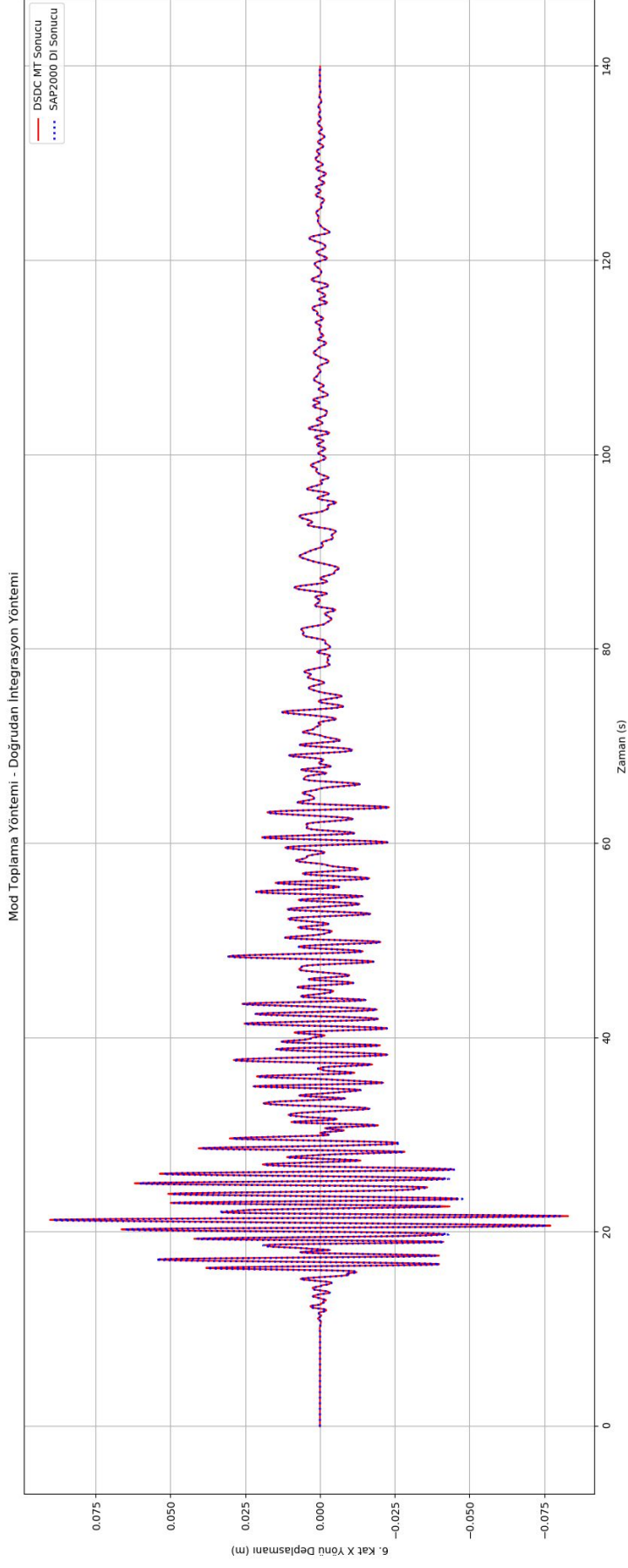
Şekil B.88 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.



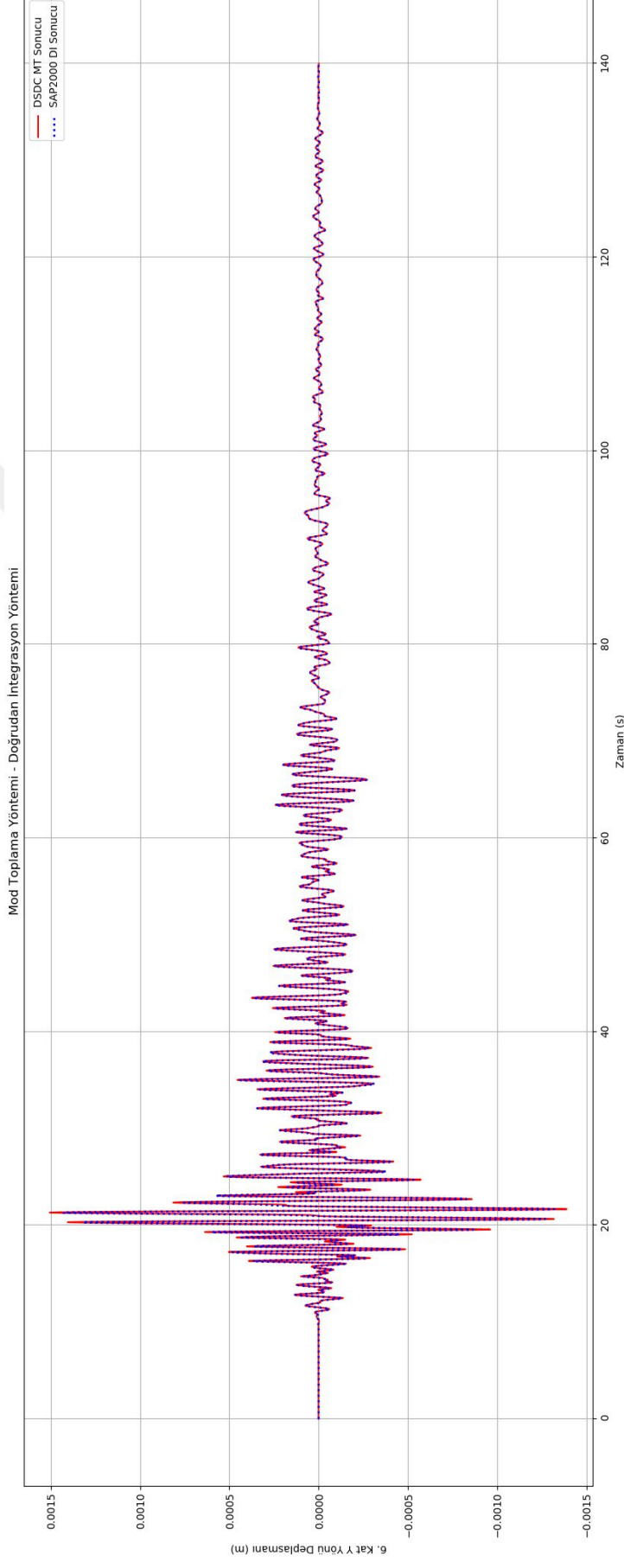
Şekil B.89 : 2B modelli Kocaeli depremi MT - DI RY dönmesi.



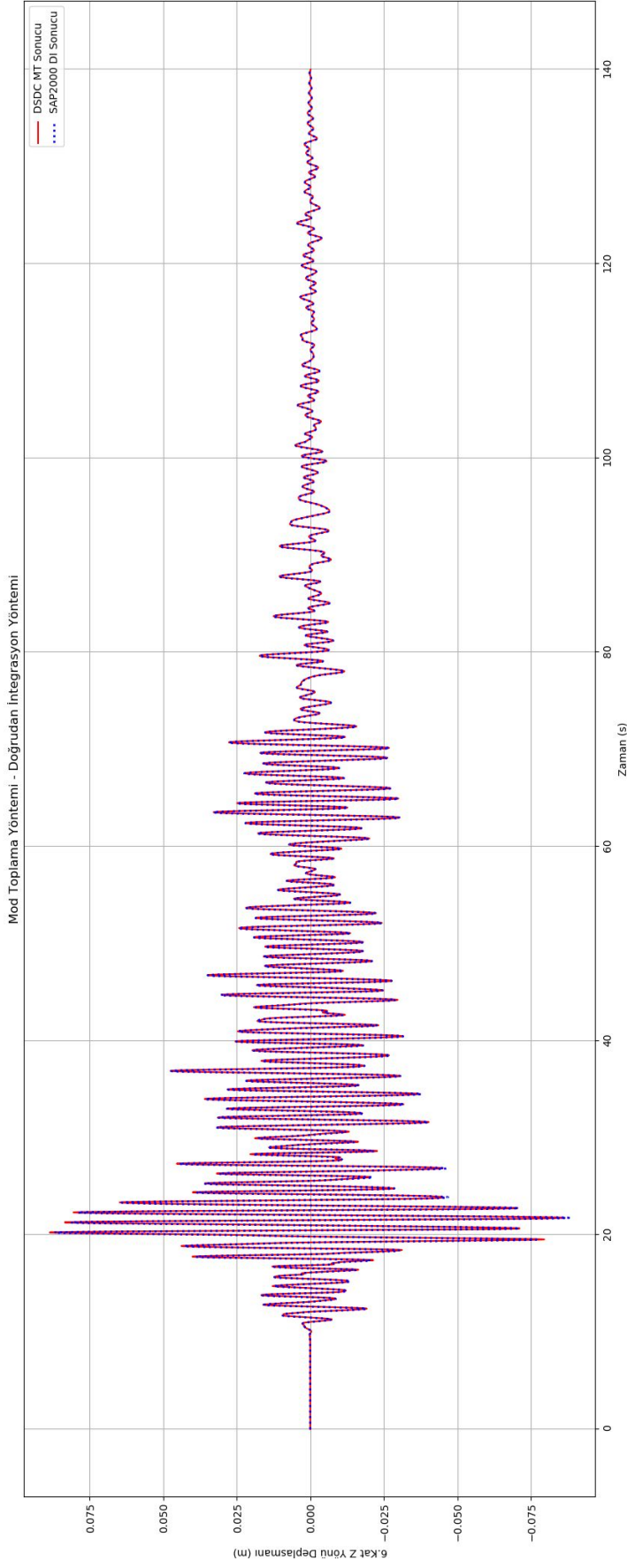
Şekil B.90 : 2B modelli Kocaeli depremi MT - DI RZ dönmesi.



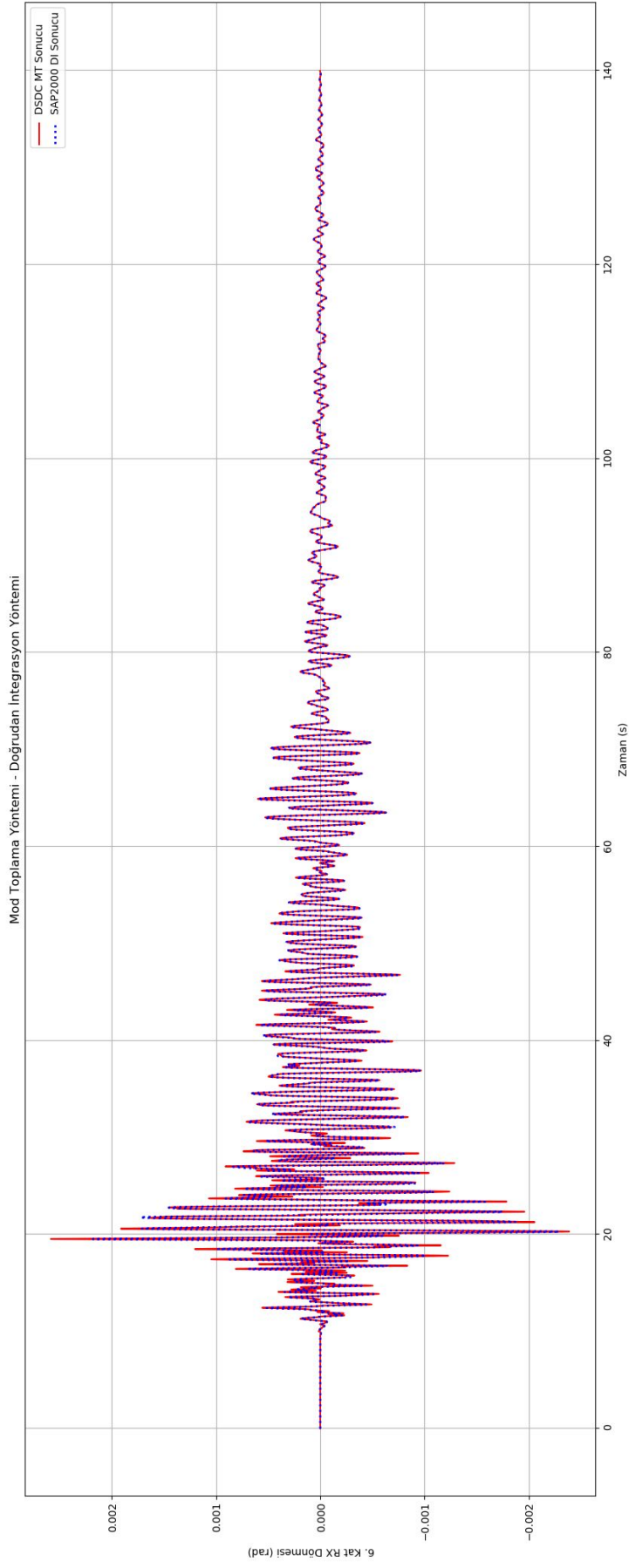
Şekil B.91 : 2B modelli Kobe depremi MT - DI X yerdeğiştirmesi.



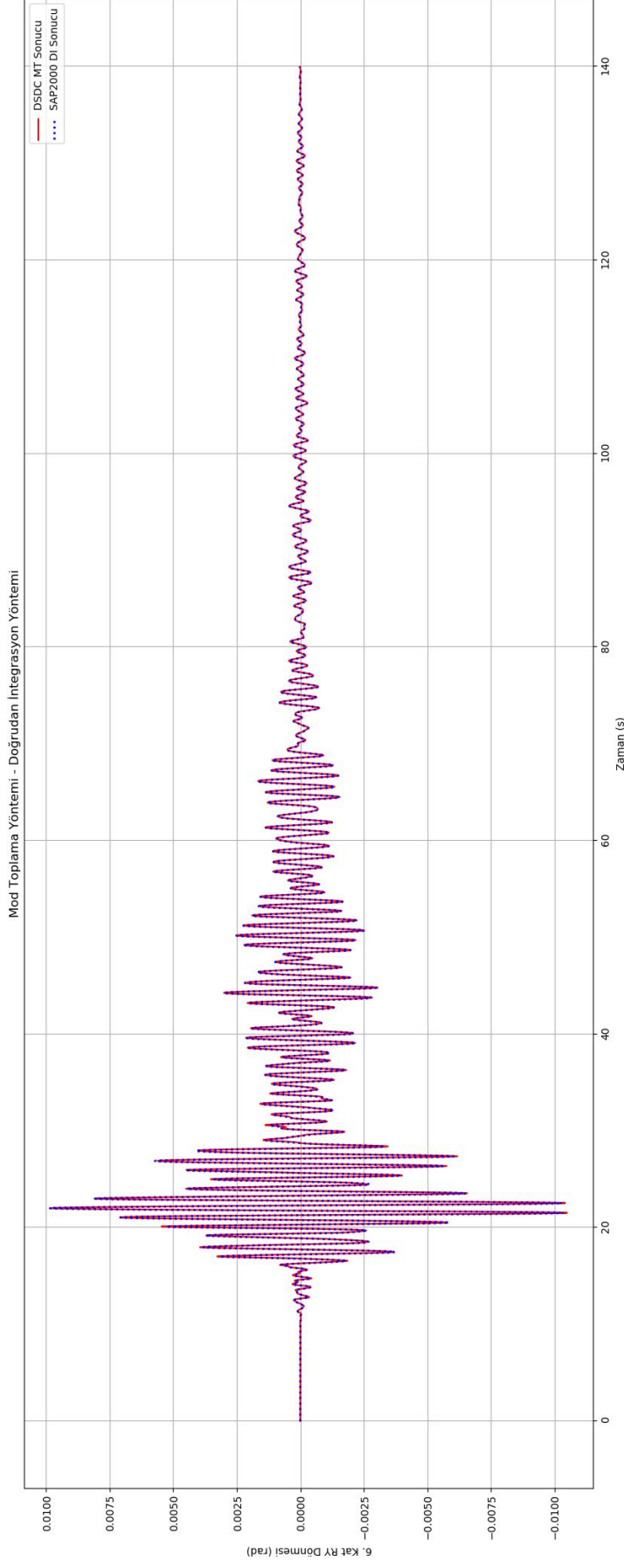
Şekil B.92 : 2B modelli Kobe depremi MT - DI Y yerdeğiştirilmesi.



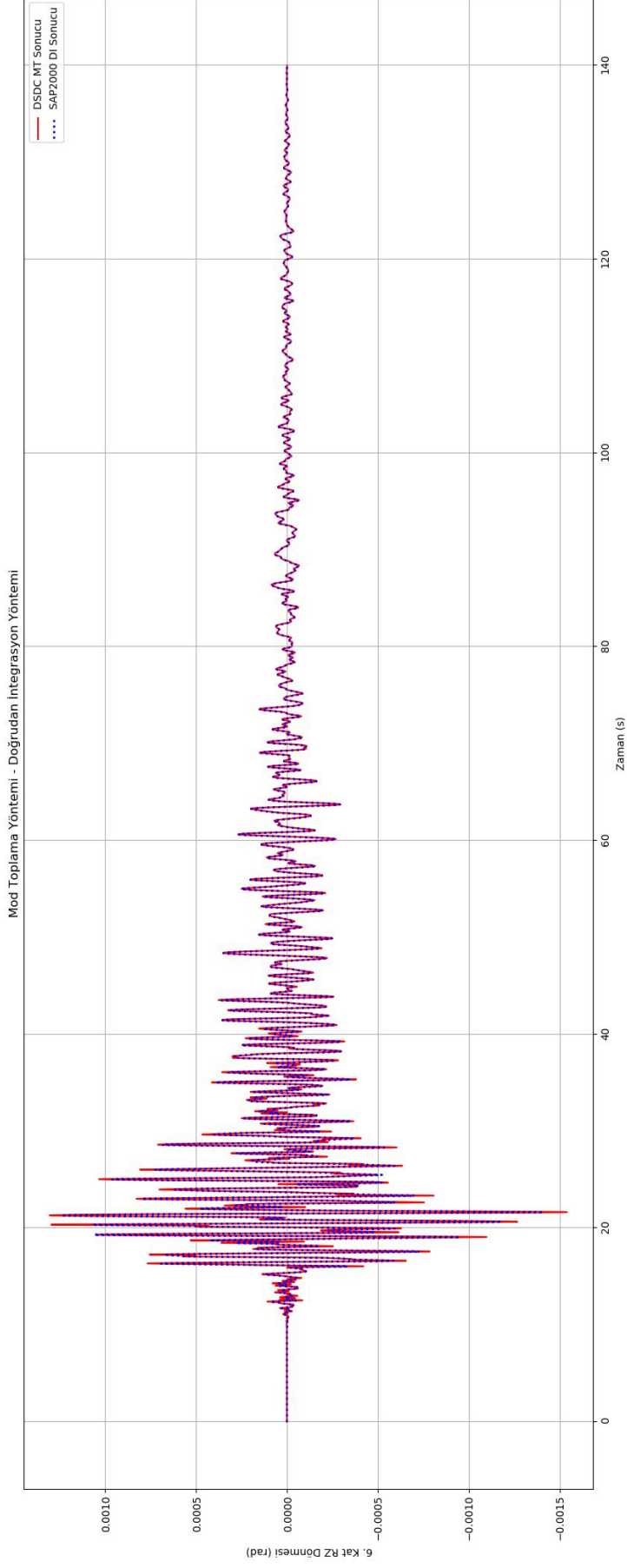
Şekil B.93 : 2B modelli Kobe depremi MT - DI Z yerdeğiştirmesi.



Şekil B.94 : 2B modeli Kocaeli depremi MT - DI RX dönmesi.



Şekil B.95 : 2B modelli Kobe depremi MT - Dİ RY dönmesi.

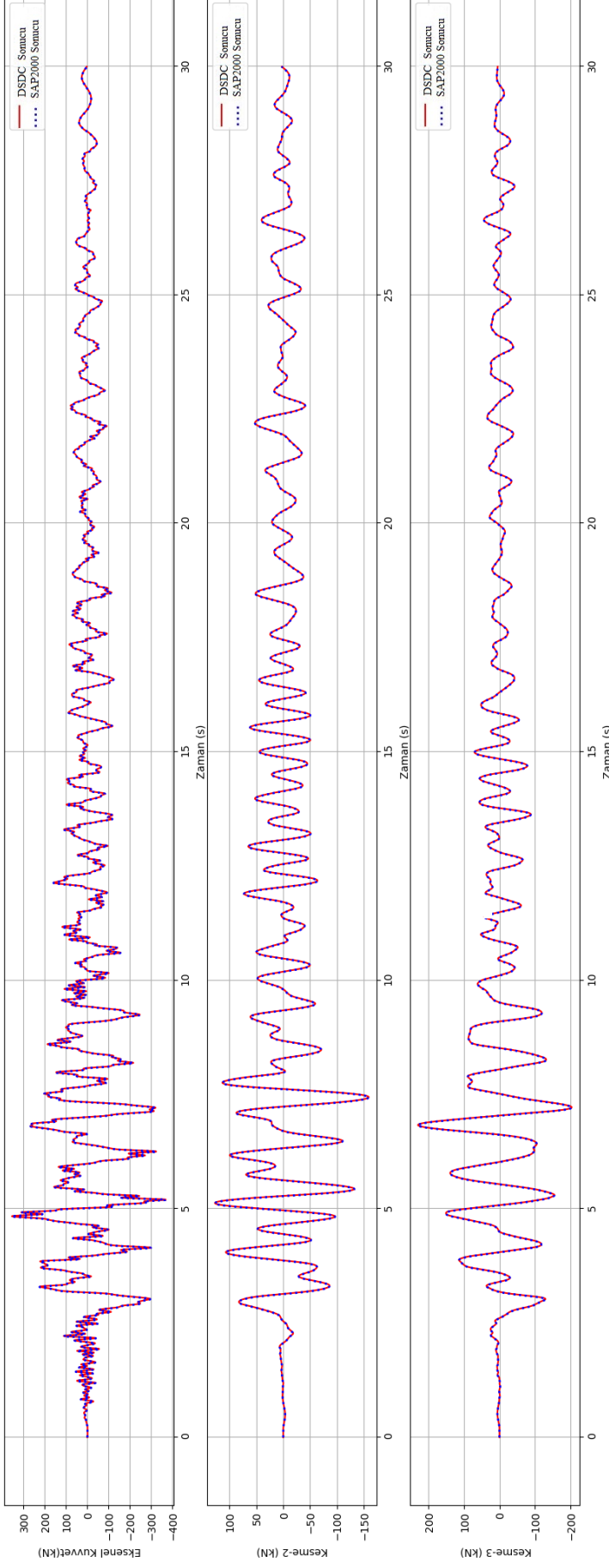


Şekil B.96 : 2B modeli Kobe depremi MT - DI RZ dönmesi.

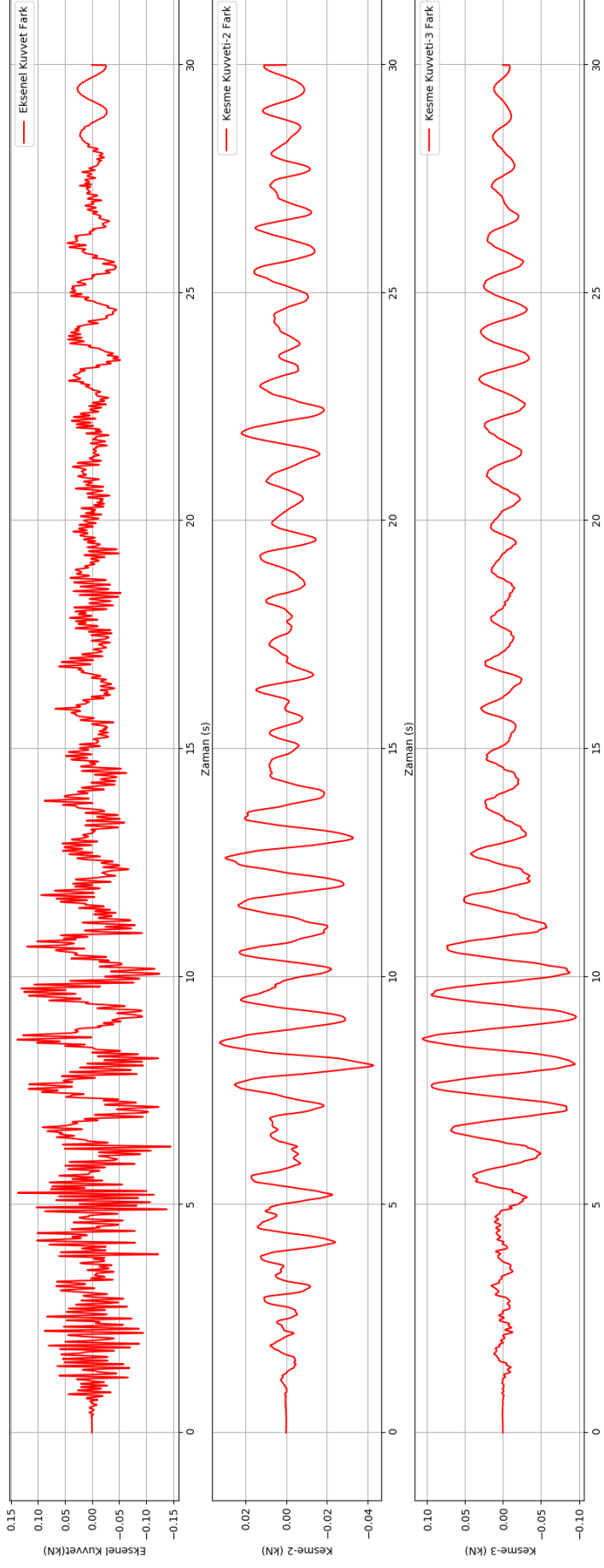


EK C: Zaman Tanım Alanında İçsel Kuvvetleri





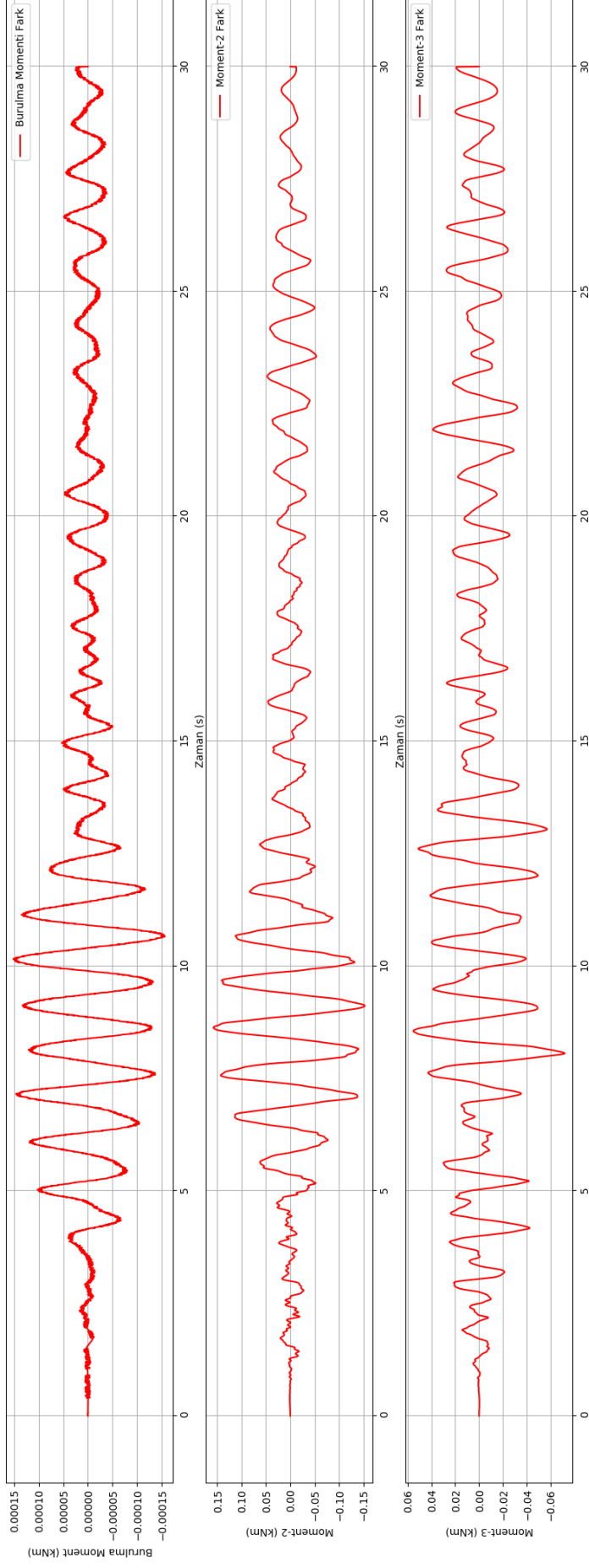
Şekil C.1 : 4 numaralı eleman iç kuvvetleri (N,T2,T3).



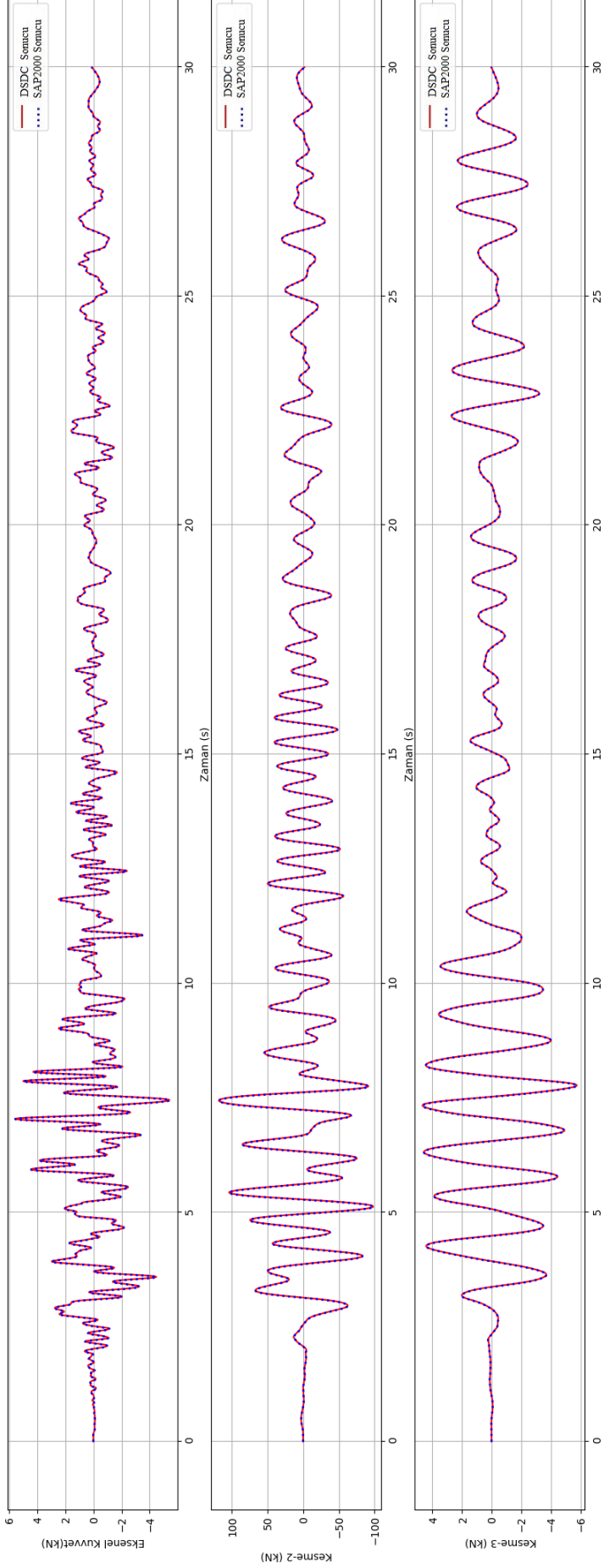
Şekil C.2 : 4 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N,T2,T3).



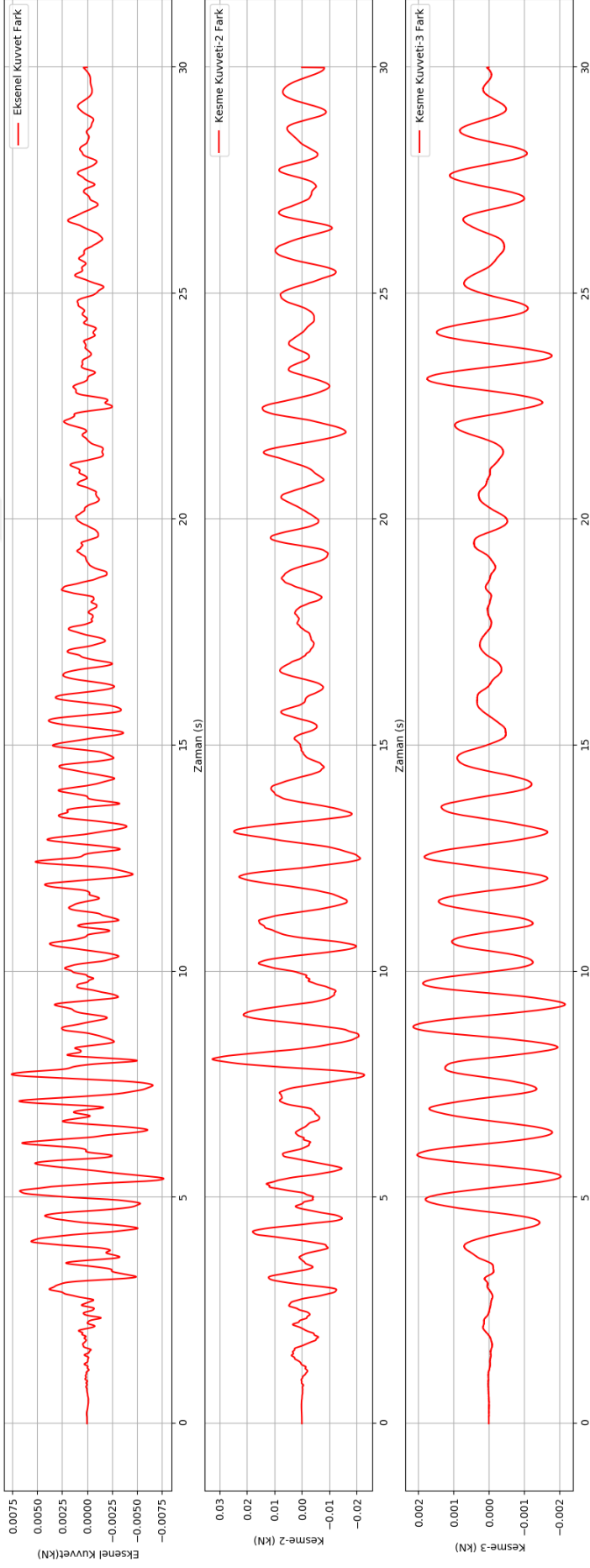
Şekil C.3 : 4 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



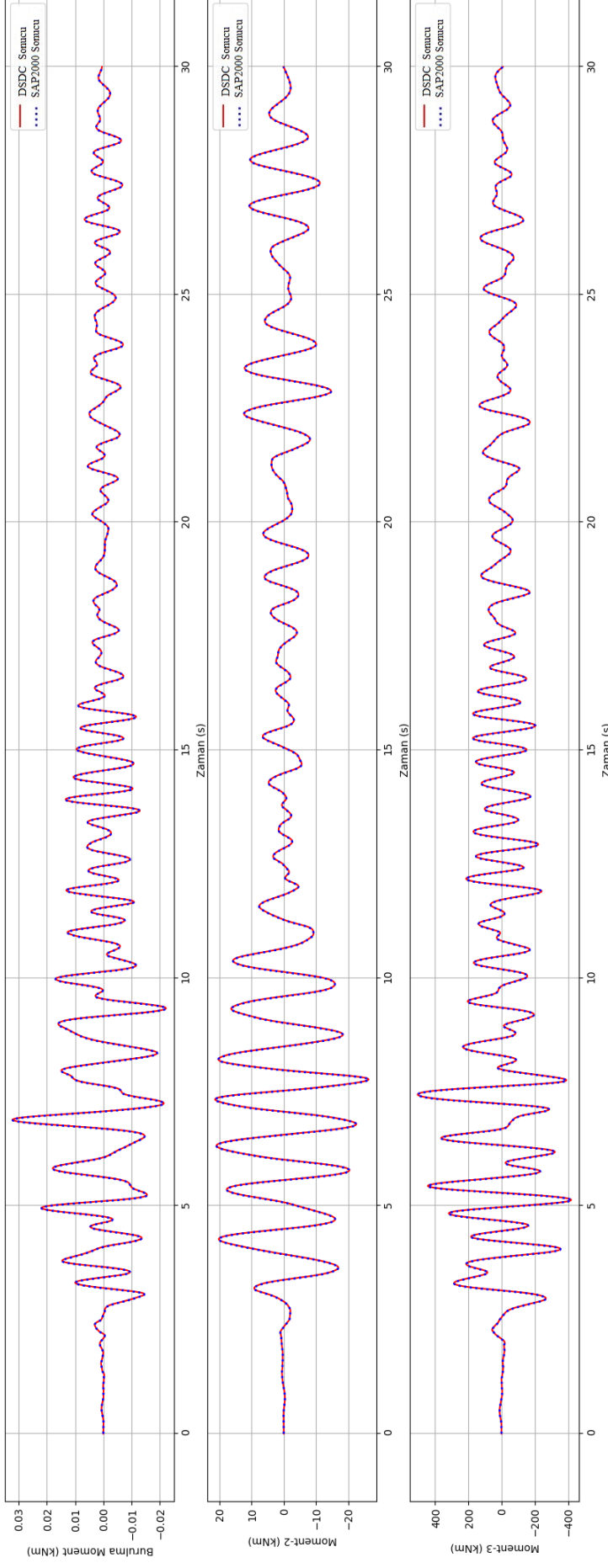
Şekil C.4 : 4 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



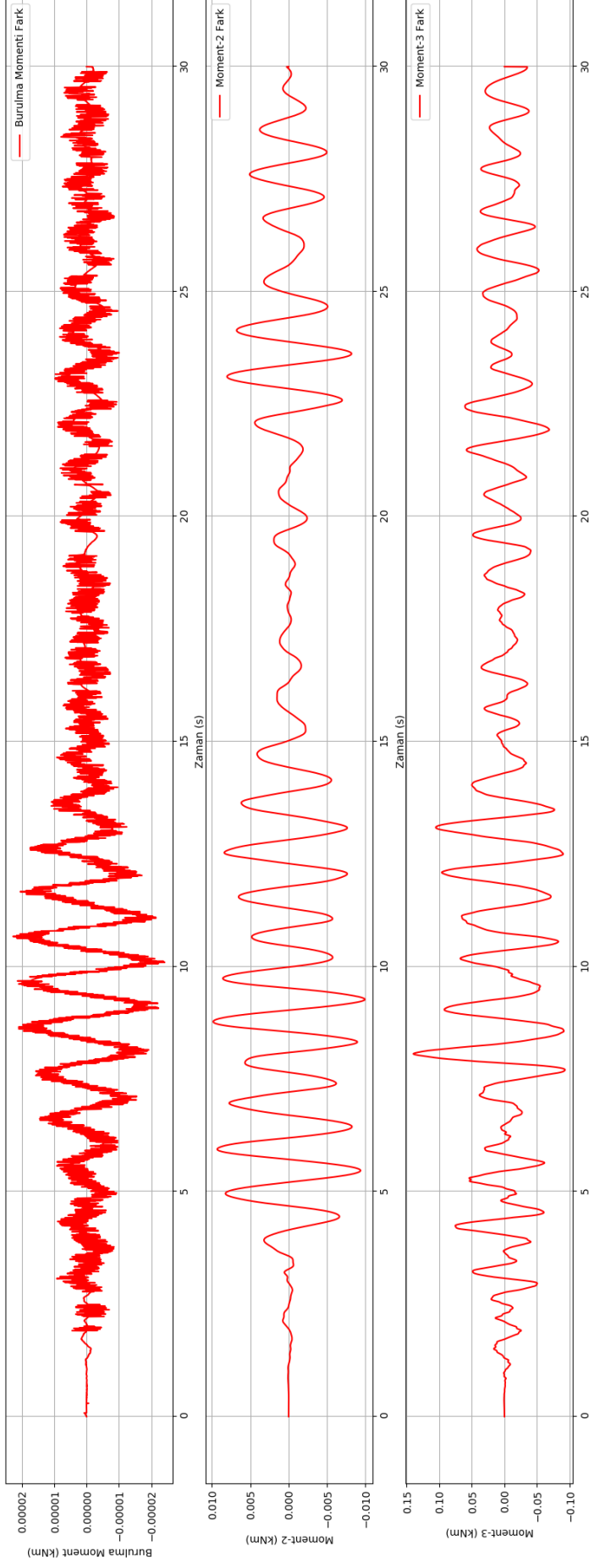
Şekil C.5 : 16 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



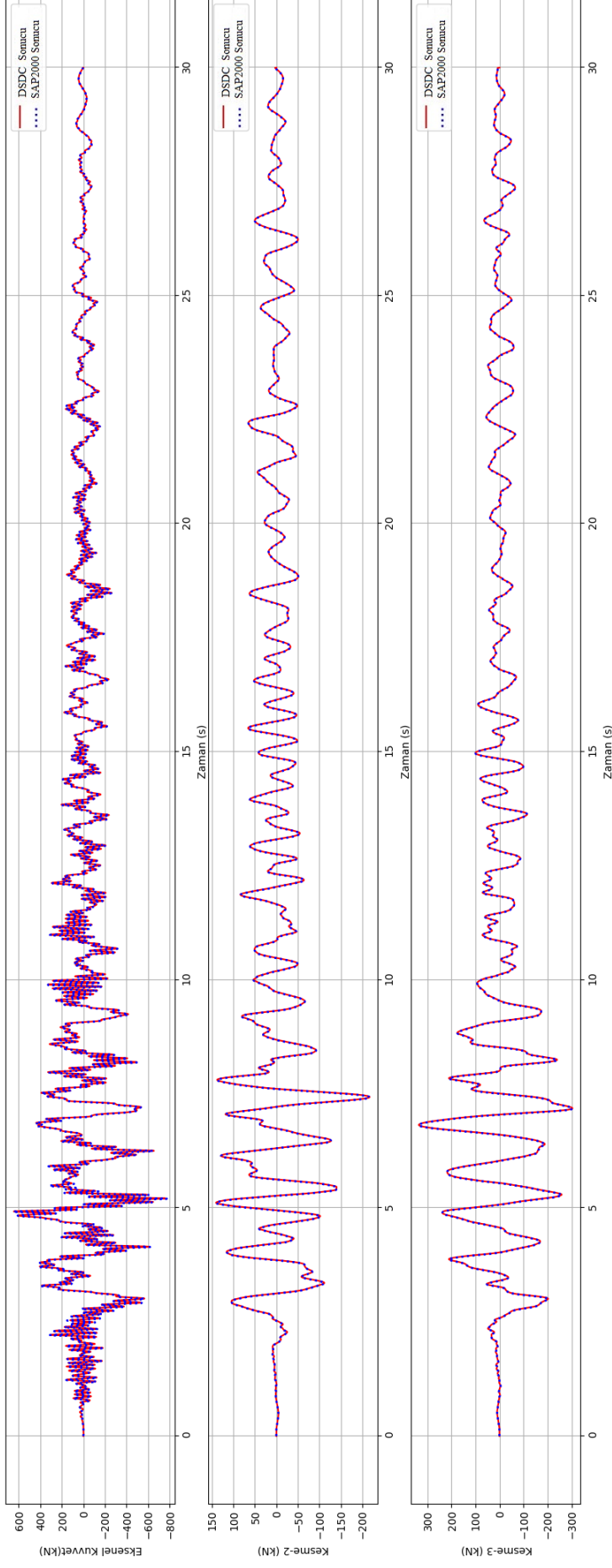
Şekil C.6 : 16 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



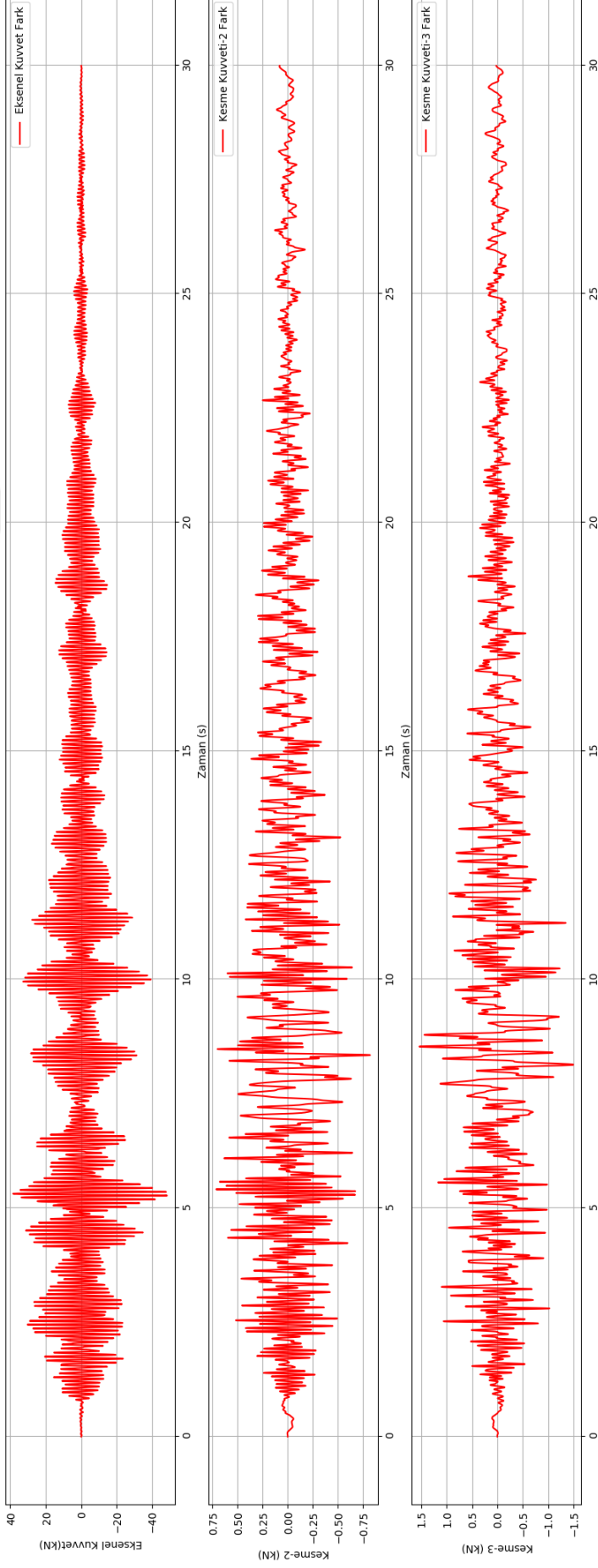
Şekil C.7 : 16 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



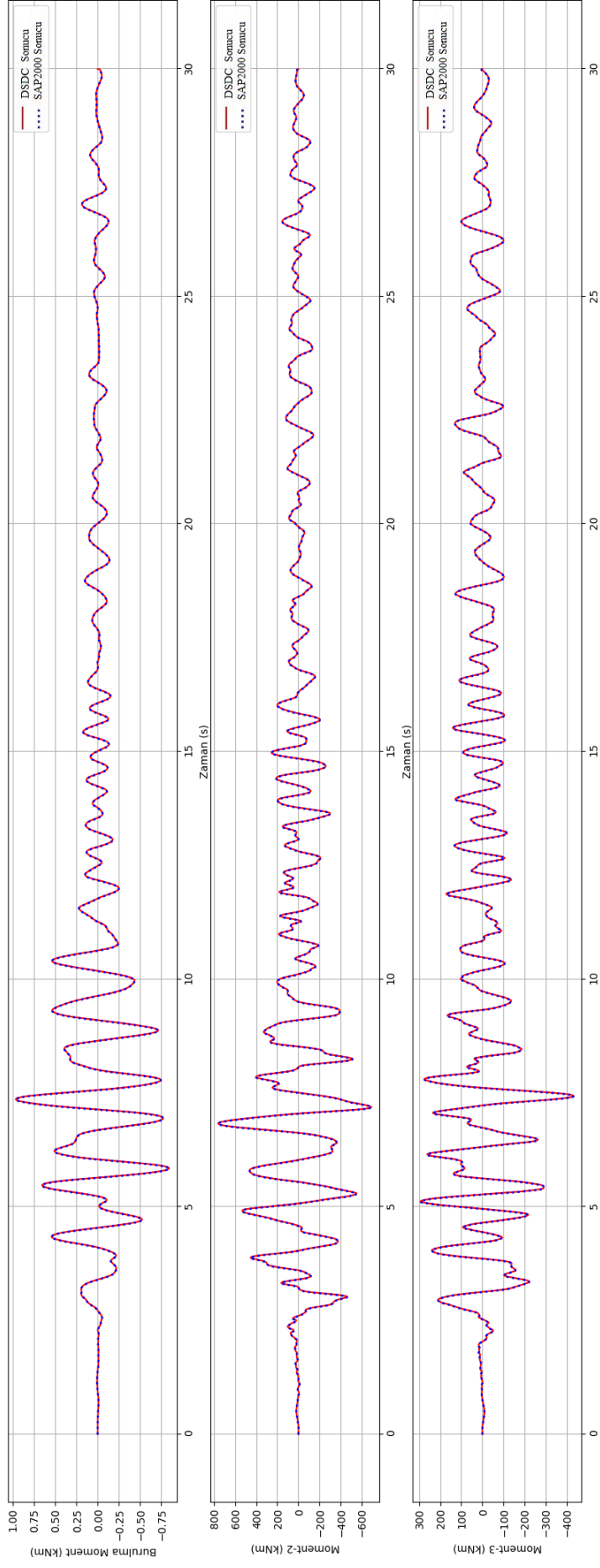
Şekil C.8 : 16 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



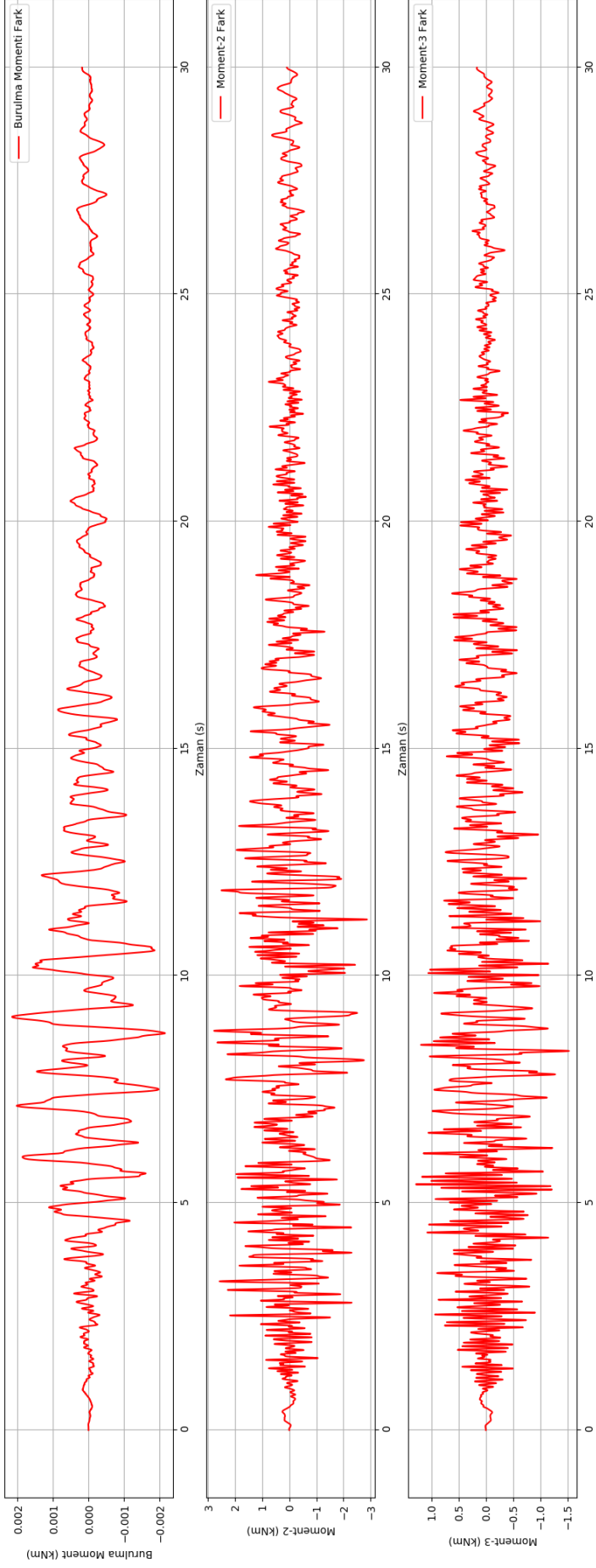
Şekil C.9 : 3 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



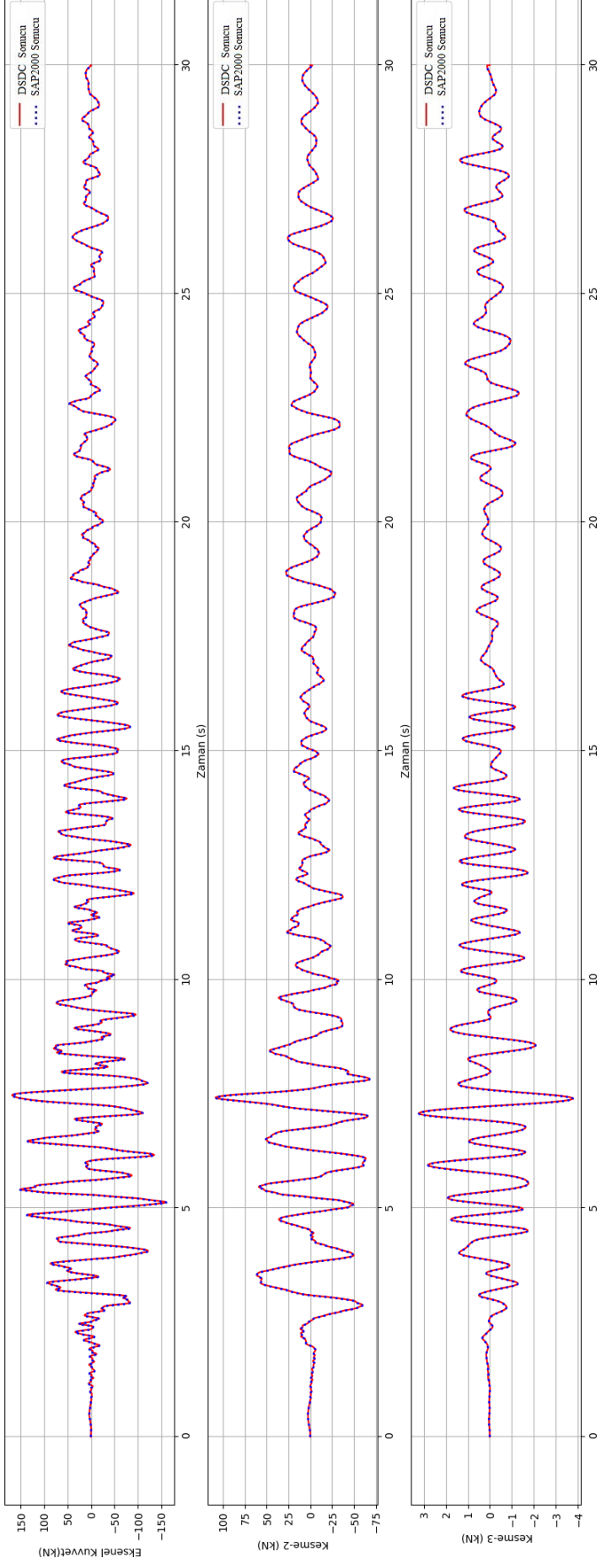
Şekil C.10 : 3 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



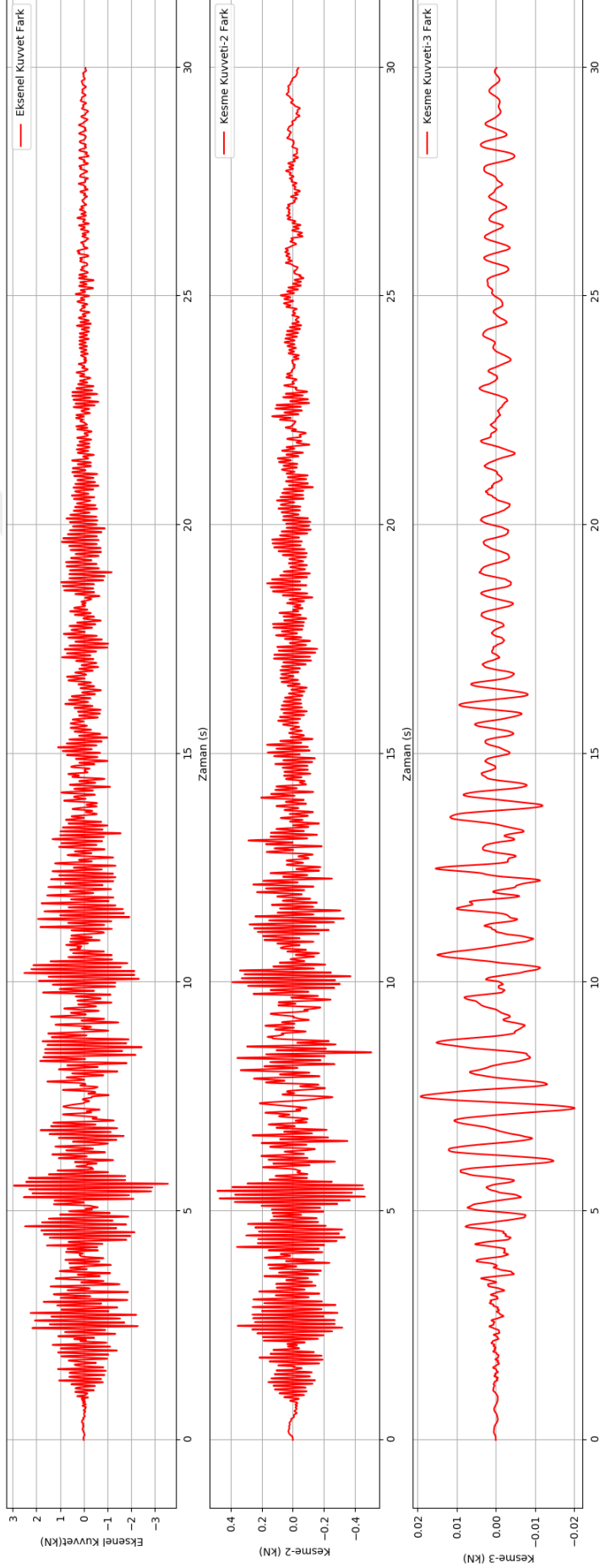
Şekil C.11 : 3 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



Şekil C.12 : 3 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



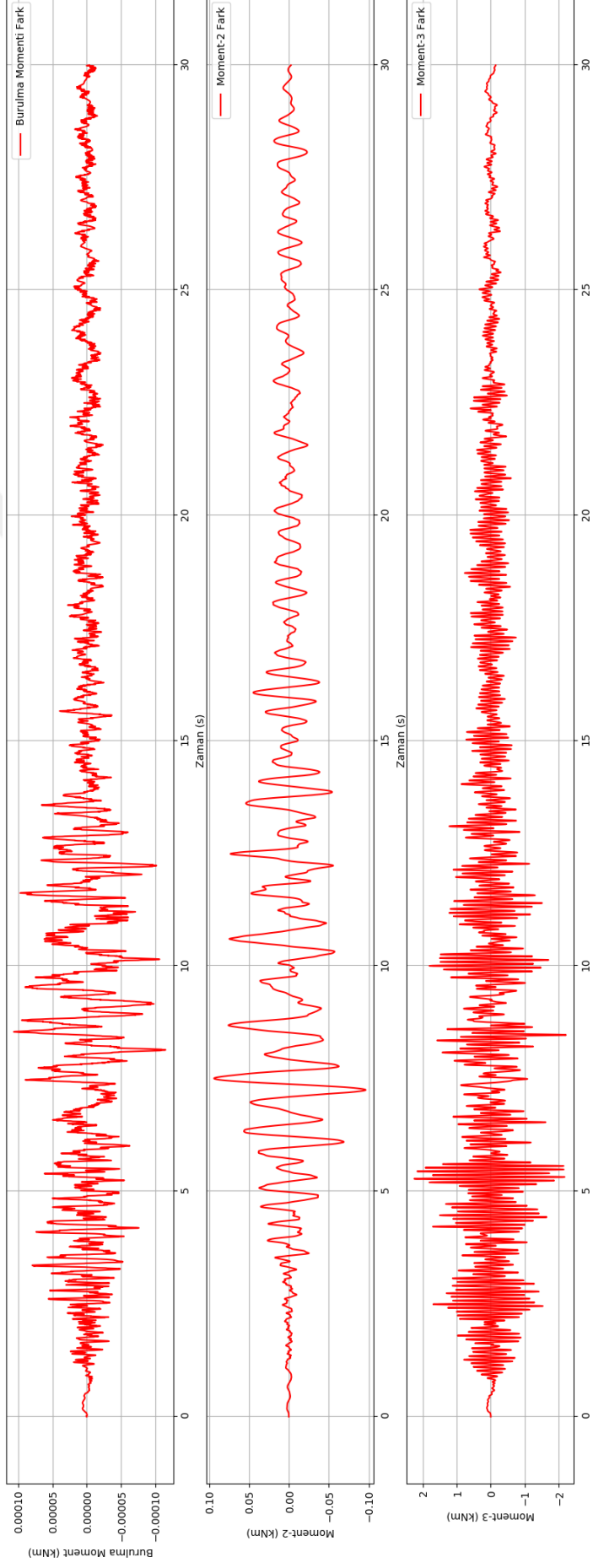
Şekil C.13 : 14 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



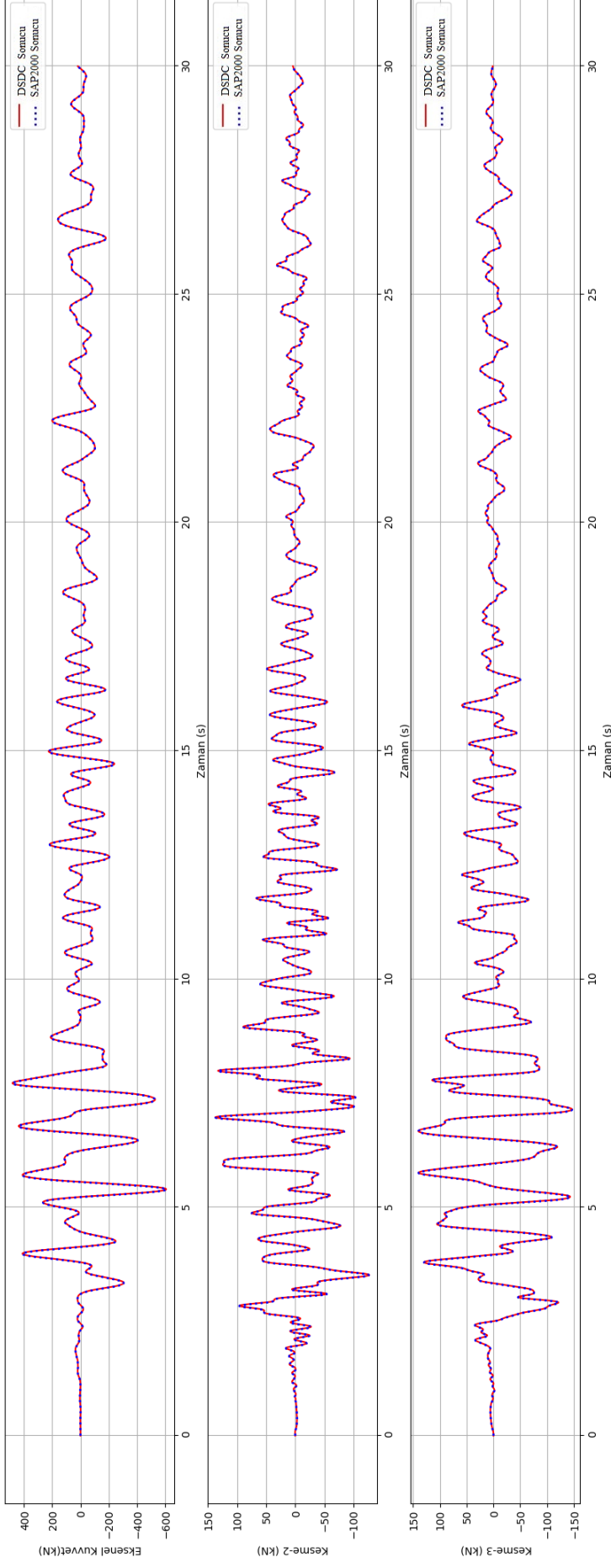
Şekil C.14 : 14 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



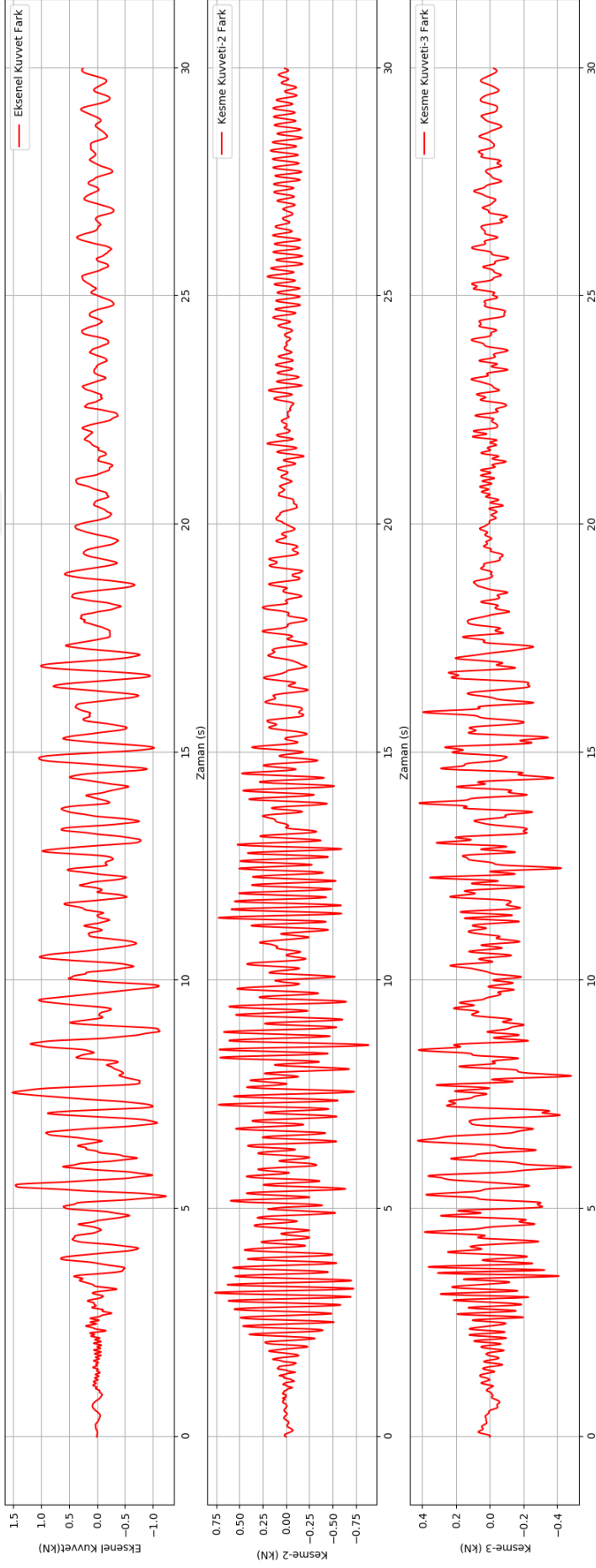
Şekil C.15 : 14 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



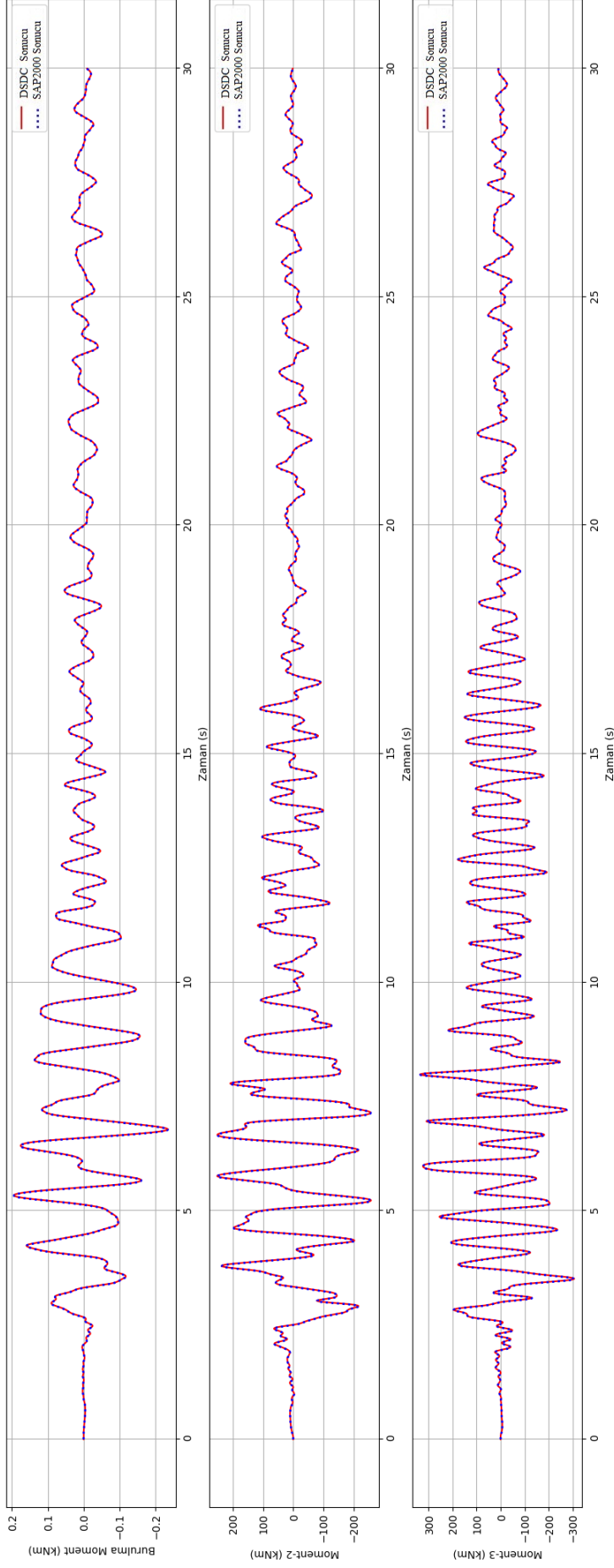
Şekil C.16 : 14 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



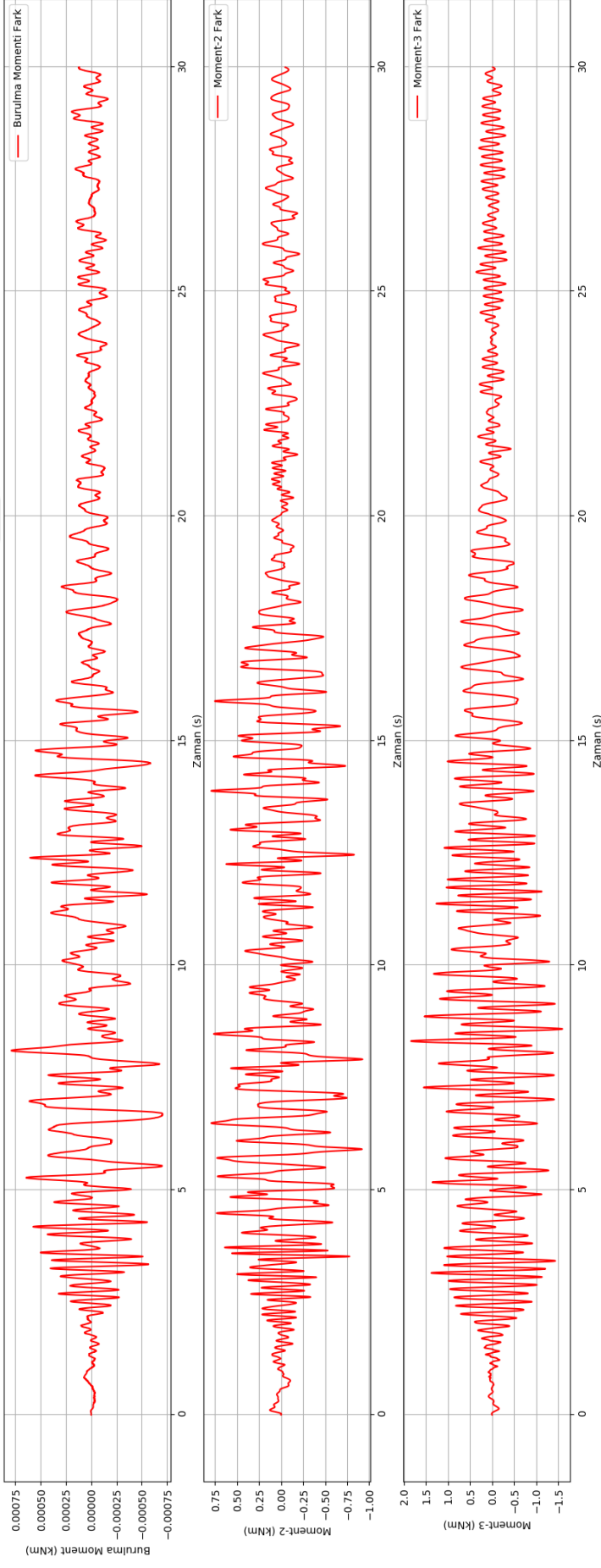
Şekil C.17 : 8 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



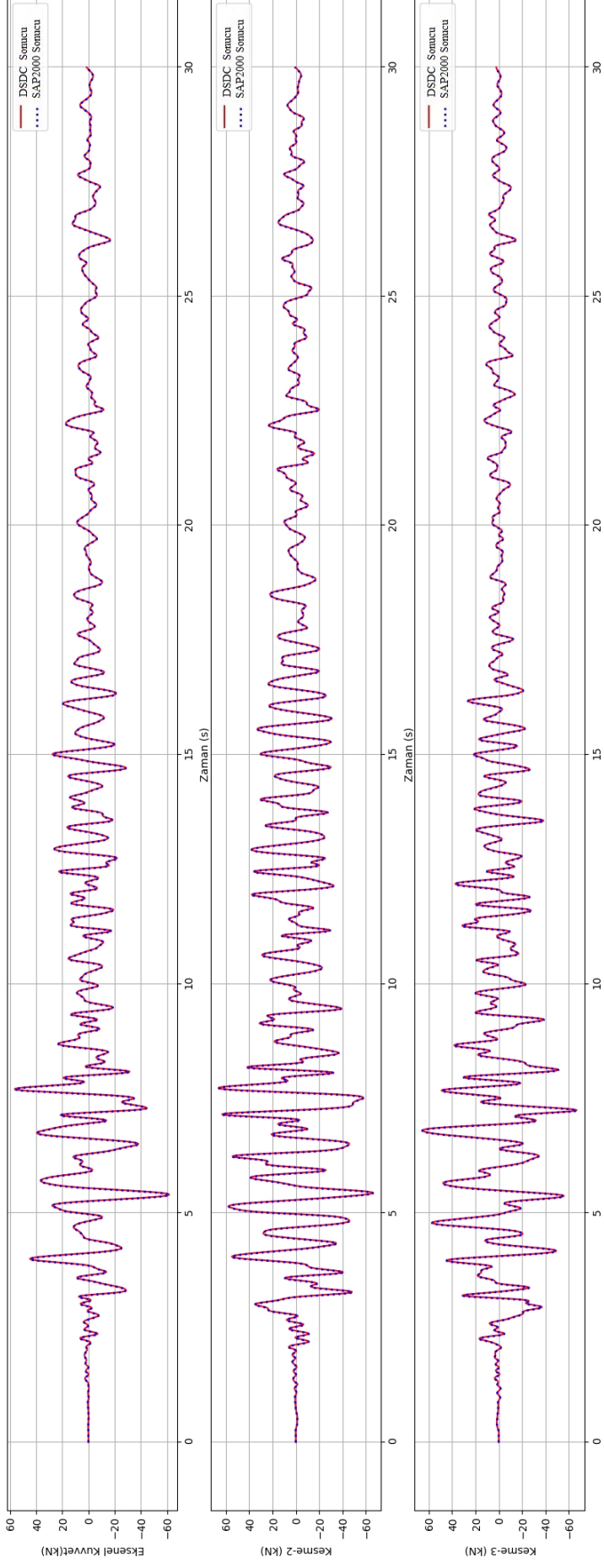
Şekil C.18 : 8 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



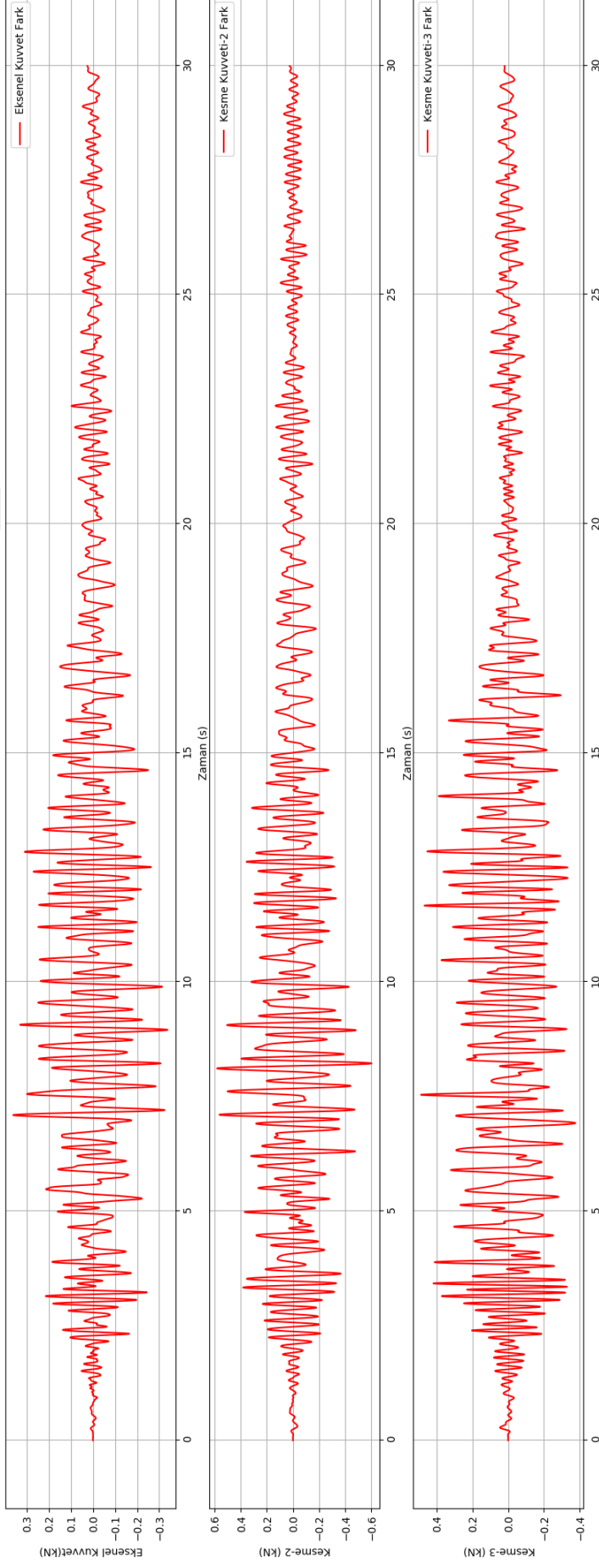
Şekil C.19 : 8 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



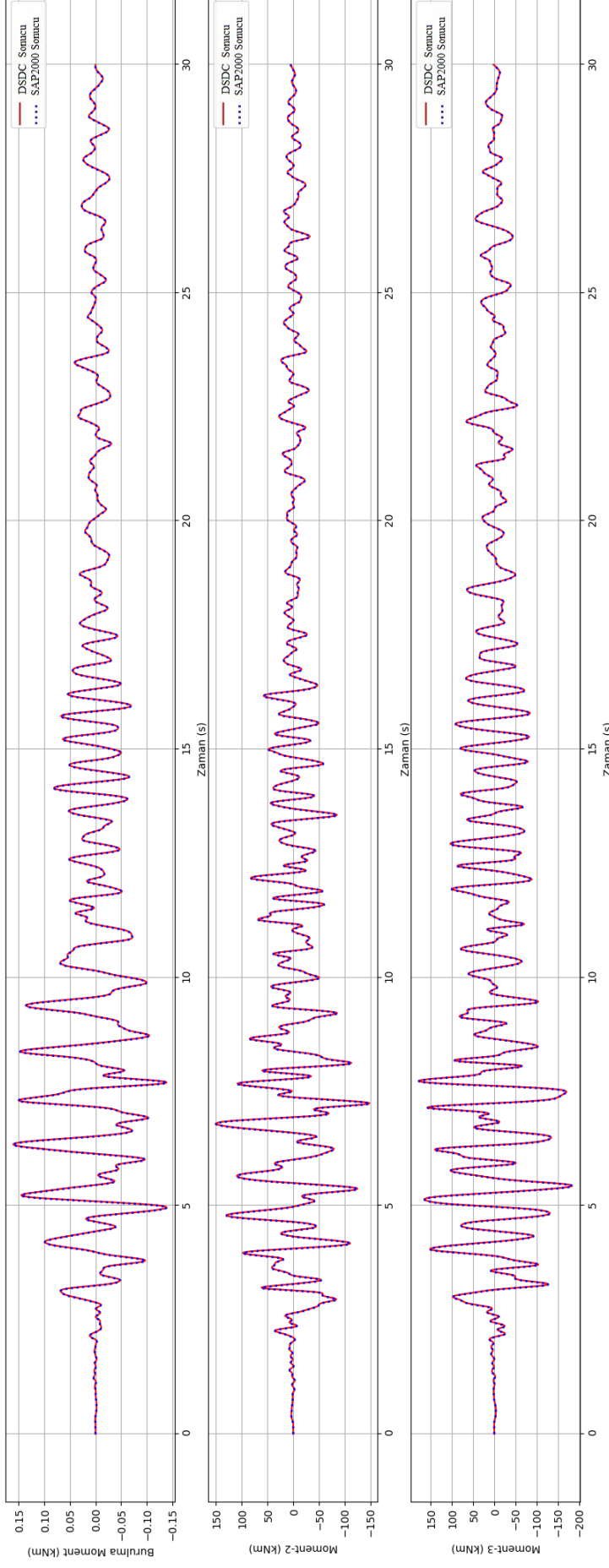
Şekil C.20 : 8 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



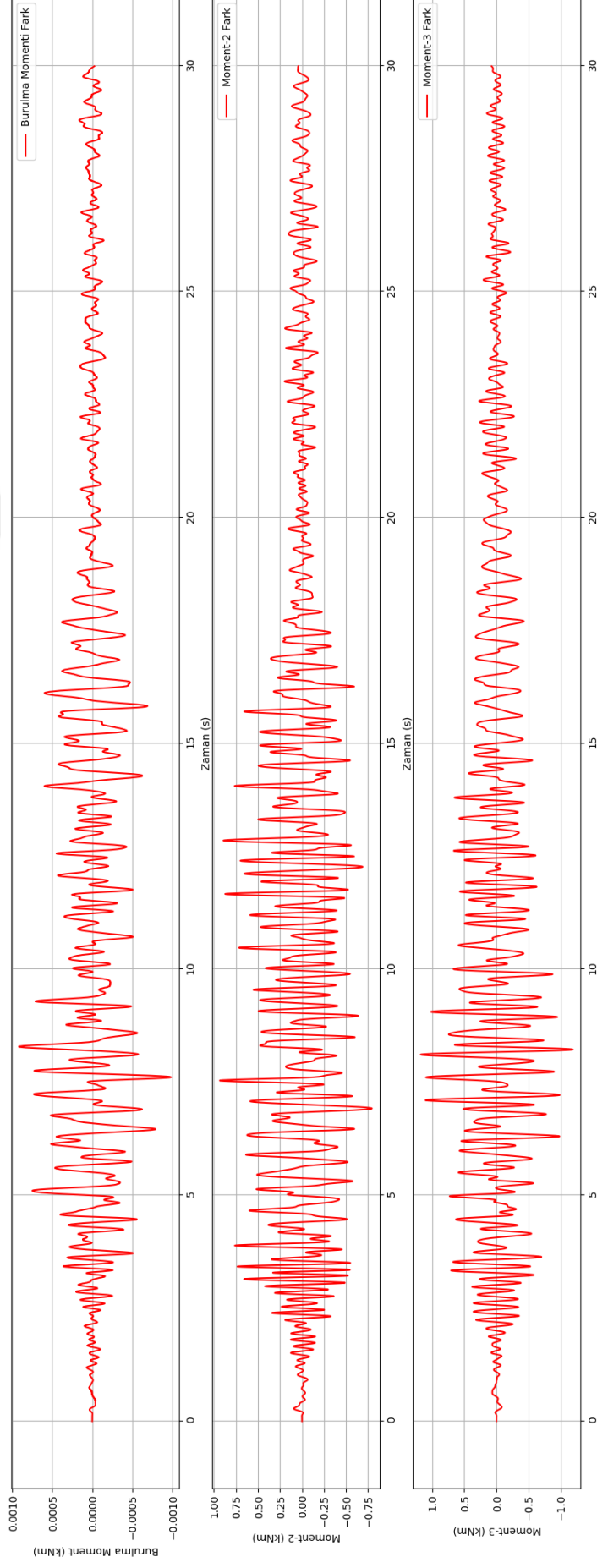
Şekil C.21 : 12 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



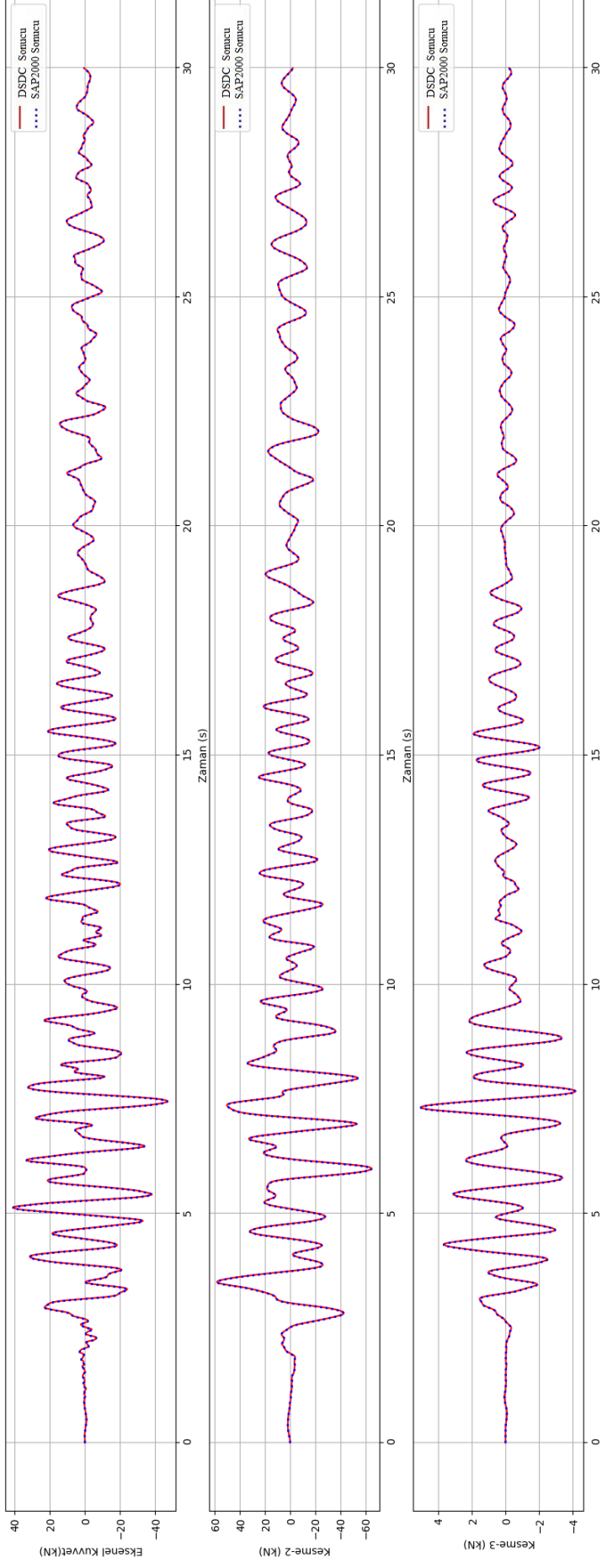
Şekil C.22 : 12 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



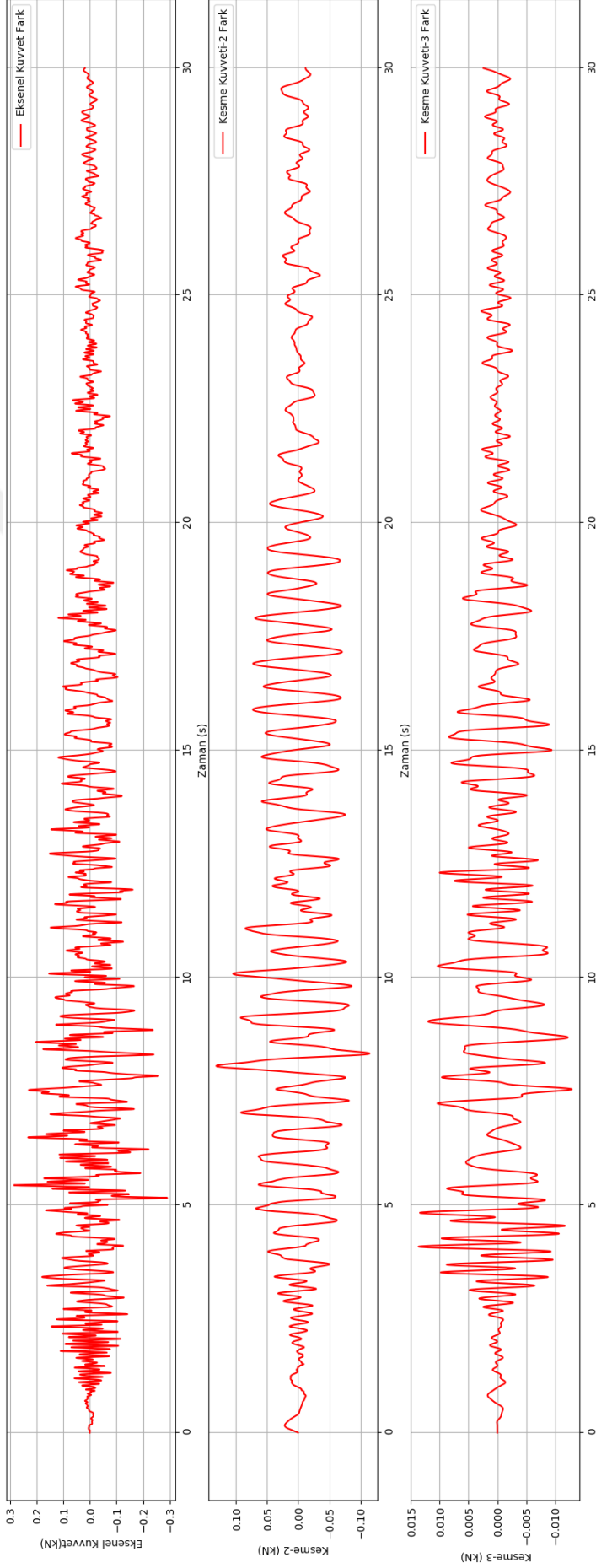
Şekil C.23 : 12 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



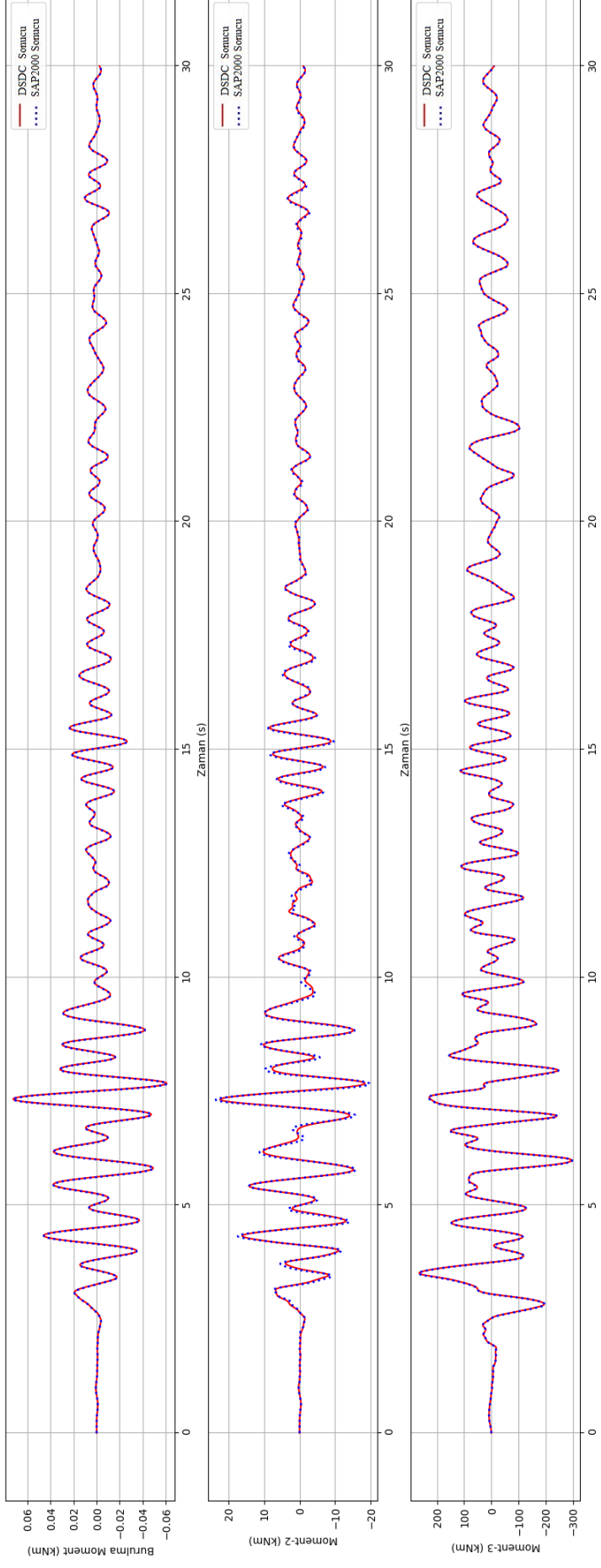
Şekil C.24 : 12 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



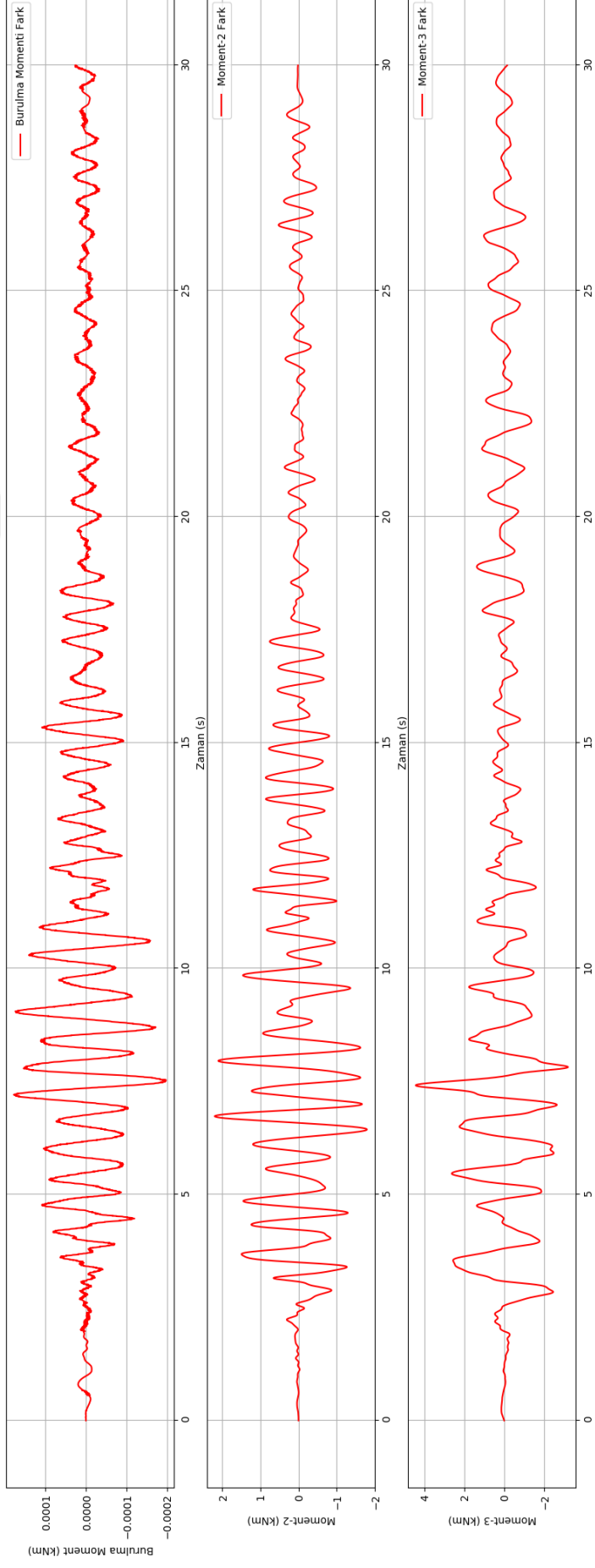
Şekil C.25 : 88 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



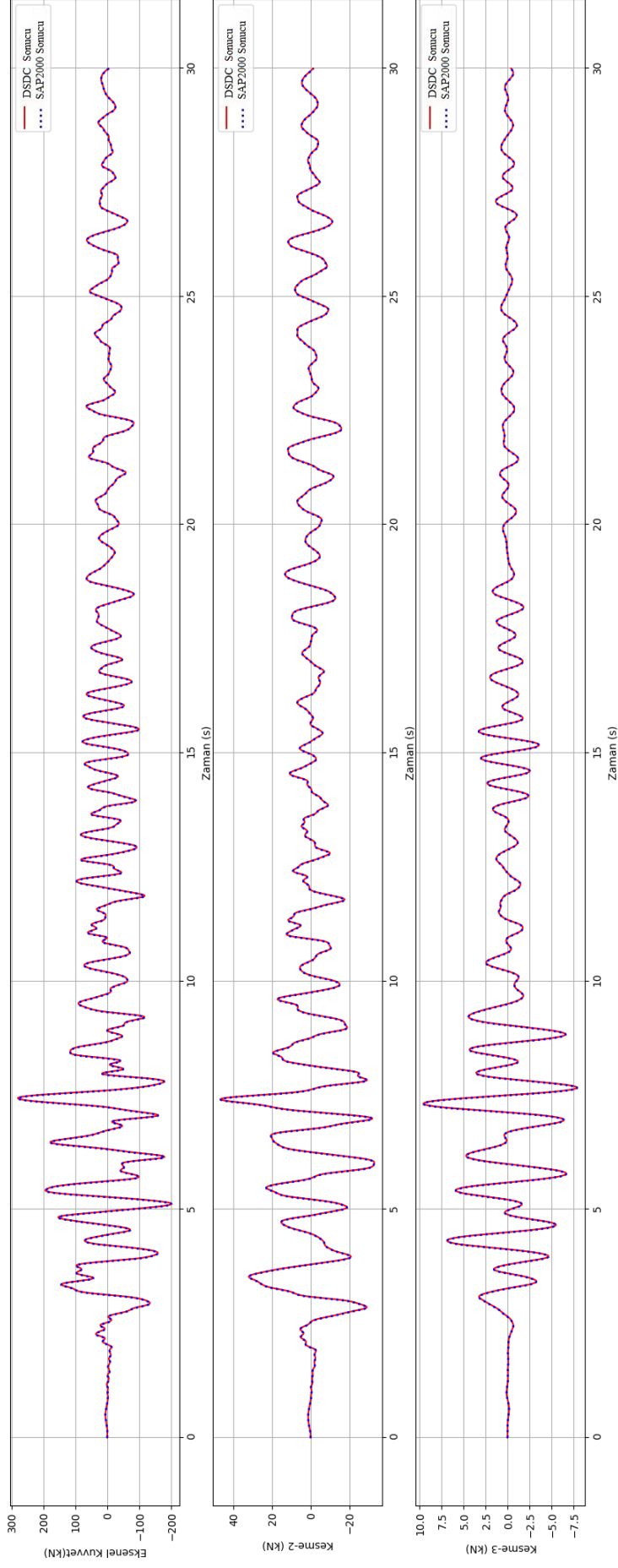
Şekil C.26 : 88 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



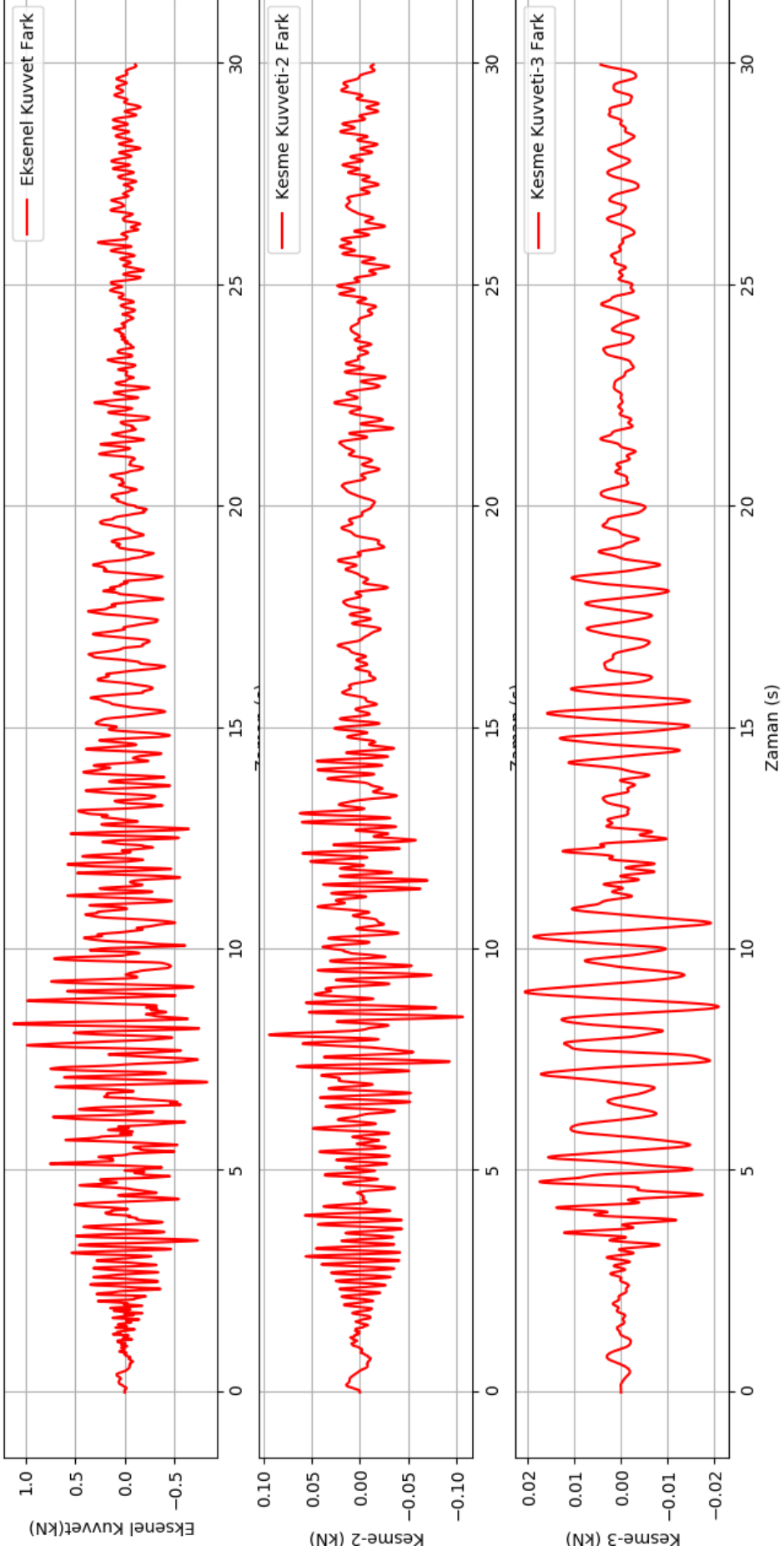
Şekil C.27 : 88 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



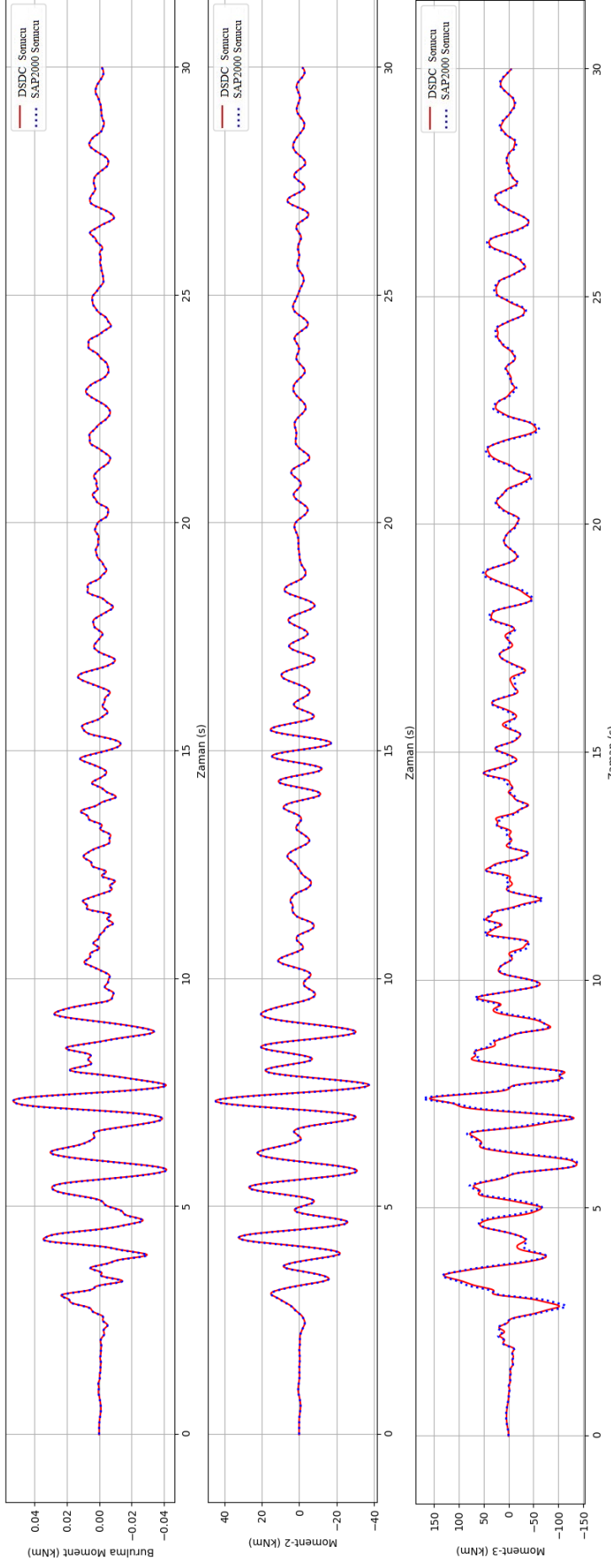
Şekil C.28 : 88 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



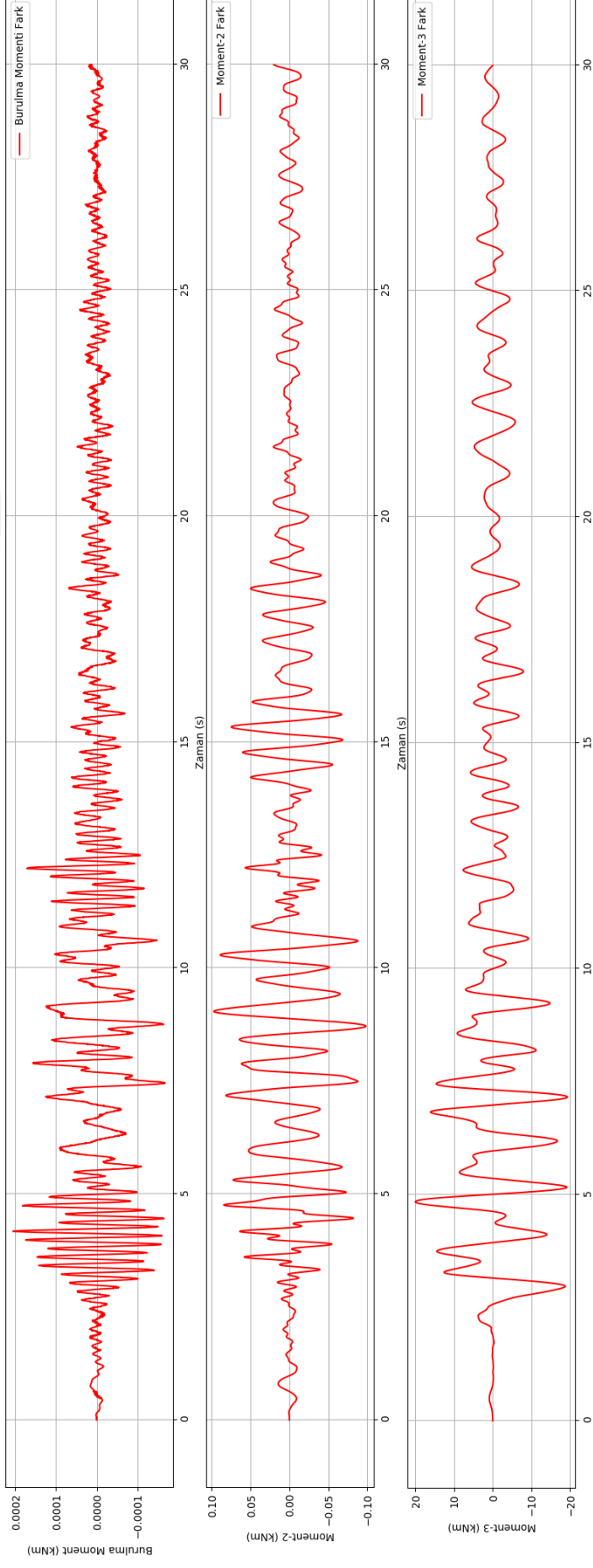
Şekil C.29 : 90 numaralı eleman iç kuvvetleri (N, T2, T3).



Şekil C.30 : 90 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (N, T2, T3).



Şekil C.31 : 90 numaralı eleman iç kuvvetleri (T, M2, M3).



Şekil C.32 : 90 numaralı eleman iç kuvvetleri farkı (T, M2, M3).



PHOTO

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Onur ALTAY

Doğum Tarihi ve Yeri:1990 - Sivas

E-Posta:altayonur07@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2014, Dokuz Eylül Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi,İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2014-2015 yılları arasında Ülker Mühendislik firmasında proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılından bu yana Antalya Bilim Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışıyor.