

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPI ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK ETKİLER
ALTINDAKİ BİR YAPI İÇİN SERİ BAĞLI AYARLI KÜTLE
SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

Feyza KABLAN

AĞUSTOS-2022
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK ETKİLER
ALTINDAKİ BİR YAPI İÇİN SERİ BAĞLI AYARLI KÜTLE
SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU**

**OPTIMIZATION OF SERIES TUNED MASS DAMPERS FOR A STRUCTURE
UNDER SEISMIC EXCITATIONS CONSIDERING SOIL STRUCTURE
INTERACTION**

YÜKSEK LİSANS

Feyza KABLAN

**AĞUSTOS-2022
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK SİSMİK ETKİLER
ALTINDAKİ BİR YAPI İÇİN SERİ BAĞLI AYARLI KÜTLE
SÖNÜMLEYİCİLERİN OPTİMİZASYONU**

**OPTIMIZATION OF SERIES TUNED MASS DAMPERS FOR A STRUCTURE
UNDER SEISMIC EXCITATIONS CONSIDERING SOIL STRUCTURE
INTERACTION**

YÜKSEK LİSANS

Feyza KABLAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ

**AĞUSTOS-2022
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Sismik Etkiler Altındaki Bir Yapı İçin Seri Bağlı Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

15/08/2022

Feyza KABLAN

TEŞEKKÜR

“Yapı Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Sismik Etkiler Altındaki Bir Yapı İçin Seri Bağlı Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Optimizasyonu” adlı bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasını tamamlamamda desteğini, ilgisini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ’a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Beni bu günlere getiren ömrümün her safhasında bana desteklerini ve güvenlerini maddi ve manevi anlamda hiç esirgemeyen, beni bugünlere getirmek için çok çabalayan güzel aileme sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Feyza KABLAN
GÜMÜŞHANE – 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sismik yükler altındaki bir yapıdaki dinamik tepkilerin azaltılmasında seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicinin kontrol performansı araştırılmıştır. Sayısal sonuçların elde edilmesinde 12 farklı deprem kaydı ve 3 farklı zemin sınıfı dikkate alınmıştır. Seri bağlı ayarlı kütle sönümleyiciye ait optimum parametrelerin elde edilmesinde genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, depremin frekans içeriğinin ve yapı zemin etkileşiminin seri bağlı ayarlı kütle sönümleyicilerin kontrol performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, seri bağlı ayarlı kütle sönümleyici için elde edilen sonuçlar klasik ayarlı kütle sönümleyiciyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ayarlı kütle sönümleyici, Genetik algoritma, Optimizasyon, Yapı zemin etkileşimi

SUMMARY

In this thesis, control performance of series tuned mass dampers are investigated for suppressing dynamic responses of a structures under seismic loads. 12 different earthquake records and 3 different soil classes are taken into account in obtaining the numerical results. Genetic algorithm method is used to obtain the optimum parameters of the series tuned mass damper. As a result of the study, it has been shown that the frequency content of the earthquake and the soil structure interaction have a significant effect on the control performance of series tuned mass dampers. In addition, the results obtained for the series tuned mass damper are compared with the traditional tuned mass damper.

Keywords: Tuned mass damper, Genetic algorithm, Optimization, Soil structure interaction

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	VI
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması	2
1.3. Tezin Kapsamı ve Önemi.....	5
1.4. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler İçin Teorik Esaslar.....	5
1.4.1. Sönümlü Ana Sistem ve TMD	5
1.4.2. Sönümlü Ana Sistem ve PTMD.....	6
1.4.3. Sönümlü Ana Sistem ve STMD.....	7
1.5. TMD Sisteminin Gerçek Yapılara Uygulanması	9
1.6. Deprem Etkisindeki Çok Katlı Yapılar	12
1.6.1. Yapının Zemine Rijit Olarak Mesnetlenmesi Durumu	13
1.6.1.1. Kontrolsüz Durumdaki Yapı.....	13
1.6.1.2. Yapı Üzerinde TMD Olması Durumu.....	14
1.6.1.3. Yapı Üzerinde STMD Olması Durumu	16
1.6.2. Yapının Zemine Rijit Olarak Mesnetlenmesi Durumu	17
1.6.2.1. Kontrolsüz Durumdaki Yapı	17
1.6.2.2. Yapı Üzerinde TMD Olması Durumu.....	19
1.6.2.3. Yapı Üzerinde STMD Olması Durumu	22
1.7. Optimizasyon Yöntemi	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	27
2.1. Giriş.....	27
2.2. 10 Katlı Binaya Ait Bulgular	32
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66

KAYNAKÇA.....	68
ÖZGEÇMİŞ	72



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bina özellikleri.....	27
Tablo 2. Zemin özellikleri.....	27
Tablo 3. Yapı-zemin etkileşiminde kullanılan rijitlik ve sönüm katsayıları.....	28
Tablo 4. Çalışmada kullanılan deprem kayıtları	28
Tablo 5. İlk beş moda karşılık gelen periyot değerleri (s)	32
Tablo 6. TMD için optimum değerler	32
Tablo 7. STMD için optimum değerler.....	32
Tablo 8. STMD’li ve STMD’siz durum için elde edilen maksimum tepkiler	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Ana sistem ve TMD	6
Şekil 2. Ana sistem ve PTMD.....	7
Şekil 3. Ana sistem ve STMD	8
Şekil 4. Yatay titreşimlerin azaltılması için üretilen TMD (URL-1, 2022).....	9
Şekil 5. Düşey titreşimlerin azaltılması için üretilen TMD (URL-1, 2022)	9
Şekil 6. Burj Al Arab oteli (URL-2, 2022)	10
Şekil 7. Millennium yaya köprüsü (URL-2, 2022)	10
Şekil 8. Britzer Damm yaya köprüsü (URL-2, 2022)	11
Şekil 9. Schwedter Straße köprüsü (URL-2, 2022)	11
Şekil 10. TMD uygulanmış bazı yapılar (Sahoo, P., 2015)	12
Şekil 11. Kontrolsüz durumdaki kesme binası.....	13
Şekil 12. TMD eklenmiş bina	15
Şekil 13. STMD yerleştirilmiş bina	16
Şekil 14. Kontrolsüz durumdaki bina.....	18
Şekil 15. TMD yerleştirilmiş bina.....	20
Şekil 16. STMD yerleştirilmiş bina	23
Şekil 17. Rijit durum için TMD'nin optimizasyonu	26
Şekil 18. Düşük frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları	29
Şekil 19. Orta frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları.....	30
Şekil 20. Yüksek frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları	31
Şekil 21. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (L-1-L-4).....	33
Şekil 22. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4).....	34
Şekil 23. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4).....	35
Şekil 24. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4).....	36
Şekil 25. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4).....	37
Şekil 26. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4).....	38
Şekil 27. S_A için elde edilen maksimum yer değiştirmeleri (L-1-L-4)	39
Şekil 28. S_A için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4).....	40
Şekil 29. S_A için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4)	41
Şekil 30. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4)	42
Şekil 31. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4).....	43
Şekil 32. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4)	44

Şekil 33. S_B için elde edilen maksimum yer değiştirmeleri (L-1-L-4)	45
Şekil 34. S_B için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4).....	46
Şekil 35. S_B için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4).....	47
Şekil 36. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4).....	48
Şekil 37. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4).....	49
Şekil 38. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4).....	50
Şekil 39. S_C için elde edilen maksimum yer değiştirmeleri (L-1-L-4)	51
Şekil 40. S_C için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4).....	52
Şekil 41. S_C için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4).....	53
Şekil 42. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4).....	54
Şekil 43. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4).....	55
Şekil 44. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4).....	56
Şekil 45. Rijit kabul için yer değiştirme-zaman eğrisi.....	58
Şekil 46. Rijit kabul için ivme-zaman eğrisi.....	58
Şekil 47. S_A için yer değiştirme-zaman eğrisi.....	59
Şekil 48. S_A için ivme-zaman eğrisi.....	59
Şekil 49. S_B için yer değiştirme-zaman eğrisi.....	60
Şekil 50. S_B için ivme-zaman eğrisi.....	60
Şekil 51. S_C için yer değiştirme-zaman eğrisi.....	61
Şekil 52. S_C için ivme-zaman eğrisi.....	61
Şekil 53. Rijit kabul için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları	62
Şekil 54. Rijit kabul için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları	62
Şekil 55. S_A için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları.....	63
Şekil 56. S_A için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları.....	63
Şekil 57. S_B için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları	64
Şekil 58. S_B için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları	64
Şekil 59. S_C için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları	65
Şekil 60. S_C için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AKS	: Ayarlı kütle sönümleyici
PTMD	: Parallel tuned mass damper
STMD	: Series tuned mass damper
TMD	: Tuned mass damper



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ayarlı kütle sönümleyicilerin (TMD) çoğunlukla rüzgâr etkisindeki narin yapılarda meydana gelen titreşimlerin kontrolünde etkili olduğu bilinmektedir. Buna karşın, son zamanlarda yapılan çalışmalarda TMD sistemlerinin deprem etkisindeki yapılardaki, yüksek hızlı tren etkisindeki köprülerdeki ve yaya köprülerindeki titreşimlerin azaltılmasında da etkili olduğu kanıtlanmıştır. TMD, kütle, rijitlik ve sönüm elamanından meydana gelen tek serbestlik dereceli bir sistemdir. Bu nedenle, yapıya eklenen her bir TMD yapının serbestlik derecesini o oranda artırmaktadır.

Bilindiği üzere, dış yüke ait frekansın yapının hâkim frekansı ile çakışması durumunda rezonans meydana gelmekte ve bunun sonucunda yapılarda aşırı hasarlar görülmektedir. Bundan dolayı, TMD sistemlerinin kullanılmasının temel amacı yapının hâkim frekansını kontrol etmektir. TMD sistemi, yapının sadece bir frekansına göre ayarlandığı için yapının ya da TMD'nin frekansındaki olası değişiklikler TMD'nin kontrol performansını olumsuz etkilemektedir. Bu değişiklikler yapım aşamasında ya da TMD'nin üretim aşamasında meydana gelebilmektedir. Bu durum, frekans kayması olarak bilinmektedir. Frekans kaymasına karşın farklı TMD sistemleri önerilmiştir. Bu sistemlerin başında paralel TMD sistemi (PTMD) gelmektedir. PTMD sistemi ilk olarak Xu ve Igusa (1992) tarafından önerilmiştir. Bu sistem farklı özelliklere sahip birden fazla TMD'nin paralel olarak bağlanması ile oluşmaktadır. PTMD sistemi birden fazla TMD ye sahip olması nedeniyle tek bir frekans yerine belli bir frekans aralığında etkili olmaktadır. Bu nedenle, frekans kaymasına karşın TMD ye göre daha etkili olmaktadır. PTMD sisteminin deprem, rüzgâr ve hareketli yüklerin etkisindeki yapılarda meydana gelen titreşimlerin azaltılmasındaki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Frekans kaymasına karşın önerilen sistemlerden bir diğeri de seri bağlı TMD sistemi (STMD) dir. STMD sistemi birbirine seri olarak bağlanmış iki farklı TMD'den meydana gelmektedir. STMD, ilk olarak Liu ve Zhu (2006) tarafından önerilmiştir. STMD sistemi daha az TMD birimine sahip olmasına karşın PTMD sisteminden daha etkin performans göstermektedir. Buna karşın, literatürde STMD sisteminin PTMD sistemine göre daha az çalışıldığı görülmektedir. Bu sebeple, STMD sisteminin yapılardaki titreşimlerin azaltılmasında kullanılması ve optimum parametrelerinin belirlenmesinin üzerinde önemle durulması gereken konular olduğu açıktır.

1.2. Literatür Araştırması

TMD kavramı ilk olarak Frahm (1911) tarafından ortaya atılmıştır. Frahm tarafından patenti alınan bu sistem yalnızca kütle ve rijitlikten meydana geldiği için daha çok ayarlı kütleye karşılık gelmektedir. Sönüm elemanına sahip olmadığı için sadece rezonans durumunda etkili olmaktadır. TMD ile ilgili bilinen ilk teorik çalışma Ormondroyd ve Den Hartog (1928) tarafından yapılmıştır. Ormondroyd ve Den Hartog (1928), Frahm (1911) tarafından patenti alınan sisteme sönüm elemanı dahil ederek olası frekans sapması durumunda oluşabilecek ani performans kaybının önüne geçmişlerdir. Den Hartog (1956) tarafından yazılan *Mechanical Vibrations* isimli kitapta TMD'nin optimum parametrelerinin elde edilmesine yönelik bazı ampirik formüller önerilmiştir. Bu formüller, TMD kütlelerinin yapının kütlelerine oranı olarak tanımlanan kütle oranına bağlı olarak verilmektedir. Önerilen formüller harmonik yük etkisindeki tek serbestlik dereceli yapı için elde edilmesine karşın günümüzde deprem ve rüzgâr yüklerinin etkisindeki çok serbestliğe sahip yapılarda meydana gelen titreşimlerin azaltılmasında da etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Daha sonra, TMD'nin optimum parametrelerin belirlenmesine yönelik birçok çalışma ortaya atılmıştır. Bu çalışmalarda, yazarlar TMD'nin optimum parametrelerinin belirlenmesinde, ana yapıya ait sönüm oranının (Bakre ve Jangid, 2007), farklı dış yüklerin (Li ve Zhu, 2006) ve farklı optimizasyon yöntemlerinin (Bandivadekar ve Jangid, 2013) etkisini incelemişlerdir. Tek serbestlik dereceli yapılardaki titreşimlerin TMD kullanılarak azaltılmasını konu alan bu çalışmaları, benzer sistemler üzerine eklenmiş farklı TMD sistemleri kullanılarak yapılan çalışmalar takip etmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemler üzerindeki titreşimlerin PTMD sistemi kullanılarak azaltılması birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Joshi ve Jangid, 1997; Jangid, 1999; Araz ve Kahya, 2018). Yazarlar, bu çalışmalarda optimum parametrelerin ve kontrol performansının üzerinde farklı TMD sayısının, farklı kütle oranının etkisini incelemişlerdir. Liu ve Zhu (2006), Zuo (2009), Araz (2021), harmonik yük etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemlerdeki titreşimlerin azaltılmasında STMD sisteminin etkinliğini incelemişlerdir. Tek serbestlik dereceli sistemlerdeki titreşimlerin azaltılması üzerine yapılan bazı çalışmalarda ise farklı TMD sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Yazarlar bu çalışmalarda, üç elemanlı TMD (Asami ve Nishihara, 2002; Anh vd., 2013; Araz, 2021) ve geleneksel olmayan TMD (Liu ve Liu, 2005; Cheung ve Wong, 2011; Chun vd., 2015; Anh vd., 2016; Yuan vd., 2018; Araz, 2020) sistemlerinin geleneksel TMD'ye göre daha yüksek kontrol performansı sağladığını belirtmişlerdir.

Yapıların sismik yükler altındaki performanslarının artırılmasında TMD sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sismik yüklerin azaltılmasını konu alan çalışmaların önemli bir kısmında üst yapı zemine rijit olarak mesnetlenmektedir. Bu kabul, yeterli rijitliğe sahip zeminler üzerine inşa edilen yapılarda etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için elde edilen periyot değerlerinin birbirine yakın olması sebebiyle doğru kabul edilebilir. Buna karşın, düşük rijitliğe sahip yani esnek zeminler üzerine inşa edilen yapılarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması halinde yapının dinamik karakteristiklerinin ve dinamik tepkilerinin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Bu nedenle, sismik yükler altındaki yapılarda meydana gelen dinamik tepkilerin doğru bir şekilde tespit edilmesi ancak tasarım aşamasında yapı-zemin etkileşiminin göz önüne alınmasıyla mümkündür. Bununla birlikte, TMD'nin optimum tasarım parametrelerinin gerçekçi bir şekilde elde edilmesinde yapı-zemin etkileşimin dikkate alınması son derece önemlidir. Bundan dolayı TMD kullanılarak sismik yüklerin azaltılmasını konu alan çalışmalar iki grup altında özetlenecektir. İlk grupta, TMD'nin optimum tasarım parametrelerin elde edilmesinde üst yapının zemine rijit olarak mesnetlendiği çalışmalara yer verilecektir. Daha sonra, TMD'nin optimum tasarımında yapı-zemin etkileşimini dikkate alan çalışmalar verilecektir.

Sladek ve Klingner (1983), Den Hartog (1956) tarafından önerilen formülleri kullanarak tasarlamış oldukları TMD'nin 25 katlı bir binadaki sismik tepkilerin azaltılmasındaki etkinliğini araştırmışlardır. Sadek vd. (1997), tek serbestlik dereceli sistemler için elde etmiş oldukları ampirik formülleri sismik yükler etkisindeki çok katlı yapılara uyarlamışlardır. Hadi ve Arfadi (1998), sismik yüklerin etkisindeki 10 katlı bir binanın en üst katında meydana gelen yer değiştirme ve ivmelerin azaltılmasında TMD'nin etkisini incelemişlerdir. Jangid (1999), yer hareketi etkisindeki sönümsüz tek serbestlik dereceli bir yapı için PTMD sisteminin optimum parametrelerini araştırmıştır. Yazar, optimum ortalama frekans oranının, optimum sönüm oranının ve optimum frekans genişliğinin kütle oranı ve TMD sayısı ile değişimini incelemiştir. Chen ve Wu (2001), deprem etkisindeki çok katlı binalarda yapısal olmayan bileşenlere gelebilecek olası hasarın azaltılmasında PTMD sisteminin etkinliğini incelemişlerdir. Li (2002) yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli bir yapı için PTMD'nin optimum parametrelerini araştırmıştır. Yazar, optimum parametrelerin belirlenmesinde yer değiştirme ve ivmeye ait dinamik büyütme faktörünün azaltılmasını amaçlamıştır. Li ve Liu (2003), yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli bir yapıdaki titreşimlerin azaltılmasında farklı özelliklere sahip PTMD sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Li ve Zhu (2006), yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli yapıdaki titreşimlerin

azaltılmasında STMD'nin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, STMD sisteminin kontrol performansını TMD ve PTMD sistemleriyle karşılaştırmışlardır. Zuo (2009), yer hareketi etkisindeki sönümlü sistemlerdeki titreşimlerin azaltılmasında STMD'nin etkinliğini araştırmıştır. Bekdaş ve Niğdeli (2011), deprem etkisindeki 10 katlı bir binada meydana gelen yer değiştirmeleri TMD kullanarak azaltmışlardır. Yazarlar, TMD'nin optimum tasarım parametrelerinin elde edilmesinde armoni tarama yöntemini kullanmışlardır. Tributsch ve Adam (2012), yapı ve TMD'nin frekasında meydana gelen sapmanın sismik tepkilerin azaltılması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Salvi ve Rizzi (2015), çok katlı bir kesme binasının en üst katına yerleştirilen TMD'nin optimum tasarım parametrelerini *minimax* optimizasyon algoritmasını kullanarak elde etmişlerdir. Özsarıyıldız ve Bozer (2015), diferansiyel evrim optimizasyon algoritması kullanarak TMD'nin optimum parametrelerini araştırmışlardır. Salvi ve Rizzi (2017), deprem mühendisliği özelinde TMD cihazlarının kontrol performanslarını detaylı olarak araştırmışlardır. Araz ve Kahya (2018), PTMD sisteminin optimum tasarımında ve kontrol performansı üzerinde TMD birimlerine ait özelliklerin (kütle, rijitlik ve sönüm) etkisini incelemişlerdir. Cetin ve Aydın (2019), TMD'nin optimum tasarımı için transfer fonksiyonuna dayalı bir yöntem önermişlerdir. Araz ve Kahya (2021), deprem etkisindeki 10 katlı bir binadaki titreşimlerin azaltılması üzerinde STMD sisteminin etkinliğini araştırmışlardır.

Ghosh ve Basu (2004), sismik kuvvetlerin etkisindeki tek serbestlik dereceli bir yapı üzerinde yapmış oldukları çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin TMD'nin performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Jabary ve Madabhushi (2017), TMD sayısının ve konumunun yapının sismik davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Khoshnoudian vd. (2017), yakın fay yer hareketine maruz kalan binaların titreşim kontrolünde TMD'nin etkisini araştırmışlardır. Son zamanlarda, yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak TMD'nin kontrol performansını inceleyen çalışmaların büyük çoğunluğunda benzer yapının dikkate alındığı görülmektedir (Salvi vd., 2018; Bekdaş vd., 2019; Kamgar vd., 2019; Soheili vd., 2021; Kaveh ve Ardebili, 2021; Araz vd., 2022). Bu çalışmalarda, 40 katlı bir kesme binasının en üst katında meydana gelen en büyük yer değiştirme ve ivme tepkilerinin azaltılmasında TMD'nin etkinliği araştırılmıştır. Farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılan bu çalışmalarda, yapı-zemin etkileşiminin TMD'nin optimum tasarım parametreleri ve kontrol performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir.

1.3. Tezin Kapsamı ve Önemi

Mylonakis ve Gazetas (2000), 1985 yılında meydana gelen Meksika depreminin özellikle yumuşak kil üzerine inşa edilmiş 10 ile 12 katlı yapılar üzerinde önemli hasarlara sebep olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, söz konusu yapıların zemine ankastre mesnetlenmesi halinde hâkim periyotlarının yaklaşık 1 saniye olarak elde edilmesine karşın, yapı-zemin etkileşimi sebebiyle bu değerin 2 saniyeye ulaştığını belirtmişlerdir. Bu sonuç, orta katlı yapıların sismik yükler altındaki tasarımında ve titreşim kontrolünde yapı zemin etkileşiminin dikkate alınmasının son derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi göz önüne alınarak, 10 katlı bir kesme binasının dinamik tepkilerinin STMD sistemi kullanılarak azaltılması ele alınmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, STMD sisteminin optimum tasarım parametreleri üzerinde yapı-zemin etkileşiminin etkisi göz önüne alınacaktır. Bu tez çalışması başlıca üç bölümden oluşmaktadır: Birinci bölümde, sismik yükler etkisindeki yapılarda meydana gelen dinamik tepkilerin azaltılmasını ele alan çalışmalar özetlenmiş ve TMD'nin teorik esasları ve dünya üzerinde uygulandıkları yapılar hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak hem rijit hem de esnek kabule göre 2 farklı TMD sistemi n katlı bir kesme binasının en üst katına yerleştirilmiş ve her bir durum için hareket denklemleri elde edilmiştir. İkinci bölümde, optimum parametrelerin elde edilmesinde kullanılan yöntem açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yapılan çalışmalara ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Son olarak, tez çalışmasında elde edilen önemli sonuçlara yer verilmiştir. Üçüncü bölümü, kaynaklar ve özgeçmiş takip etmektedir.

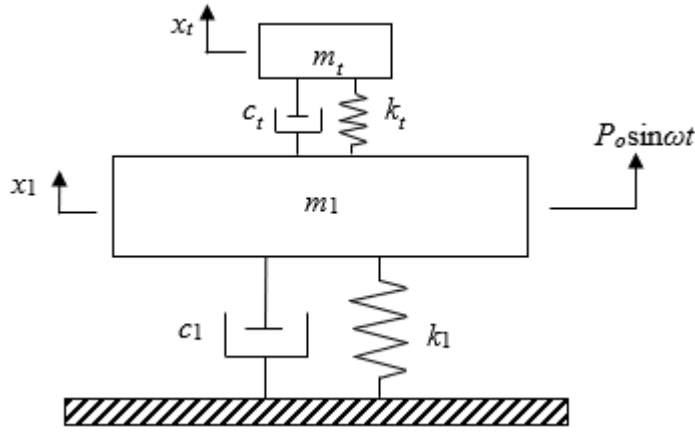
1.4. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler İçin Teorik Esaslar

1.4.1. Sönümlü Ana Sistem ve TMD

Şekil 1'de harmonik yük altındaki sönümlü ana sistem ve üzerine yerleştirilmiş TMD elemanı gösterilmiştir. Bu sisteme ait hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_t & -c_t \\ c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_t & -k_t \\ k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \sin \omega t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Burada, m_1 , c_1 ve k_1 sırasıyla ana sisteme ait kütle, sönümü ve rijitliği göstermektedir. m_t , c_t ve k_t ise sırasıyla TMD'nin kütlesi, sönümü ve rijitliğidir. ω ve P_0 sırasıyla yükün frekansını ve şiddetini göstermektedir.



Şekil 1. Ana sistem ve TMD

1.4.2. Sönümlü Ana Sistem ve PTMD

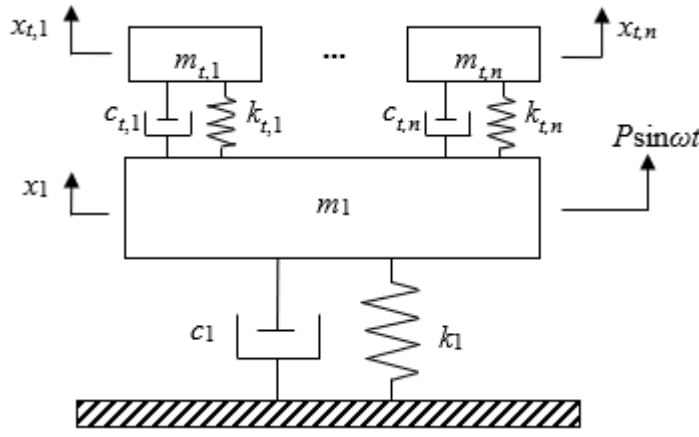
Şekil 2’de harmonik yük altındaki sönümlü ana sistem ve üzerine yerleştirilmiş PTMD sistemi gösterilmiştir. Bu probleme ait hareket denklemi

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (\text{Eşitlik 2})$$

şeklindedir. Burada, M , C ve K sırasıyla ana sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. x ve F ise sırasıyla yer değiştirme vektörünü ve kuvvet vektörünü göstermektedir. Eşitlik 2’deki ifadeler aşağıda tanımlanmışlardır.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & m_{t,1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_{t,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + \sum_{j=1}^n c_{t,j} & -c_{t,1} & -c_{t,2} & \cdots & -c_{t,n} \\ -c_{t,1} & c_{t,1} & 0 & \cdots & 0 \\ -c_{t,2} & 0 & c_{t,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{t,n} & 0 & 0 & \cdots & c_{t,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 4})$$



Şekil 2. Ana sistem ve PTMD

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + \sum_{j=1}^n k_{t,j} & -k_{t,1} & -k_{t,2} & \cdots & -k_{t,n} \\ -k_{t,1} & k_{t,1} & 0 & \cdots & 0 \\ -k_{t,2} & 0 & k_{t,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{t,n} & 0 & 0 & \cdots & k_{t,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$x = \{x_1 \quad x_{t,1} \quad x_{t,2} \quad \cdots \quad x_{t,n}\}^T, \quad F = \{P \sin \omega t \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0\}^T \quad (\text{Eşitlik 6})$$

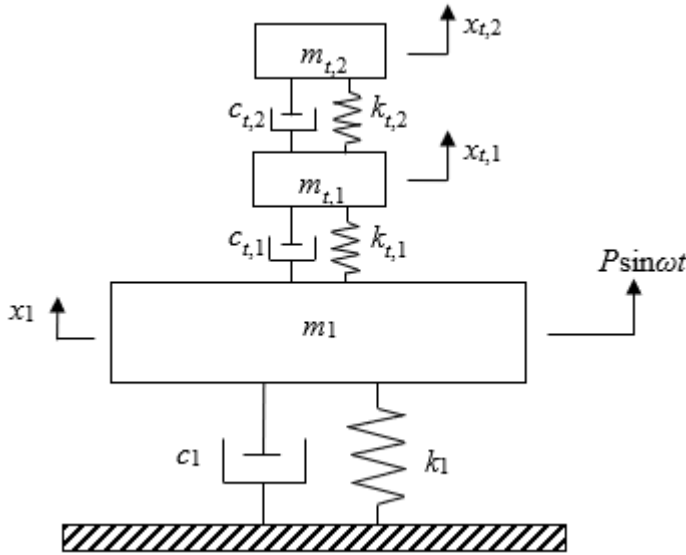
Burada, m_1 , c_1 ve k_1 sırasıyla ana sisteme ait kütle, sönümü ve rijitliği göstermektedir. $m_{t,j}$, $k_{t,j}$ ve $c_{t,j}$ ise sırasıyla PTMD sistemi içerisindeki j . TMD'nin kütlesi, rijitliği ve sönümüdür.

1.4.3. Sönümlü Ana Sistem ve STMD

Şekil 3'de harmonik yük altındaki sönümlü ana sistem ve üzerine yerleştirilmiş STMD sistemi gösterilmiştir. Bu probleme ait hareket denklemi

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (\text{Eşitlik 7})$$

şeklindedir. Burada, M , C ve K sırasıyla ana sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. x ve F ise sırasıyla yer değiştirme vektörünü ve kuvvet vektörünü göstermektedir. Eşitlik 7'deki ifadeler aşağıda tanımlanmıştır.



Şekil 3. Ana sistem ve STMD

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_{t,1} & \\ & & m_{t,2} \end{bmatrix}$$

(Eşitlik 8)

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_{t,1} & -c_{t,1} & \\ -c_{t,1} & c_{t,1} + c_{t,2} & -c_{t,2} \\ & -c_{t,2} & c_{t,2} \end{bmatrix}$$

(Eşitlik 9)

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_{t,1} & -k_{t,1} & \\ -k_{t,1} & k_{t,1} + k_{t,2} & -k_{t,2} \\ & -k_{t,2} & k_{t,2} \end{bmatrix}$$

(Eşitlik 10)

$$x = \{x_1 \quad x_{t,1} \quad x_{t,2}\}^T, \quad F = \{P \sin \omega t \quad 0 \quad 0\}^T$$

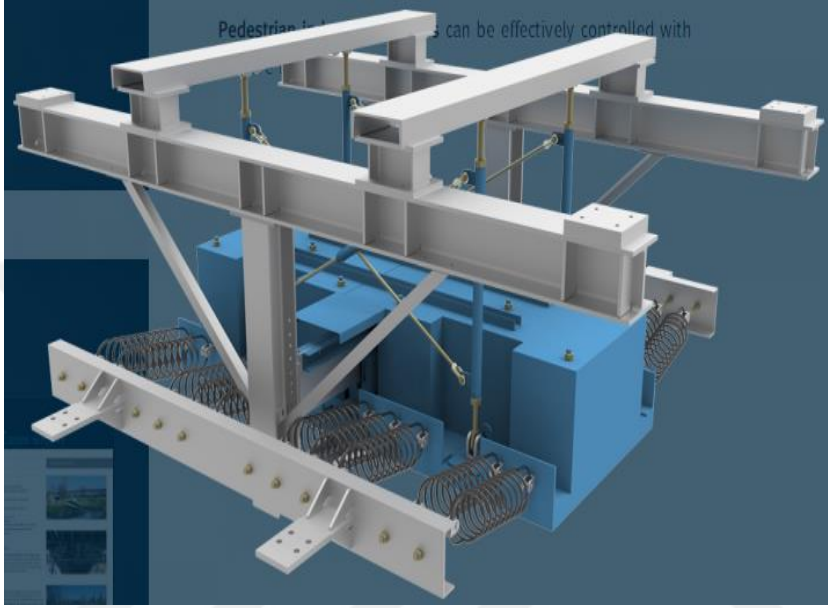
(Eşitlik 11)

Burada, m_1 , k_1 ve c_1 sırasıyla ana sisteme ait kütleyi, rijitliği ve sönümü göstermektedir. $m_{t,j}$, $k_{t,j}$ ve $c_{t,j}$ ise sırasıyla STMD sistemi içerisindeki j . TMD'nin kütlesi, rijitliği ve sönümüdür.

Ana sisteme TMD ve STMD sistemlerinin eklenmesiyle meydana gelen yeni sistemin serbestlik derecesi sırasıyla 2 ve 3 olmaktadır.

1.5. TMD Sisteminin Gerçek Yapılara Uygulanması

Dünya üzerindeki uygulamalar incelendiğinde TMD sistemlerinin çoğunlukla rüzgar ve deprem etkisindeki yüksek katlı yapılara yada yaya hareketi etkisindeki köprülere uygulandığı görülmektedir. TMD sistemleri, yapılardaki enine ve düşey titreşimlerin azaltılması amacıyla iki farklı şekilde üretilmektedir. Şekil 4 ve 5’de kullanım amacına göre üretilen farklı TMD sistemleri görülmektedir.



Şekil 4. Yatay titreşimlerin azaltılması için üretilen TMD (URL-1, 2022).



Şekil 5. Düşey titreşimlerin azaltılması için üretilen TMD (URL-1, 2022).

Şekil 6’da Dubai’de inşa edilen Burj Al Arab Oteli görülmektedir. Bu binada toplamda her birinin ağırlığı 5ton olan 11 adet yatay TMD kullanılmıştır. Kullanılan TMD’lerin frekansı 0.75-2.0 Hz arasında değişmektedir.



Şekil 6. Burj Al Arab Oteli (URL-2, 2022).



Şekil 7. Millennium yaya köprüsü (URL-2, 2022).

Şekil 7’de Londra’da inşa edilmiş Millennium yaya köprüsü görülmektedir. Bu köprü üzerine, ağırlıkları 1ton ve 2ton olan toplamda 50 adet düşey TMD ve ağırlığı 2.5ton olan 8 adet yatay TMD yerleştirilmiştir. Düşey TMD’lerin frekansı 1.2-2.2Hz arasında değişmektedir. Yatay TMD’lerin frekansı ise 0.4Hz dir.



Şekil 8. Britzer Damm yaya köprüsü (URL-2, 2022).

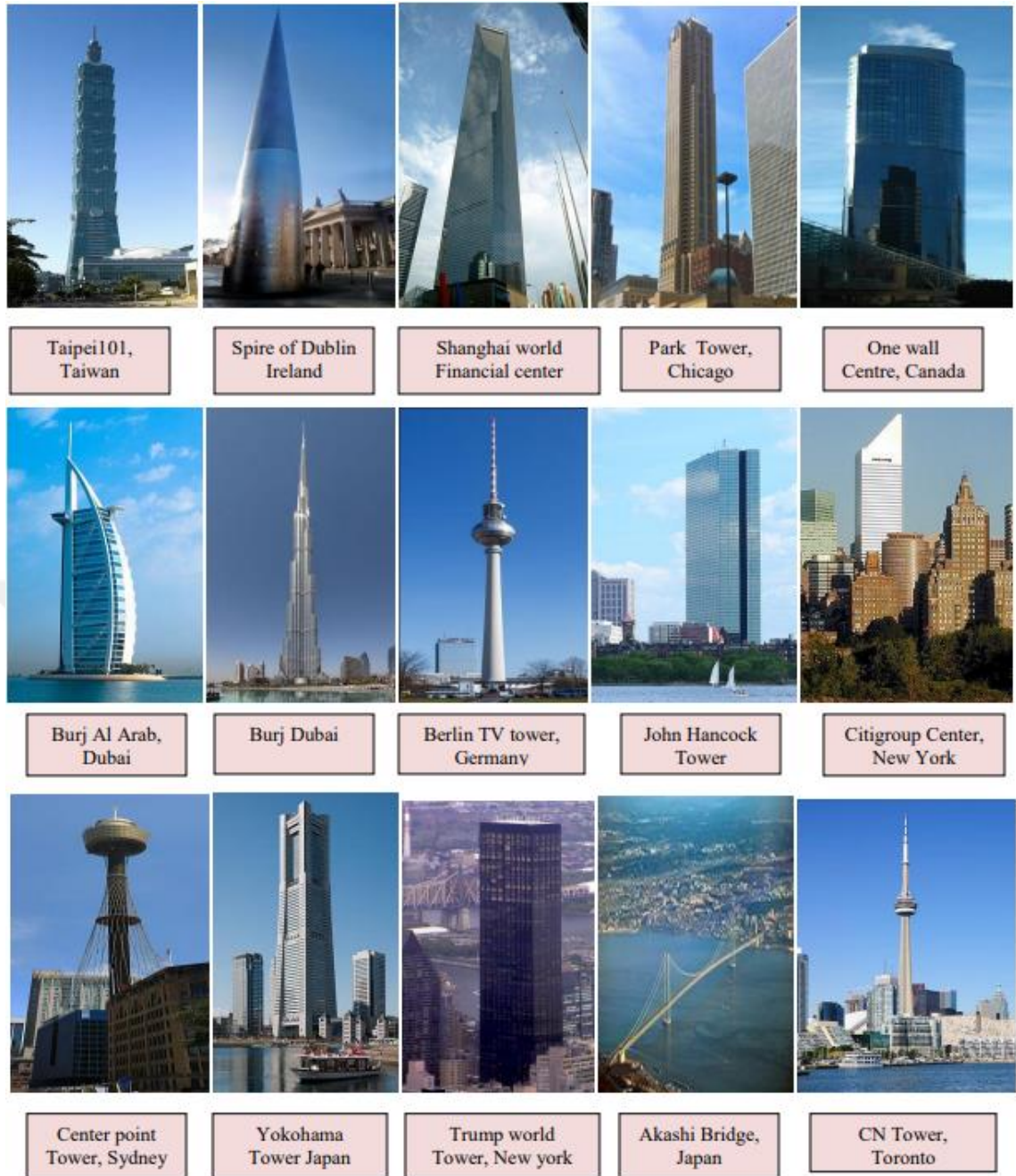


Şekil 9. Schwedter Straße Köprüsü (URL-2, 2022).

Şekil 8’de Berlin’de inşa edilen Britzer Damm yaya köprüsü görülmektedir. Bu köprü üzerine ağırlığı 520kg ve frekansı 5.6Hz olan 2 adet yatay TMD yerleştirilmiştir.

Şekil 9’da Berlin’de inşa edilen Schwedter Straße Köprüsü görülmektedir. Bu köprü üzerine ağırlığı 900kg ve frekansı 1.9Hz olan 4 adet yatay TMD yerleştirilmiştir.

Şekil 10’da dünyanın farklı ülkelerinde TMD uygulanmış bazı yapılar görülmektedir.



Şekil 10. TMD uygulanmış bazı yapılar

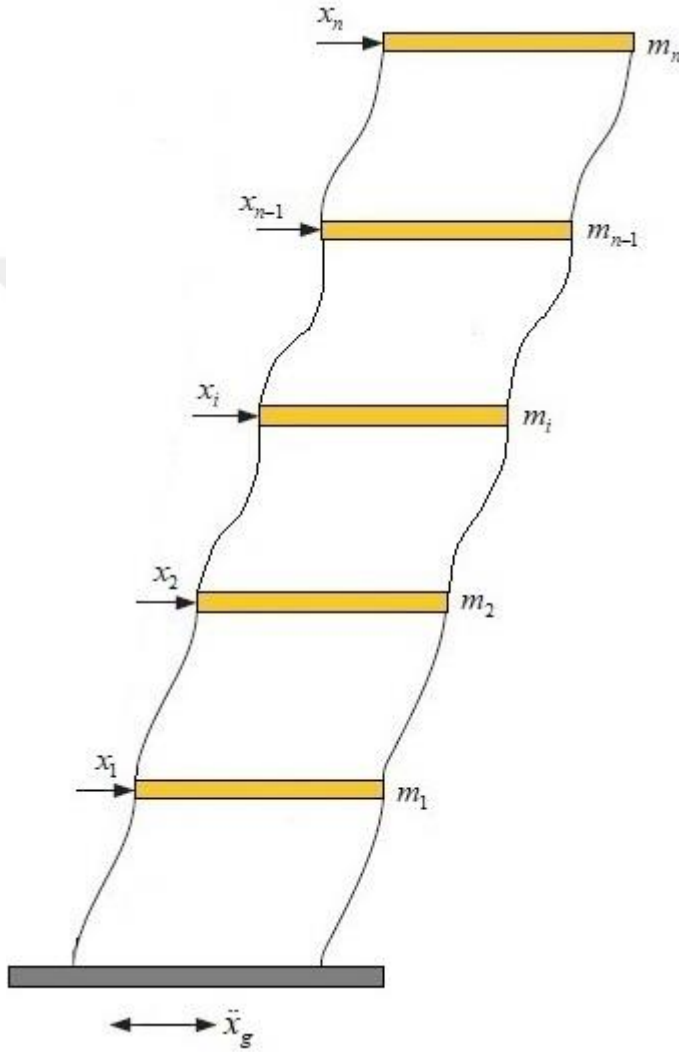
1.6. Deprem Etkisindeki Çok Katlı Yapılar

Bu bölümde, yer hareketi etkisindeki n katlı bir kesme binasına ait hareket denklemleri kontrollü ve kontrolsüz durumlar için ayrı ayrı yazılacaktır. Yer hareketi etkisindeki binada meydana gelen titreşimlerin etkili bir şekilde azaltılması için TMD sistemi her bir durum için binanın en üst katına yerleştirilmektedir. İlk olarak, binanın en üst katında tek bir TMD olması durumu, daha sonra iki adet TMD (STMD) olması durumu dikkate alınacaktır.

1.6.1. Yapının Zemine Rijit Olarak Mesnetlenmesi Durumu

1.6.1.1. Kontrolsüz Durumdaki Yapı

Yer hareketi etkisindeki n katlı bir kesme binasına ait gösterim Şekil 11’de verilmiştir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 12’de verilmiştir. Burada, m_i , c_i ve k_i sırasıyla, i . kata ait kütleyi, sönüm katsayısını ve rijitliği göstermektedir.



Şekil 11. Kontrolsüz durumdaki kesme binası

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}\ddot{x}_g(t) \quad (\text{Eşitlik 12})$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\mathbf{x}(t)$ ise yer değiştirme vektörüdür.

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n] \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ sym & & & & & c_n \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 14})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ sym & & & & & k_n \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$\mathbf{m} = [m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n]^T \quad (\text{Eşitlik 17})$$

1.6.1.2. Yapı Üzerinde TMD Olması Durumu

En üst katına TMD eklenmiş n katlı bir kesme binası Şekil 12’de görülmektedir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 18’de verilmiştir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\mathbf{x}(t)$ yer değiştirme vektörüdür. m_b , c_t ve k_t ise sırasıyla TMD’nin kütle, sönüm katsayısını ve rijitliğini göstermektedir.

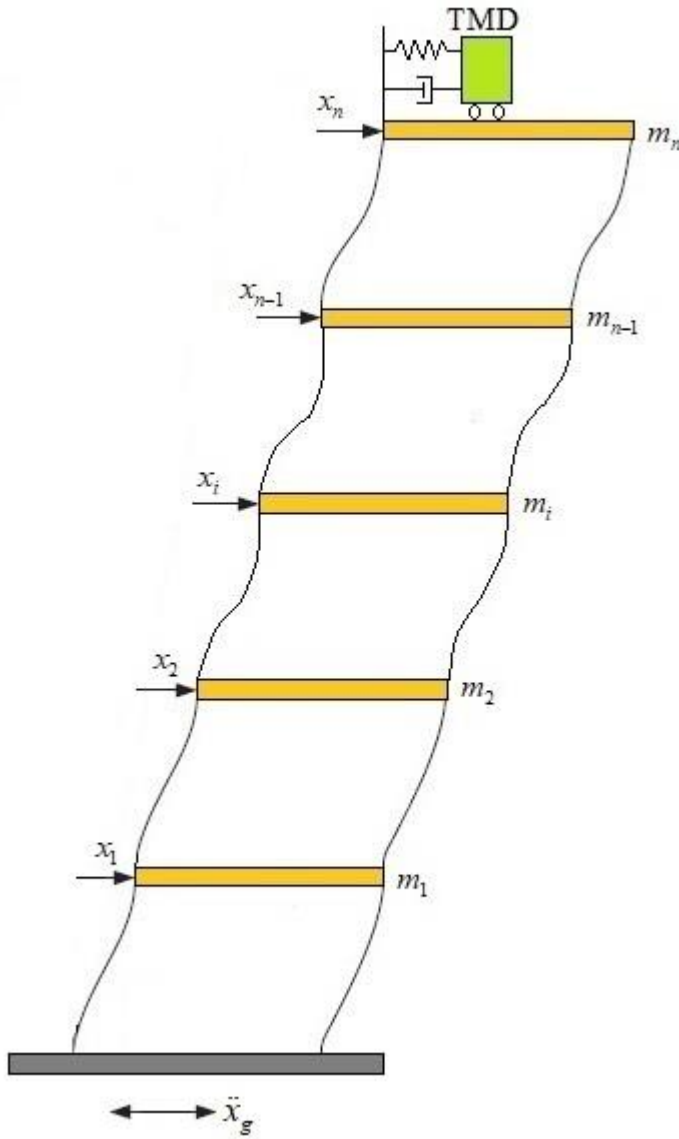
$$\mathbf{M} = diag[m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n \quad m_t] \quad (\text{Eşitlik 19})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & -c_n & c_n + c_t & -c_t \\ sym & & & & & & c_t \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -k_n & k_n + k_t & -k_t \\ sym & & & & & k_t \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n \quad x_t]^T \quad (\text{Eşitlik 22})$$

$$\mathbf{m} = [m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n \quad m_t]^T \quad (\text{Eşitlik 23})$$



Şekil 12. TMD eklenmiş bina

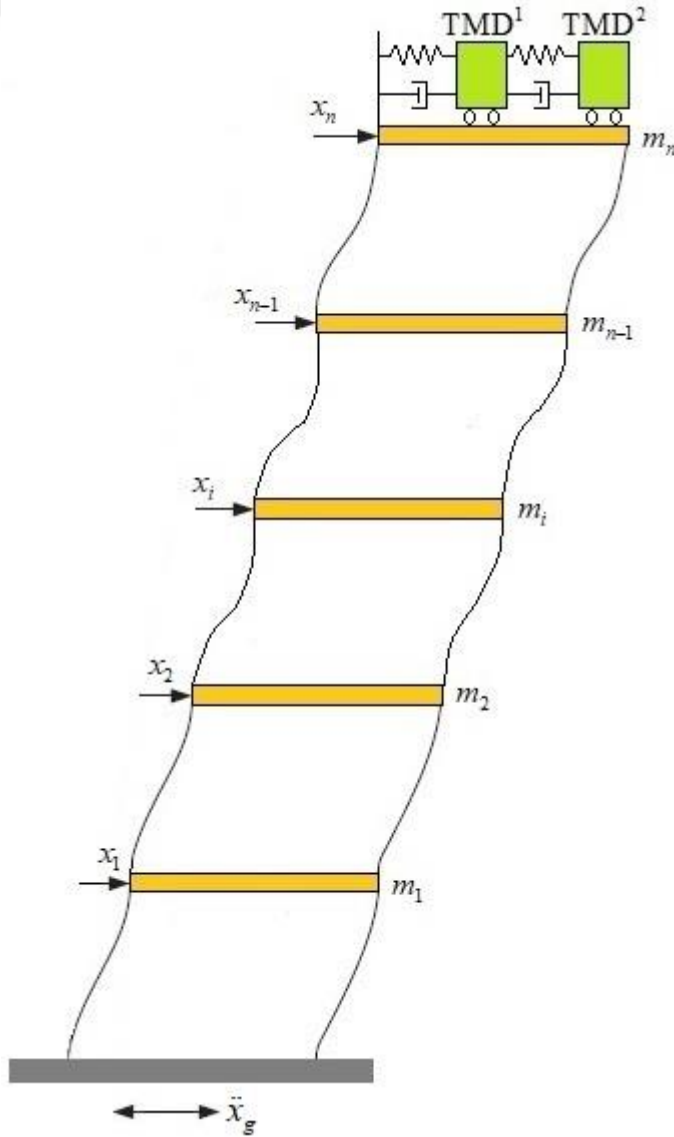
1.6.1.3. Yapı Üzerinde STMD Olması Durumu

En üst katına STMD eklenmiş n katlı bir kesme binası Şekil 13’de görülmektedir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 24’de verilmiştir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (\text{Eşitlik 24})$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\mathbf{x}(t)$ ise yer değiştirme vektörüdür. $m_{j,t}$, $c_{j,t}$ ve $k_{j,t}$ ise sırasıyla STMD sistemi içerisindeki j inci TMD’ye ait kütle, sönüm katsayısını ve rijitliği göstermektedir.

$$\mathbf{M} = \text{diag} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_n & m_{1,t} & m_{2,t} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 25})$$



Şekil 13. STMD yerleştirilmiş bina

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & -c_n & c_n + c_{1,t} & -c_{1,t} \\ & & & & & c_{1,t} + c_{2,t} & -c_{2,t} \\ sym & & & & & & c_{2,t} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 26})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & \cdot & \cdot & \cdot & & \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & -k_n & k_n + k_{1,t} & -k_{1,t} \\ & & & & & k_{1,t} + k_{2,t} & -k_{2,t} \\ sym & & & & & & k_{2,t} \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 27})$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n & x_{1,t} & x_{2,t} \end{bmatrix}^T \quad (\text{Eşitlik 28})$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_n & m_{1,t} & m_{2,t} \end{bmatrix}^T \quad (\text{Eşitlik 29})$$

1.6.2. Yapı Zemin Etkileşiminin Dikkate Alınması Durumu

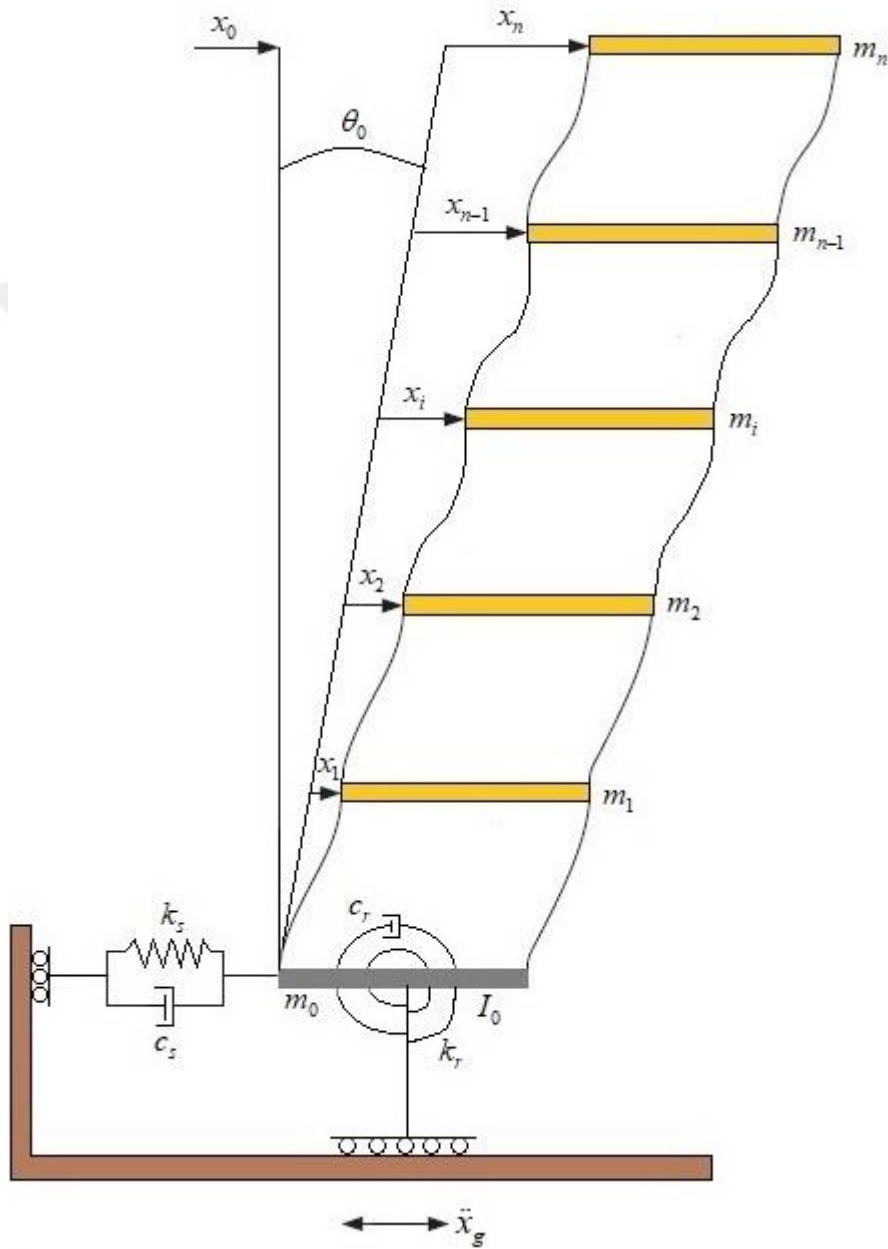
1.6.2.1. Kontrolsüz Durumdaki Yapı

Yer hareketi etkisindeki kontrolsüz durumdaki n katlı kesme binasına ait gösterim Şekil 14’de verilmiştir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 30’da verilmiştir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (\text{Eşitlik 30})$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\mathbf{x}(t)$ ise yer değiştirme vektörüdür. m_0 ve I_0 sırasıyla temelin kütesini ve atalet momentini göstermektedir. c_s ve c_r zemine ait sönüm katsayılarını k_s ve k_r ise zemine ait rijitlik değerlerini göstermektedir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & m_1 & m_1 z_1 \\ & m_2 & & m_2 & m_2 z_2 \\ & & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & & m_n & m_n z_n \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_n & m^a & m^b \\ m_1 z_1 & m_2 z_2 & \cdots & m_n z_n & m^b & m^c \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 31})$$



Şekil 14. Kontrolsüz durumdaki bina

Burada,

$$\begin{aligned}
m^a &= m_0 + \sum_{i=1}^n m_i; & m^b &= \sum_{i=1}^n m_i z_i \\
m^c &= I_0 + \sum_{i=1}^n (I_i + m_i z_i^2)
\end{aligned}
\tag{Eşitlik 32}$$

şeklindedir.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & \vdots & \vdots & & & \\ & & -c_n & c_n & & \\ & & & & c_s & \\ sym & & & & & c_r \end{bmatrix}
\tag{Eşitlik 33}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & \vdots & \vdots & & & \\ & & -k_n & k_n & & \\ & & & & k_s & \\ sym & & & & & k_r \end{bmatrix}
\tag{Eşitlik 34}$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n \quad x_0 \quad x_\theta]^T
\tag{Eşitlik 35}$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \\ m_0 + \sum_{i=1}^n m_i \\ \sum_{i=1}^n m_i z_i \end{bmatrix}
\tag{Eşitlik 36}$$

1.6.2.2. Yapı Üzerinde TMD Olması Durumu

Şekil 15’de yer hareketi etkisindeki n katlı bir kesme binası ve en üst katına yerleştirilmiş TMD görülmektedir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 37’de verilmiştir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & m_1 & m_1 z_1 \\ & m_2 & & & & m_2 & m_2 z_2 \\ & & \ddots & & & \vdots & \vdots \\ & & & m_n & & m_n & m_n z_n \\ & & & & m_{1,t} & m_{1,t} & m_{1,t} z_n \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_n & m_{1,t} & m^a & m^b \\ m_1 z_1 & m_2 z_2 & \cdots & m_n z_n & m_{1,t} z_n & m^b & m^c \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 38})$$

Burada,

$$\begin{aligned} m^a &= m_0 + m_{1,t} + \sum_{i=1}^n m_i; & m^b &= m_{1,t} z_n + \sum_{i=1}^n m_i z_i \\ m^c &= I_0 + m_{1,t} z_n^2 + \sum_{i=1}^n (I_i + m_i z_i^2) \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 39})$$

şeklindedir.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & & \\ & \vdots & \vdots & & & & \\ & & -c_n & c_n + c_{1,t} & -c_{1,t} & & \\ & & & -c_{1,t} & c_{1,t} & & \\ & & & & & c_s & \\ sym & & & & & & c_r \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & & \\ & \vdots & \vdots & & & & \\ & & -k_n & k_n + k_{1,t} & -k_{1,t} & & \\ & & & -k_{1,t} & k_{1,t} & & \\ & & & & & k_s & \\ sym & & & & & & k_r \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 41})$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n & x_{1,t} & x_0 & x_\theta \end{bmatrix}^T \quad (\text{Eşitlik 42})$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \\ m_{1,t} \\ m_0 + m_{1,t} + \sum_{i=1}^n m_i \\ m_{1,t} z_n + \sum_{i=1}^n m_i z_i \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 43})$$

1.6.2.3. Yapı Üzerinde STMD Olması Durumu

Şekil 16’da yer hareketi etkisindeki n katlı bir kesme binası ve en üst katına yerleştirilmiş STMD görülmektedir. Ele alınan probleme ait hareket denklemi Eşitlik 44’de verilmiştir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}\ddot{x}_g(t) \quad (\text{Eşitlik 44})$$

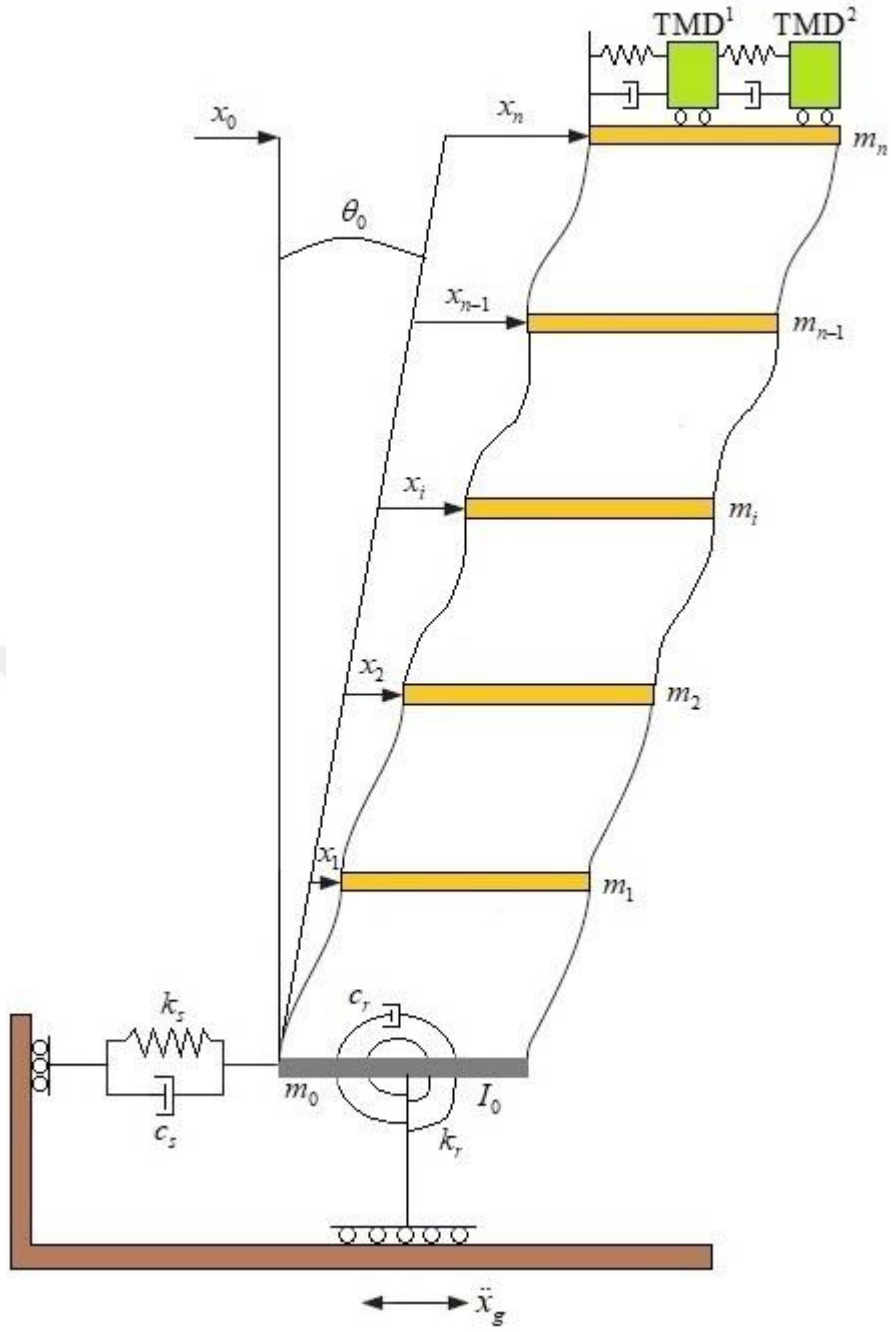
Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. $\mathbf{x}(t)$ ise yer değiştirme vektörüdür. $m_{j,t}$, $c_{j,t}$ ve $k_{j,t}$ ise sırasıyla STMD sistemi içerisindeki j inci TMD’ye ait kütle, sönüm katsayısını ve rijitliği göstermektedir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & & m_1 & m_1 z_1 \\ & m_2 & & & & & m_2 & m_2 z_2 \\ & & \ddots & & & & \vdots & \vdots \\ & & & m_n & & & m_n & m_n z_n \\ & & & & m_{1,t} & & m_{1,t} & m_{1,t} z_n \\ & & & & & m_{2,t} & m_{2,t} & m_{2,t} z_n \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_n & m_{1,t} & m_{2,t} & m^a & m^b \\ m_1 z_1 & m_2 z_2 & \cdots & m_n z_n & m_{1,t} z_n & m_{2,t} z_n & m^b & m^c \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 45})$$

Burada,

$$\begin{aligned} m^a &= m_0 + m_{1,t} + m_{2,t} + \sum_{i=1}^n m_i; & m^b &= m_{1,t} z_n + m_{2,t} z_n + \sum_{i=1}^n m_i z_i \\ m^c &= I_0 + m_{1,t} z_n^2 + m_{2,t} z_n^2 + \sum_{i=1}^n (I_i + m_i z_i^2) \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

şeklinde.



Şekil 16. STMD yerleştirilmiş bina

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & & & & \\ & \vdots & \vdots & & & & & & \\ & & -c_n & c_n + c_{1,t} & -c_{1,t} & & & & \\ & & & c_{1,t} + c_{2,t} & -c_{2,t} & & & & \\ & & & & c_{2,t} & & & & \\ & & & & & c_s & & & \\ sym & & & & & & & c_r & \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & & & \\ & \vdots & \vdots & & & & & \\ & & -k_n & k_n + k_{1,t} & -k_{1,t} & & & \\ & & & k_{1,t} + k_{2,t} & -k_{2,t} & & & \\ & & & & k_{2,t} & & & \\ & & & & & k_s & & \\ sym & & & & & & k_r & \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 48})$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n \quad x_{1,t} \quad x_{2,t} \quad x_0 \quad x_\theta]^T \quad (\text{Eşitlik 49})$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \\ m_{1,t} \\ m_{2,t} \\ m_0 + m_{1,t} + m_{2,t} + \sum_{i=1}^n m_i \\ m_{1,t}z_n + m_{2,t}z_n + \sum_{i=1}^n m_i z_i \end{bmatrix} \quad (\text{Eşitlik 50})$$

Yukarıda verilen hareket denklemleri Newmark yöntemi kullanılarak zaman tanım alanında çözülmüş ve katlardaki yer değiştirme ve ivme değerleri elde edilmiştir. Dinamik tepkilerin elde edilmesinde $\beta = 0.25$ ve $\gamma = 0.5$ alınmıştır.

1.7. Optimizasyon Yöntemi

TMD ve STMD'ye ait optimum parametrelerin elde edilmesinde genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Bu algoritma populasyon içindeki nitelikleri kötü olan adayların atılması iyi olanların ise korunması esasına dayanmaktadır. Sonuçların elde edilmesinde Matlab programı içerisinde yer alan *ga* fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 17'de *ga* fonksiyonu kullanılarak elde edilen örnek bir optimizasyon problemine ait sonuç ekranı verilmiştir.

$$\mathbf{TF}(\omega) = [-\mathbf{M}\omega^2 + \mathbf{C}i\omega + \mathbf{K}]^{-1} \mathbf{m} \quad (\text{Eşitlik 51})$$

Optimizasyonun temel amacı en üst kattaki yer değiştirme genliğinin minimize edilmedir. Rijit ve esnek kabul için kullanılan amaç fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 52 ve 53’de tanımlanmıştır.

$$OF = \max |TF_{10}(\omega)| \quad (\text{Eşitlik 52})$$

$$OF = \max |TF_{10}(\omega) + TF_0(\omega) + TF_\theta(\omega)h_N| \quad (\text{Eşitlik 53})$$

Burada, h_N toplam yapı yüksekliğini göstermektedir.

TMD için sönüm oranı ve frekans oranı

$$\xi^{opt} = \frac{c_{1,t}}{2m_{1,t}\omega_{1,t}}, \quad f^{opt} = \frac{\omega_{1,t}}{\omega_{1,s}} \quad (\text{Eşitlik 54})$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, $\omega_{1,t} = \sqrt{k_{1,t} / m_{1,t}}$ TMD’nin açısal frekansıdır.

STMD için optimizasyon parametreleri

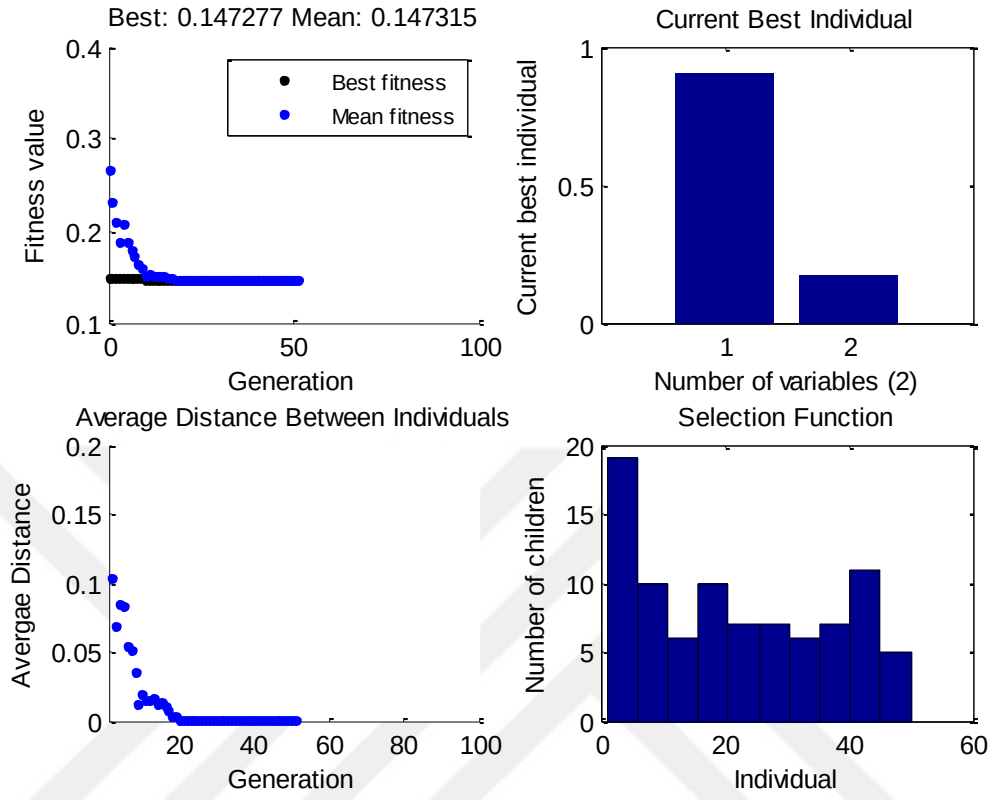
$$\begin{aligned} \xi_1^{opt} &= \frac{c_{1,t}}{2m_{1,t}\omega_{1,t}}, \quad \xi_2^{opt} = \frac{c_{2,t}}{2m_{2,t}\omega_{2,t}}, \quad f_1^{opt} = \frac{\omega_{1,t}}{\omega_{1,s}}, \\ f_2^{opt} &= \frac{\omega_{2,t}}{\omega_{1,s}}, \quad \mu_h = \frac{m_{1,t}}{m_{2,t}} \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 55})$$

şeklindedir. Burada, ξ_j^{opt} , f_j^{opt} ve $\omega_{j,t} = \sqrt{k_{j,t} / m_{j,t}}$ STMD içerisindeki j . TMD’nin sönüm oranı, frekans oranı ve açısal frekansıdır. μ_h STMD içerisindeki 1. TMD’nin kütlesinin 2. TMD’nin kütlesine oranıdır.

Optimum parametrelerin belirlenmesinde kullanılan kütle oranı TMD ve STMD için

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{m_{1,t}}{M_{1,s}} \quad \text{için TMD} \\ \mu &= \frac{m_{1,t} + m_{2,t}}{M_{1,s}} \quad \text{için STMD} \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 56})$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, $M_{1,s}$ rijit durumdaki yapının 1. moduna karşılık gelen kütleyi göstermektedir.



Şekil 17. Rijit durum için TMD'nin optimizasyonu

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Çalışma kapsamında ele alınan 10 katlı kesme binasına ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Ele alınan yapının hakim periyodu 1 saniyedir. Dairesel rijit temel sisteminin yarı çapı (r_o) 8m, kütlesi (M_o) 2.50×10^5 kg ve atalet momenti (I_o) 4.0×10^6 kgm^2 dir. Sönüm matrisinin elde edilmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\mathbf{C} = \delta \mathbf{K}, \quad \delta = 2\xi_1 / \omega_1 \quad (\text{Eşitlik 57})$$

Burada, ξ_1 ve ω_1 sırasıyla yapının 1. moduna karşılık gelen sönüm oranını ve açısal frekansı göstermektedir. ξ_1 ve ω_1 sırasıyla 0.02 ve 6.2832rad/sn dir.

Tablo 1. Bina özellikleri

Kat no	m_i (kg)	c_i (Nsm)	k_i (N/m)	I_i (kgm^2)	h_i (m)
1	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
2	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
3	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
4	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
5	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
6	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
7	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
8	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
9	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2
10	1.25×10^5	1.407×10^6	2.21×10^8	2.67×10^6	3.2

Çalışmada kullanılan zemin türlerine ait özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Her bir zemini tanımlamak için 3 farklı parametre kullanılmaktadır. Burada, ν , ρ ve V_s sırasıyla zeminin Poisson oranı, yoğunluğu ve kayma hızıdır. Zemin özelliklerine bağlı olarak hesaplanan rijitlik ve sönüm katsayıları ise Tablo 3’de verilmiştir. Bu değerlerin elde edilmesinde Eşitlik 58 kullanılmıştır (Wolf, 1994).

Tablo 2. Zemin özellikleri

Zemin türü	ν	ρ (kg/m^3)	V_s (m/s)	G (N/m^2)
Sert zemin (S_A)	0.35	2000	320	2.048×10^8
Yumuşak zemin (S_B)	0.40	1800	160	0.461×10^8
Çok yumuşak zemin (S_C)	0.45	1600	80	0.102×10^8

Tablo 3. Yapı-zemin etkileşiminde kullanılan rijitlik ve sönüm katsayıları

Zemin türü	k_s (N/m)	k_r (Nm)	c_s (Ns/m)	c_r (Nsm)
S _A	7.944×10^9	4.302×10^{11}	1.142×10^8	1.613×10^9
S _B	1.843×10^9	1.049×10^{11}	5.299×10^7	7.864×10^8
S _C	4.228×10^8	2.542×10^{10}	2.431×10^7	3.813×10^8

$$k_s = \frac{8Gr_0}{2-\nu}, \quad k_r = \frac{8Gr_0^3}{3-3\nu}, \quad c_s = \frac{4.6\rho V_s r_0^2}{2-\nu}, \quad c_r = \frac{0.4\rho V_s r_0^4}{1-\nu} \quad (\text{Eşitlik 58})$$

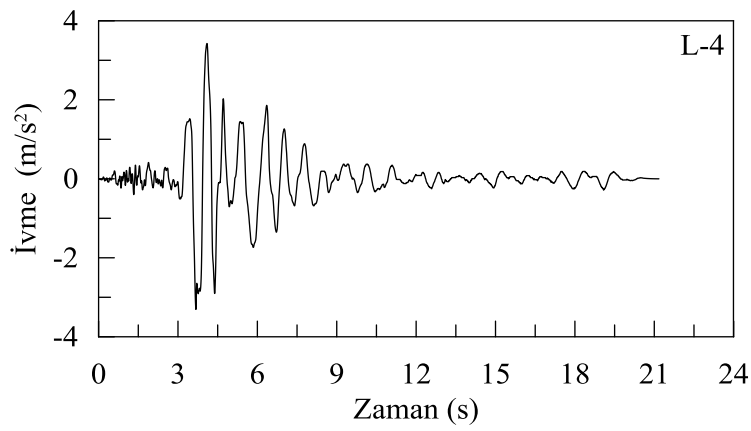
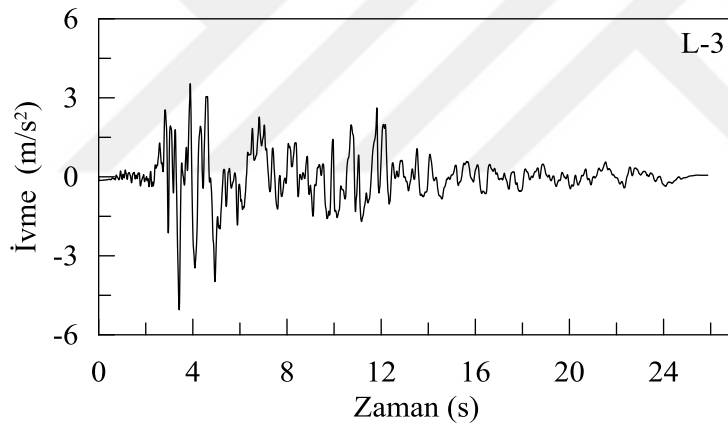
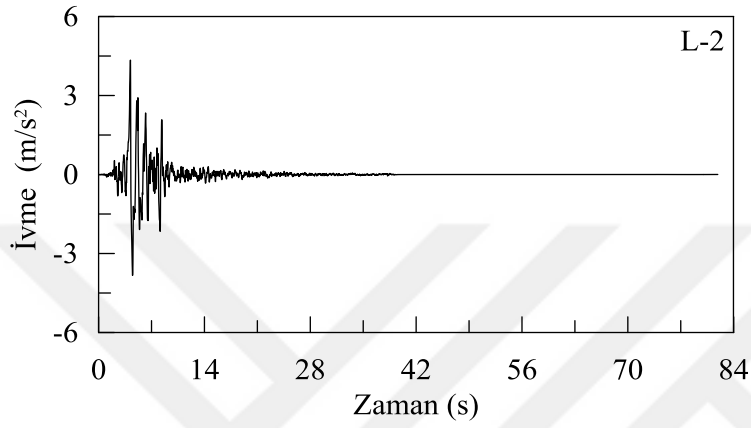
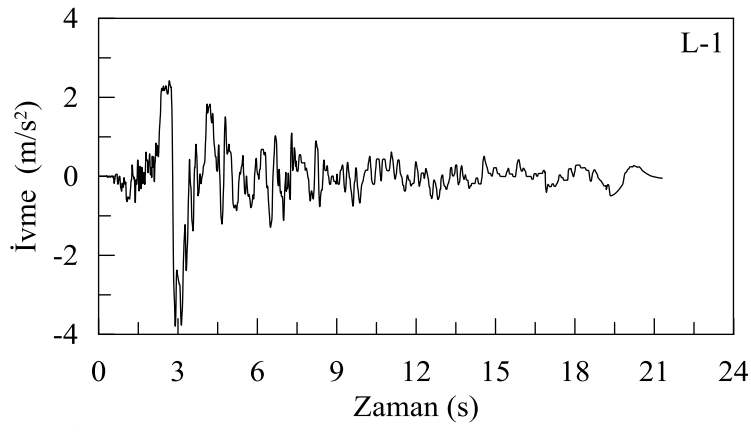
Burada, G ve r_0 sırasıyla zeminin kayma modülünü ve dairesel rijit temelin yarıçapını göstermektedir.

Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarına ait özellikler Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4’de verilen depremler frekans içeriğine bağlı olarak 3 farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Burada, L-1, L-2, L-3 ve L-4 ile düşük frekans içeriğine sahip depremler, I-1, I-2, I-3 ve I-4 ile orta frekans içeriğine sahip depremler ve H-1, H-2, H-3 ve H-4 ile yüksek frekans içeriğine sahip depremler gösterilmiştir. Depremlerin frekans içeriğine göre sınıflandırılmasında PGA/PGV oranı esas alınır (Tso vd., 1992). Bu oranın 1.2’den büyük olması yüksek frekans içeriğine, 0.8 ile 1.2 arasında olması orta frekans içeriğine ve 0.8’den küçük olması ise düşük frekans içeriğine karşılık gelmektedir. Burada, PGA en büyük yer ivmesi olup birimi g dir. PGV ise en büyük yer hızı olup birimi m/s dir.

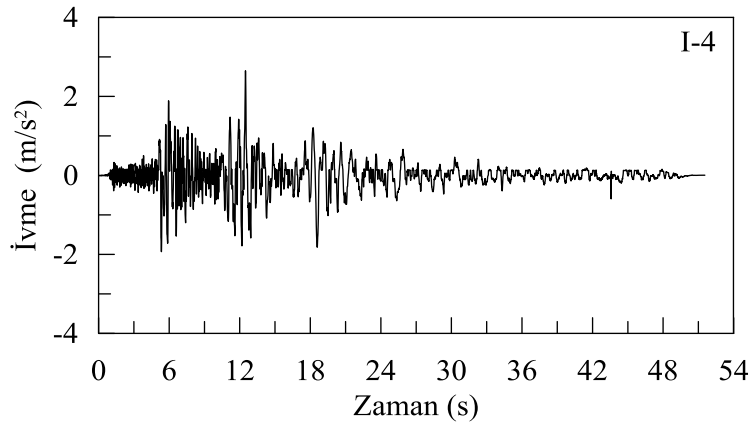
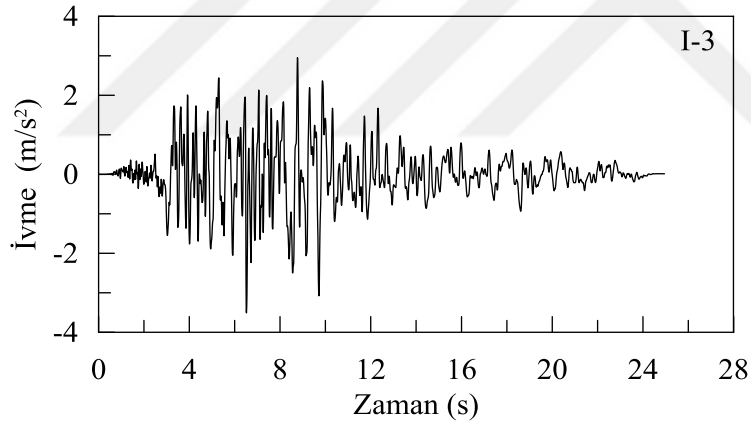
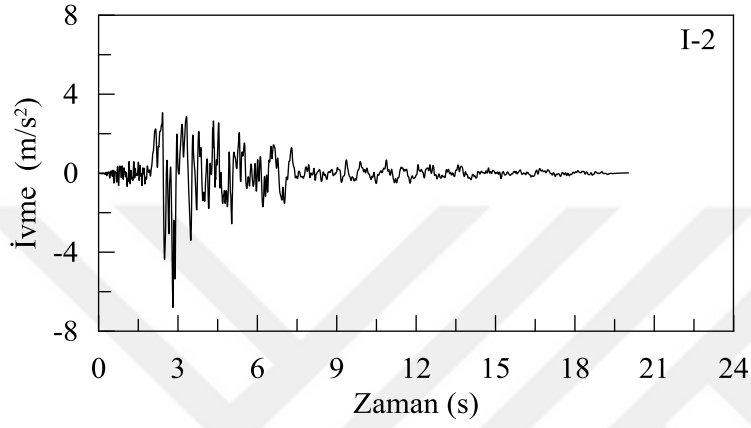
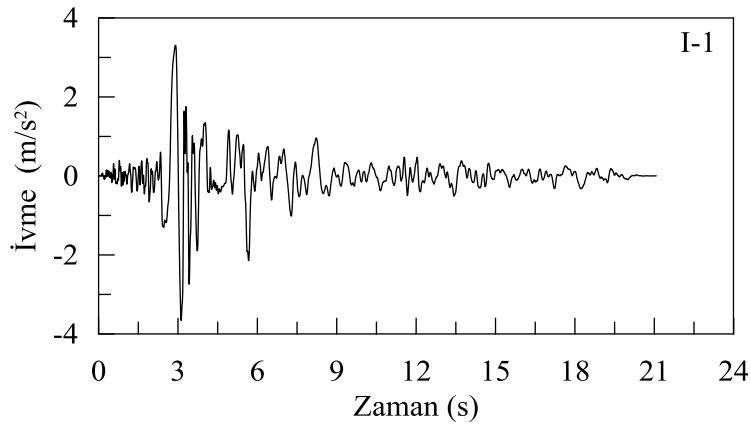
Tablo 4. Çalışmada kullanılan deprem kayıtları

No	Kayıt Adı	İstasyon	PGA	PGV	PGA/PGV
L-1	Erzincan	Erzincan	0.390	1.070	0.360
L-2	Loma Prieta	Los Gatos-Lexington Dam	0.443	0.857	0.517
L-3	Duzce	Duzce	0.515	0.842	0.612
L-4	Parkfield	Slack Canyon	0.349	0.532	0.657
I-1	Parkfield	Parkfield-Cholame 2WA	0.373	0.448	0.833
I-2	N. Palm Springs	North Palm Springs	0.693	0.660	1.050
I-3	Northridge	Canoga Park-Topanga Can	0.358	0.338	1.059
I-4	Imperial Valley	Chihuahua	0.270	0.250	1.090
H-1	Darfield	FDCS	0.124	0.095	1.305
H-2	San Fernando	Lake Hughes #12	0.382	0.164	2.336
H-3	Whittier Narrows	LA-Obregon Park	0.344	0.143	2.404
H-4	Coalinga	Oil City	0.374	0.102	3.668

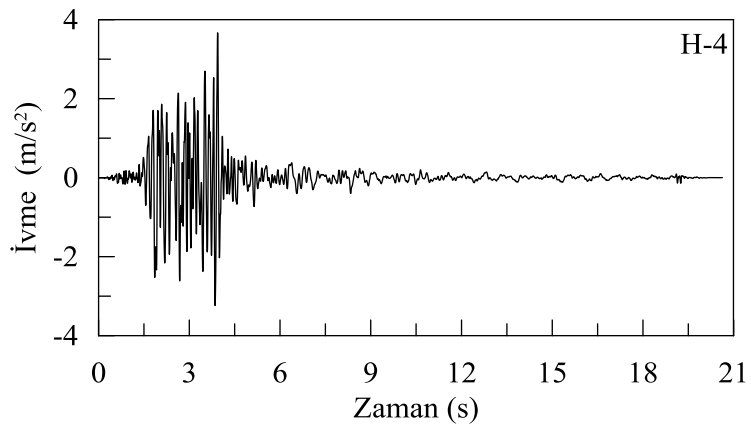
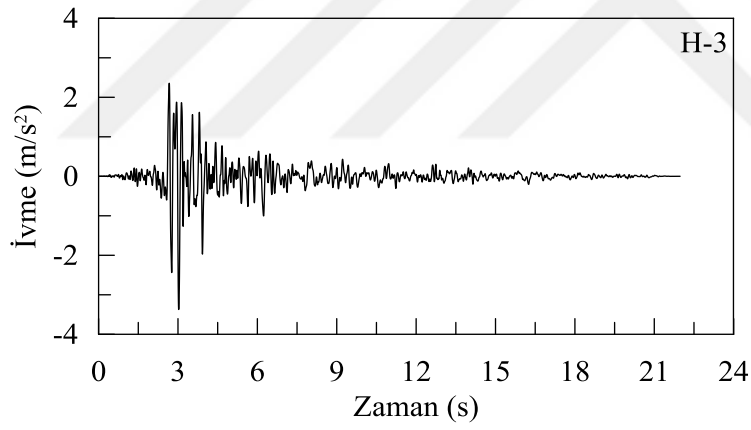
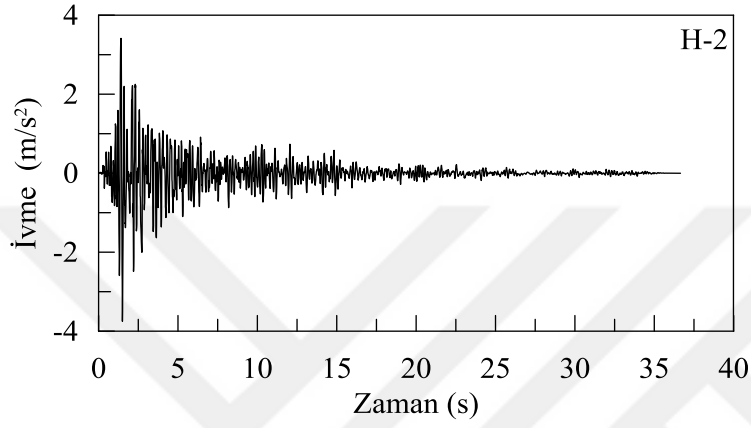
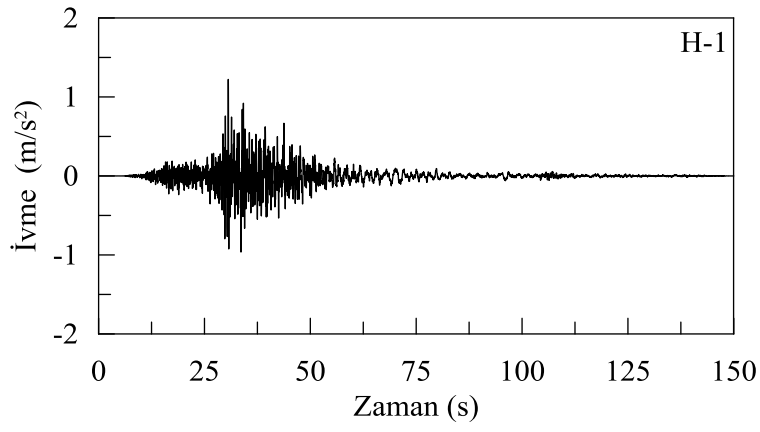
Düşük, orta ve yüksek frekans içeriğine sahip depremler için ivme kayıtları sırasıyla Şekil 18-20’de verilmiştir. Bu depremlerin en büyük ivme değeri 1.222 m/s^2 ile 6.795 m/s^2 arasında değişmektedir.



Şekil 18. Düşük frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları



Şekil 19. Orta frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları



Şekil 20. Yüksek frekans içeriğine sahip depremlerin ivme kayıtları

2.2. 10 Katlı Binaya Ait Bulgular

Tablo 5’de ilk moda karşılık gelen periyot değerleri verilmiştir. Görüldüğü üzere, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması periyot değerlerinde artışa neden olmaktadır. Ayrıca, etkileşimin dikkate alındığı üç durum içerisinde en büyük periyot değerinin en düşük rijitliğe sahip zemin için elde edildiği görülmektedir.

Tablo 5. İlk beş moda karşılık gelen periyot değerleri (s)

Mod no	Rijit kabul	S_A	S_B	S_C
1	1.0000	1.0245	1.0988	1.3701
2	0.3358	0.3374	0.3430	0.3703
3	0.2045	0.2052	0.2073	0.2184
4	0.1494	0.1498	0.1514	0.1739
5	0.1198	0.1201	0.1211	0.1492

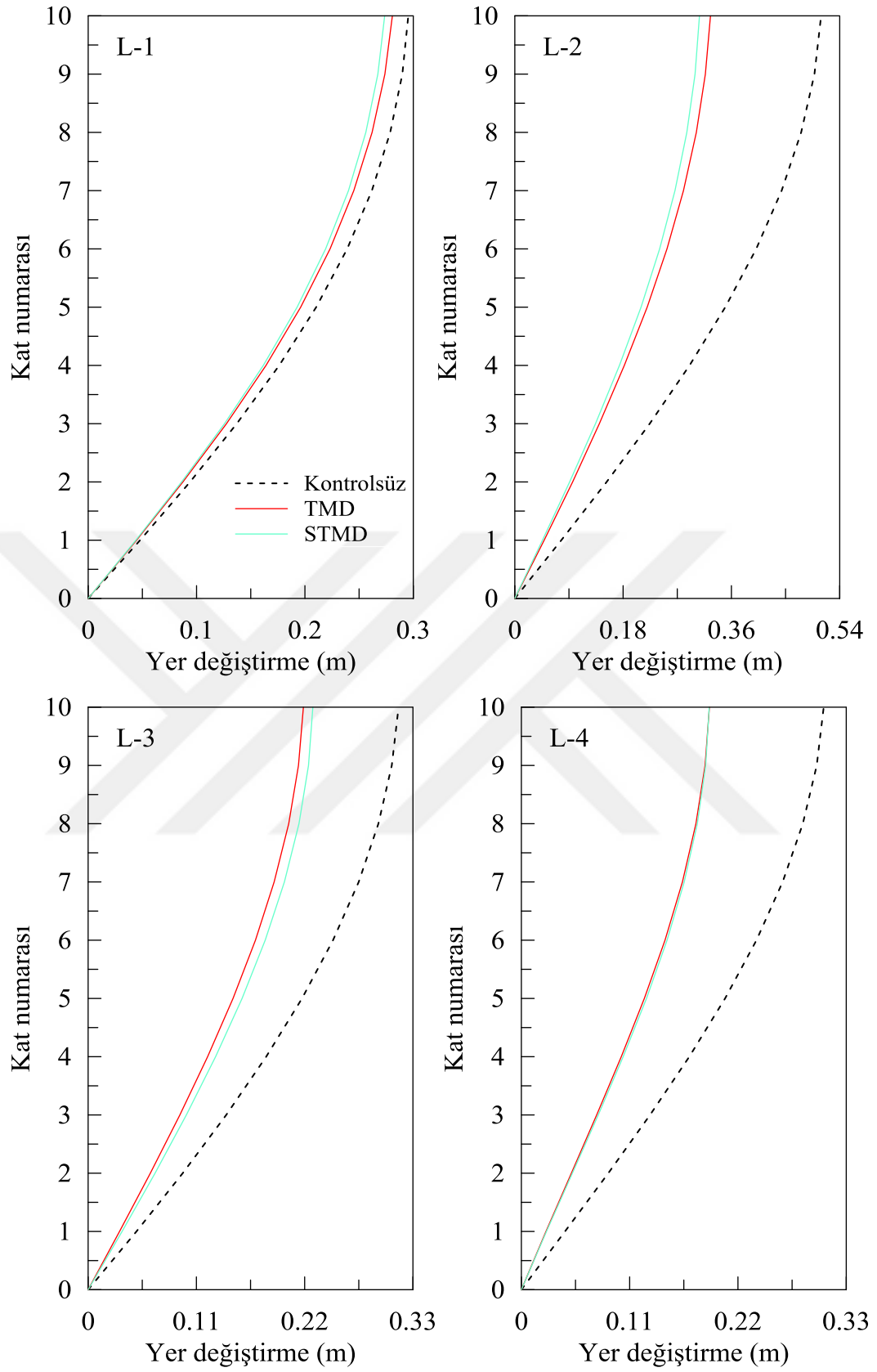
Tablo 6. TMD için optimum değerler

Parametre	Rijit kabul	S_A	S_B	S_C
m_t (t)	53	53	53	53
c_t (10^6 Ns/m)	0.1061	0.1040	0.0982	0.0801
k_t (10^6 N/m)	1.7026	1.6187	1.3975	0.8765

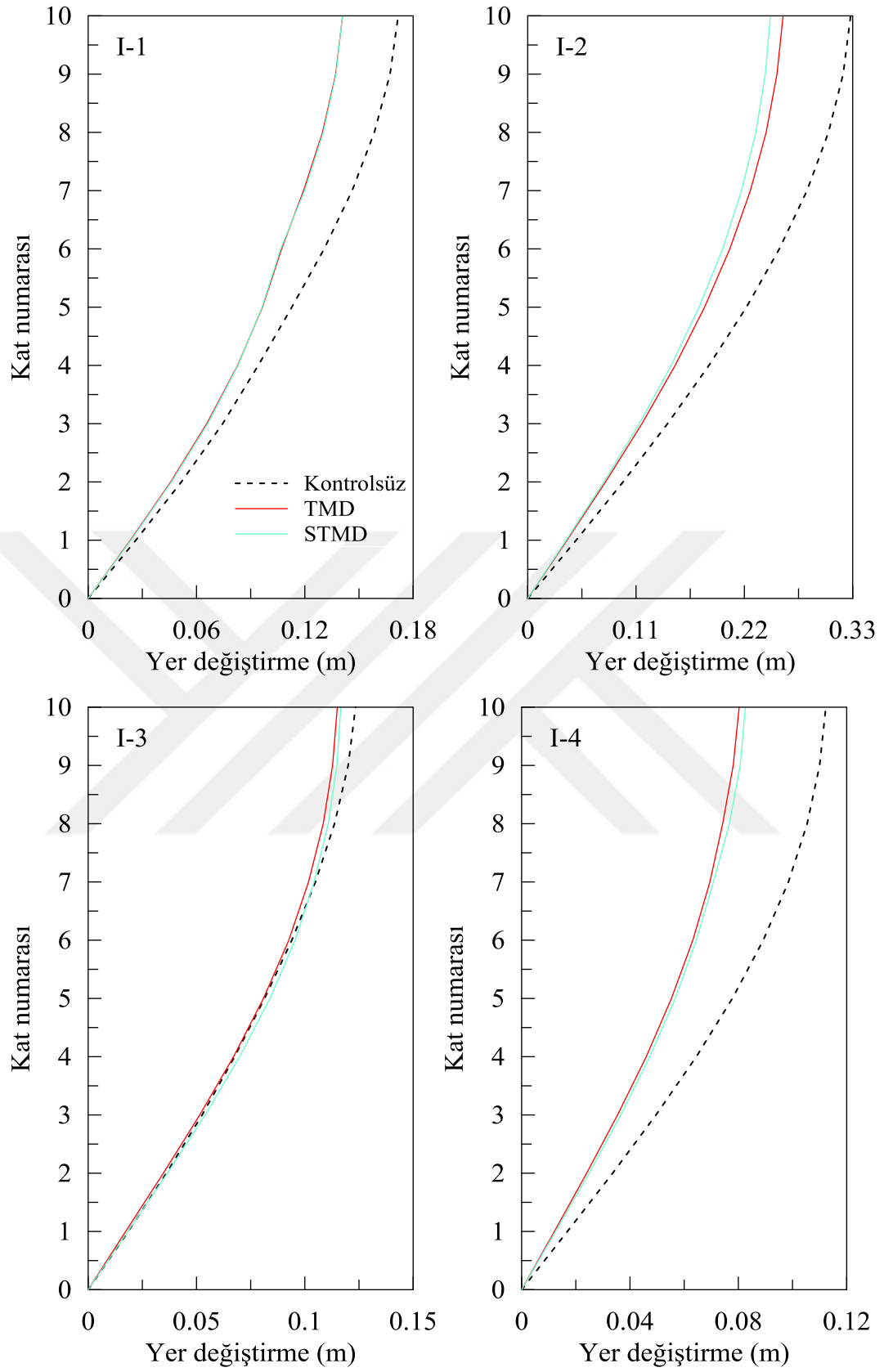
Tablo 7. STMD için optimum değerler

Parametre	Rijit kabul	S_A	S_B	S_C
$m_{1,t}$ (t)	41.56	41.93	42.39	42.20
$c_{1,t}$ (Ns/m)	0	0	0	0
$k_{1,t}$ (10^6 N/m)	1.8646	1.7697	1.5254	0.9601
$m_{2,t}$ (t)	11.44	11.07	10.61	10.80
$c_{2,t}$ (10^4 Ns/m)	4.3270	3.9540	3.3383	2.6374
$k_{2,t}$ (10^6 N/m)	0.3103	0.2881	0.2417	0.1546

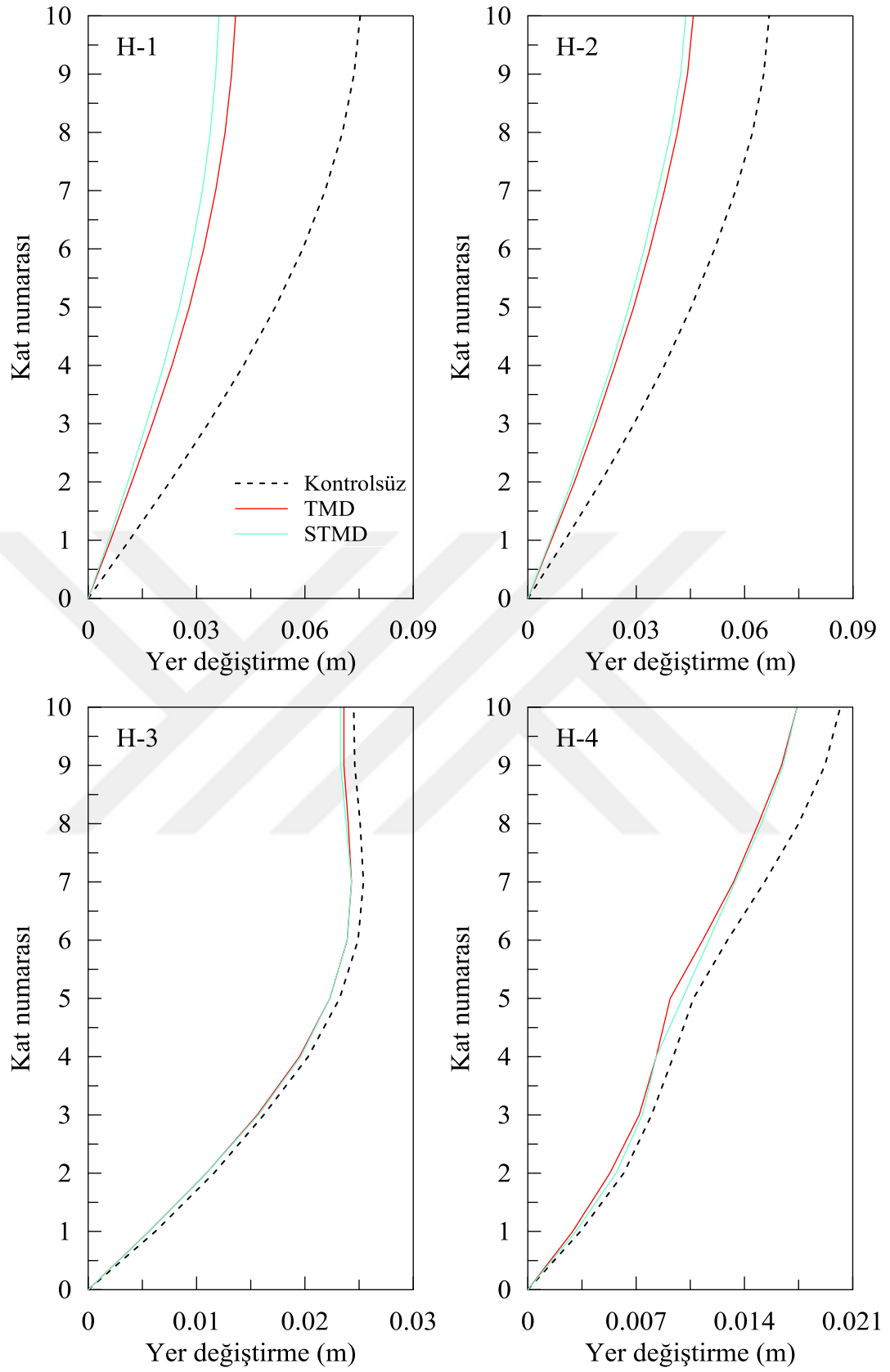
Tablo 6 ve Tablo 7’de sırasıyla TMD ve STMD için optimum kütle, sönüm ve rijitlik değerleri verilmiştir. Her iki cihazda da sönümleyicilerin toplam kütlesi 53t olarak alınmıştır. Bu değer, rijit kabul için hesaplanan 1. moda karşılık gelen kütlenin %5’ine karşılık gelmektedir. Tablo 6’dan görüleceği üzere S_A ’dan S_C ’ye doğru gidildikçe sönüm katsayısı ve rijitlik katsayısı azalmaktadır. Bununla birlikte en büyük sönüm ve rijitlik katsayılarının rijit kabul için elde edildiği görülmektedir. Tablo 7’den STMD içerisindeki 1. TMD için sönüm katsayısının bütün durumlar için 0’a eşit olduğu görülmektedir. Buna karşın, STMD içerisindeki 2. TMD yüksek sönüm oranına sahiptir. Ayrıca, STMD içerisindeki her iki TMD içinde rijitlik katsayısı S_A ’dan S_C ’ye doğru gidildikçe azalmaktadır. Son olarak, STMD içerisindeki 1. TMD’nin kütlesi 2.TMD’nin kütlesine göre daha fazla edilmektedir.



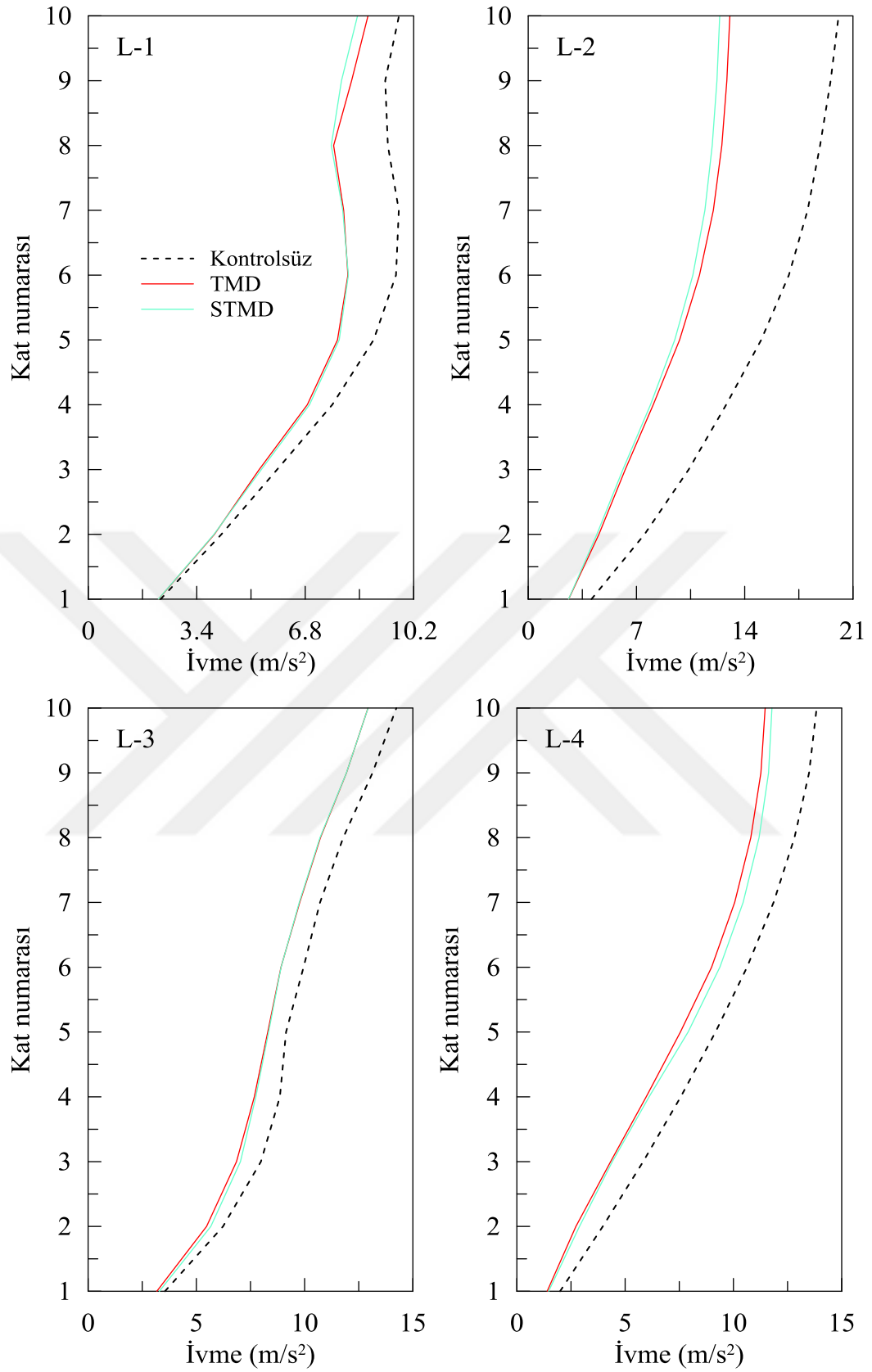
şekil 21. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (L-1-L-4)



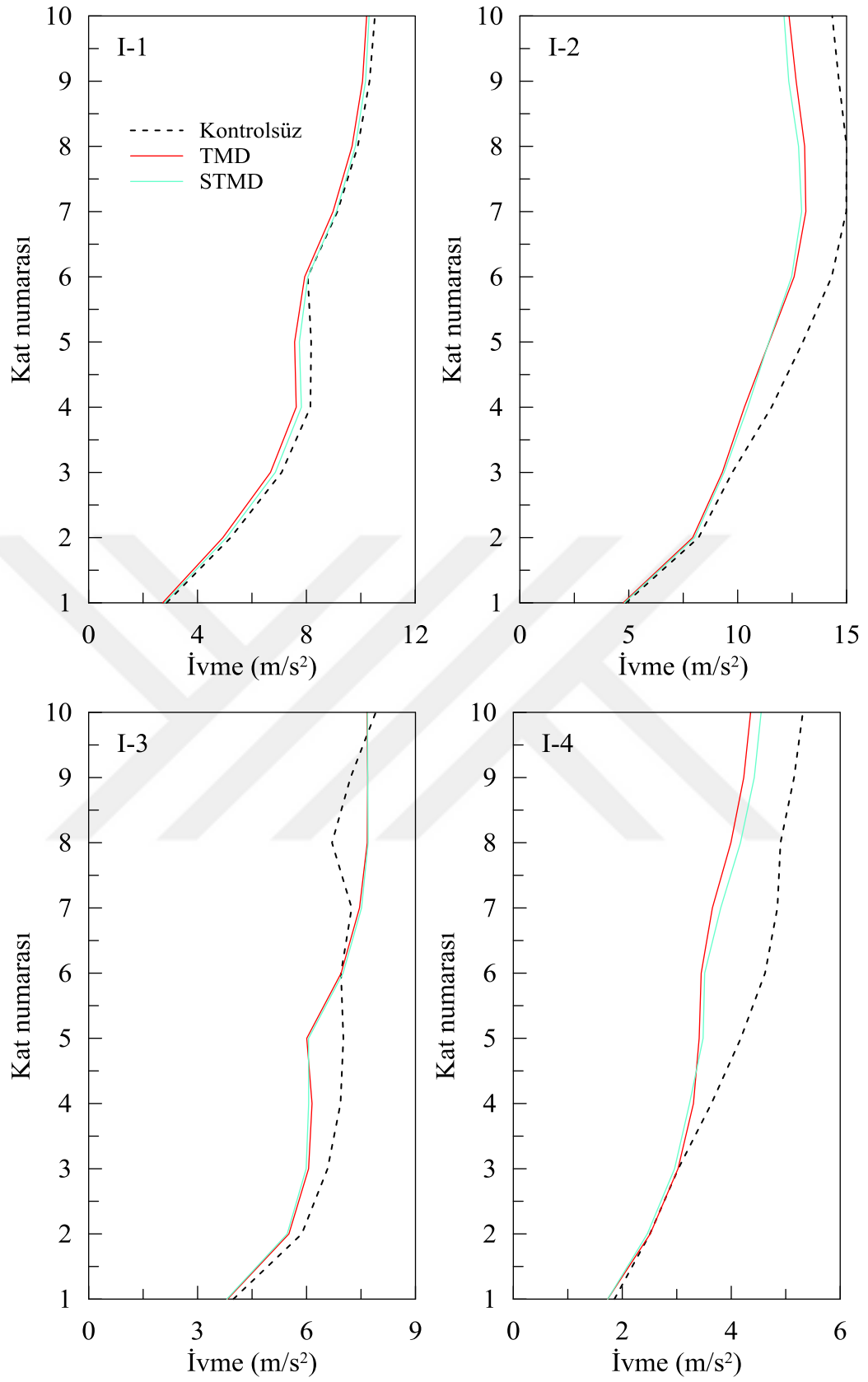
şekil 22. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4)



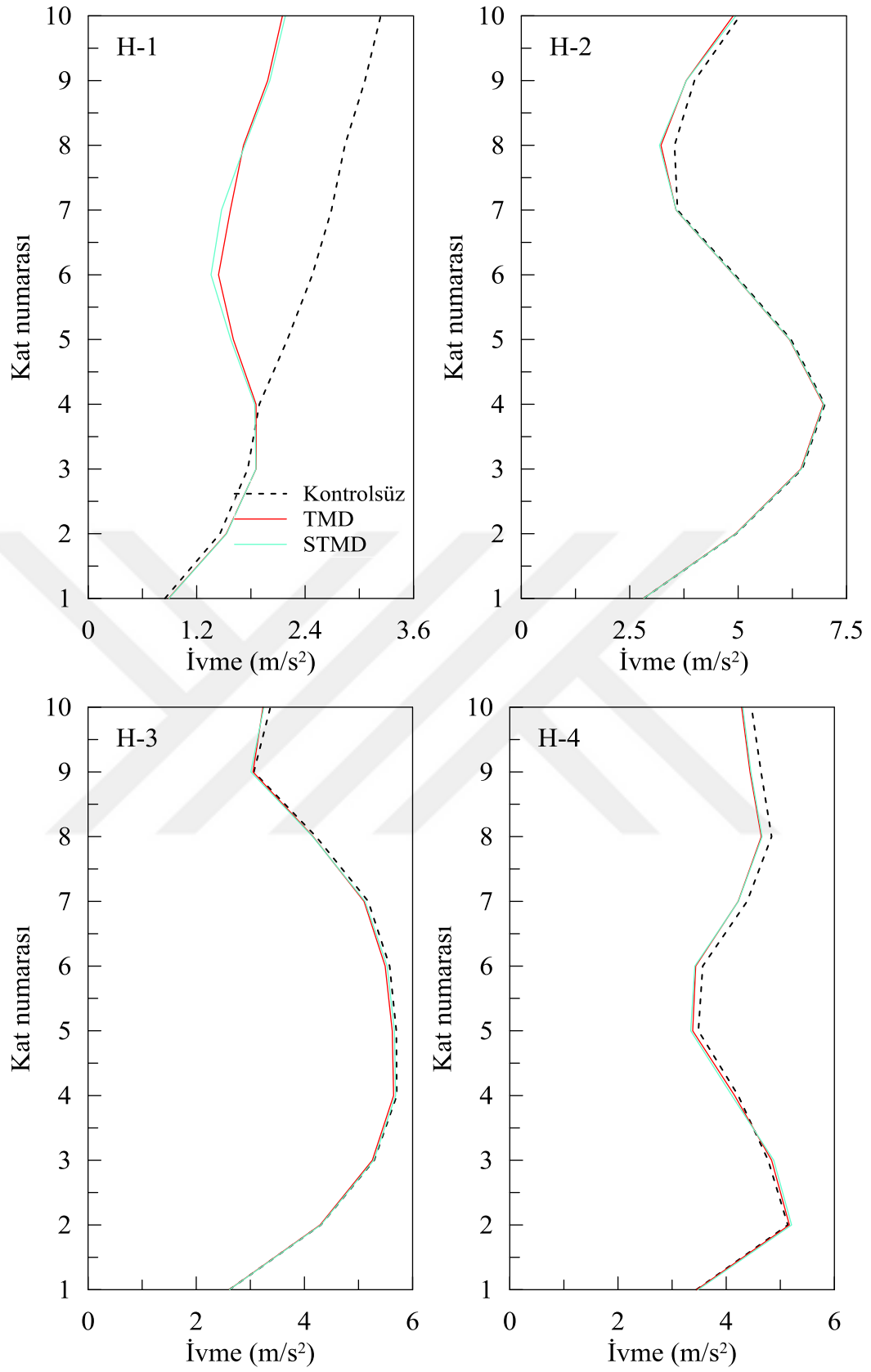
şekil 23. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4)



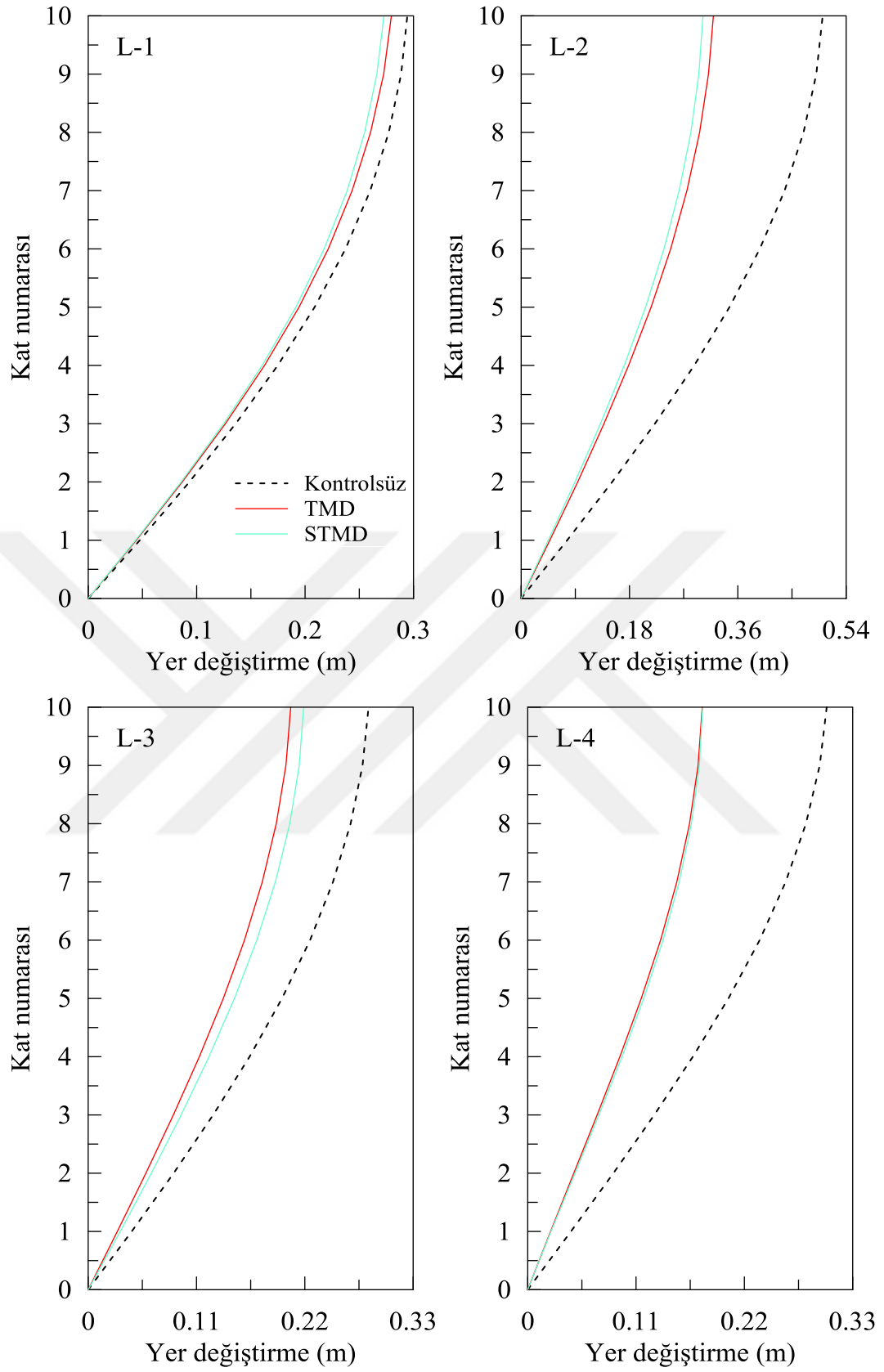
Şekil 24. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4)



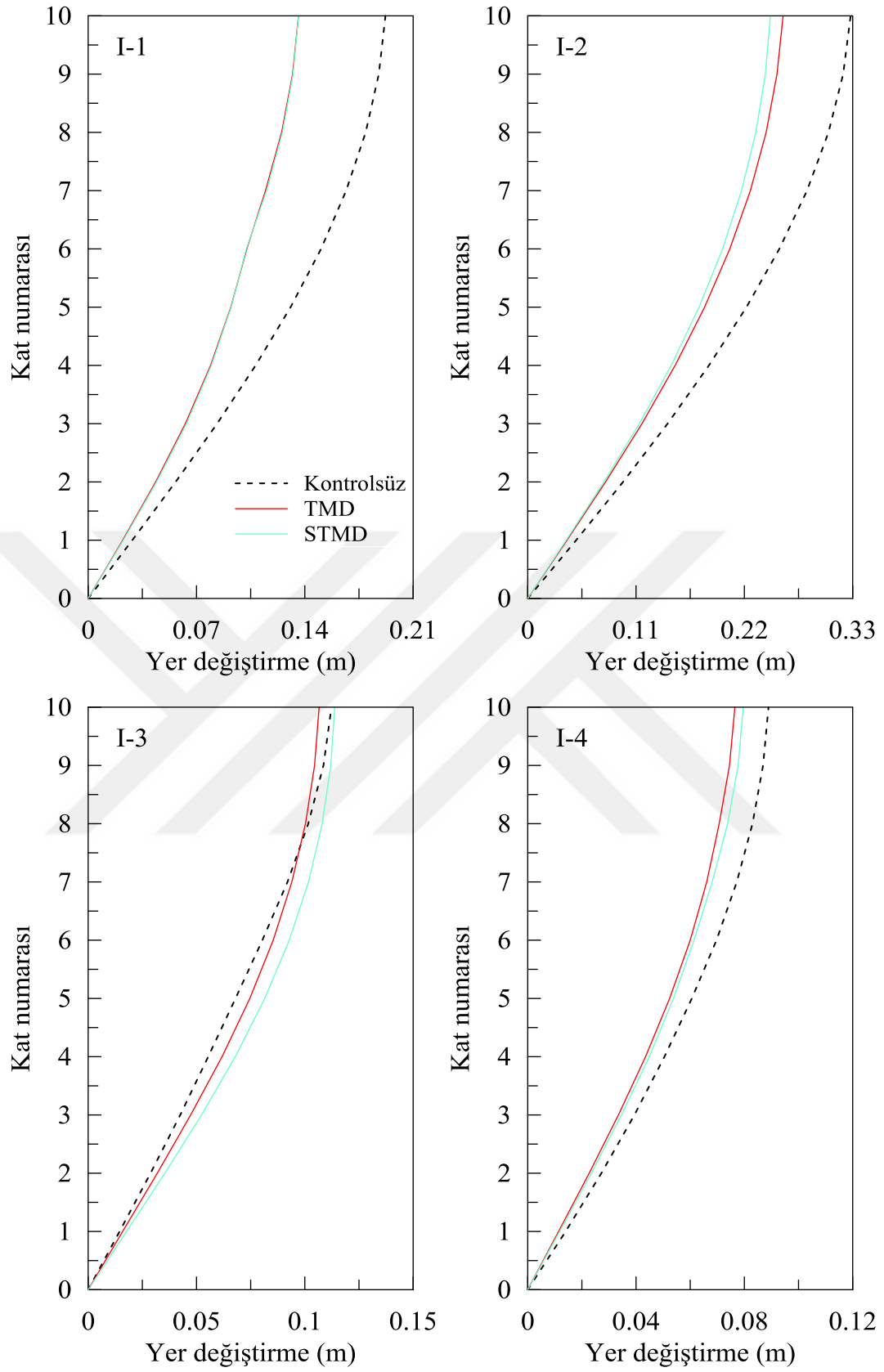
Şekil 25. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4)



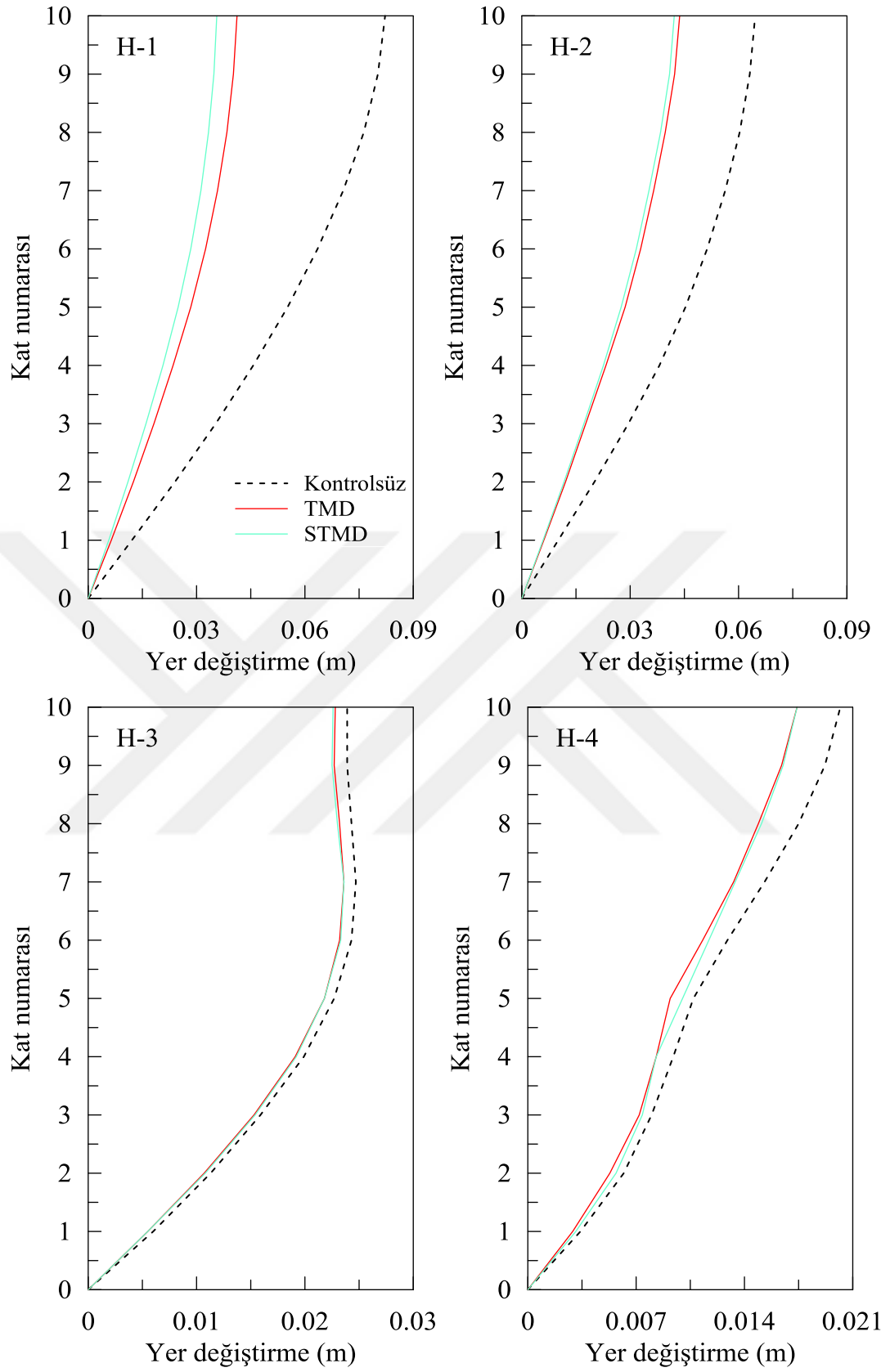
Şekil 26. Rijit kabul için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4)



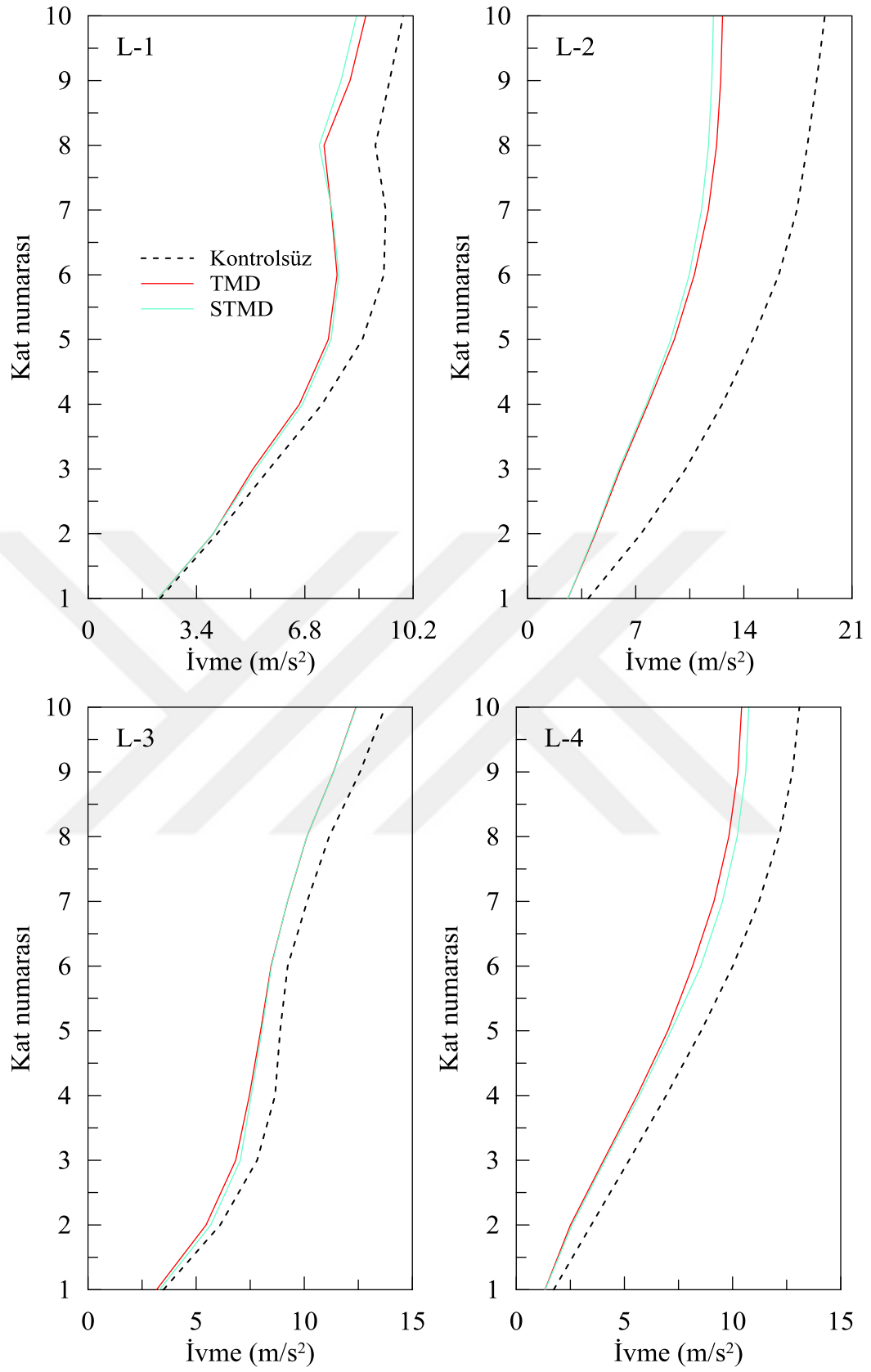
şekil 27. S_A için elde edilen maksimum yer değiştirmeleri (L-1-L-4)



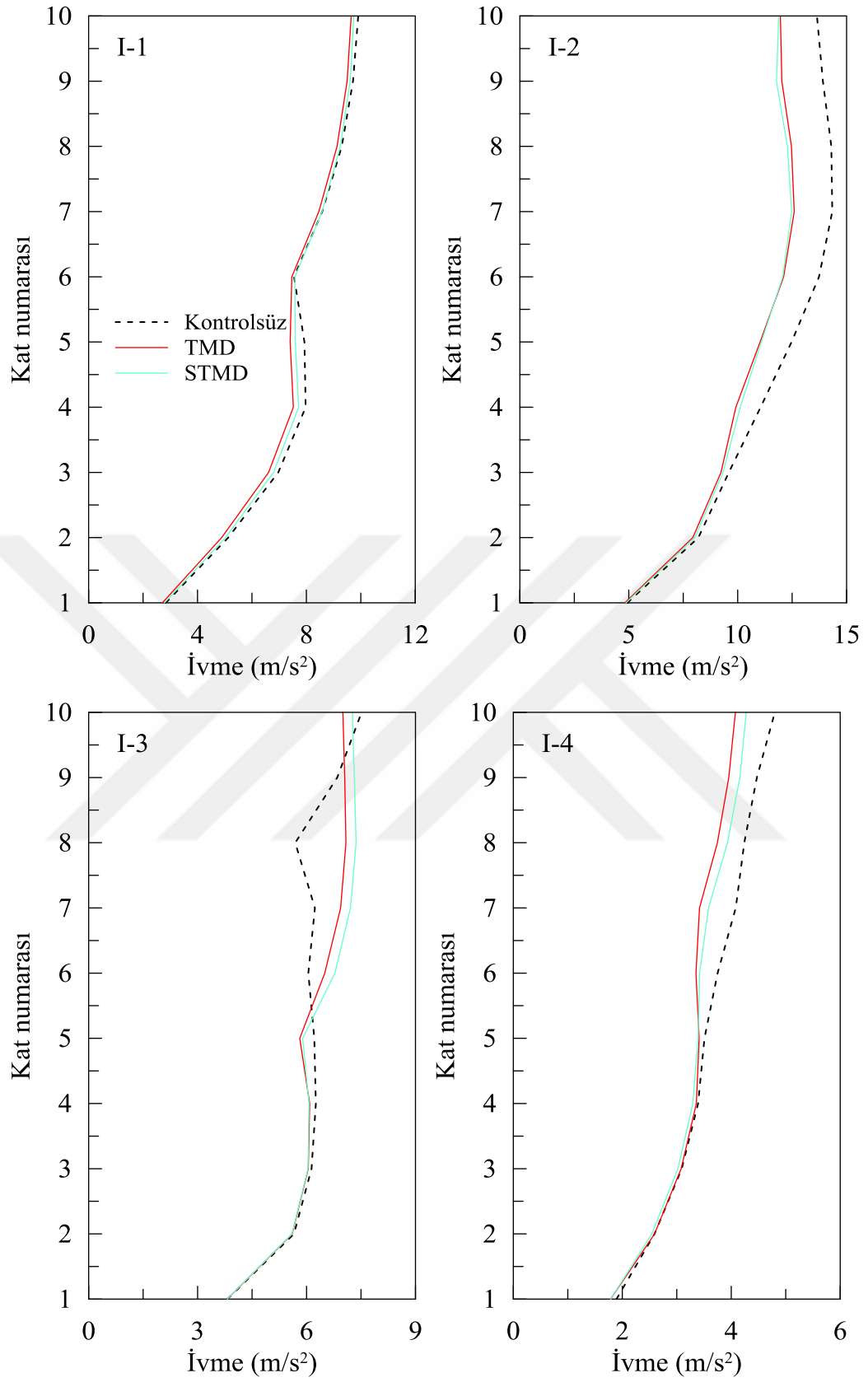
şekil 28. S_A için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4)



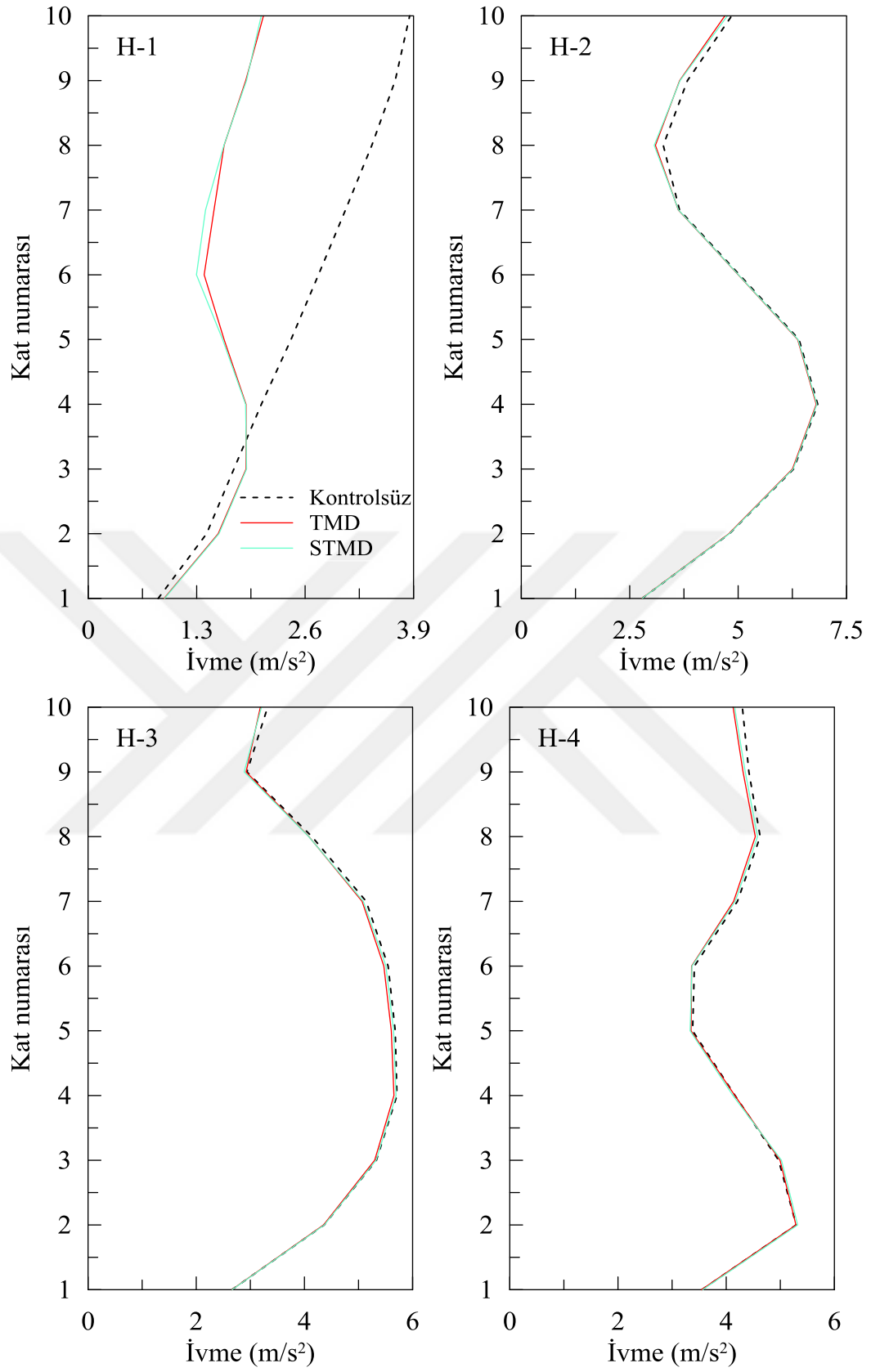
şekil 29. S_A için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4)



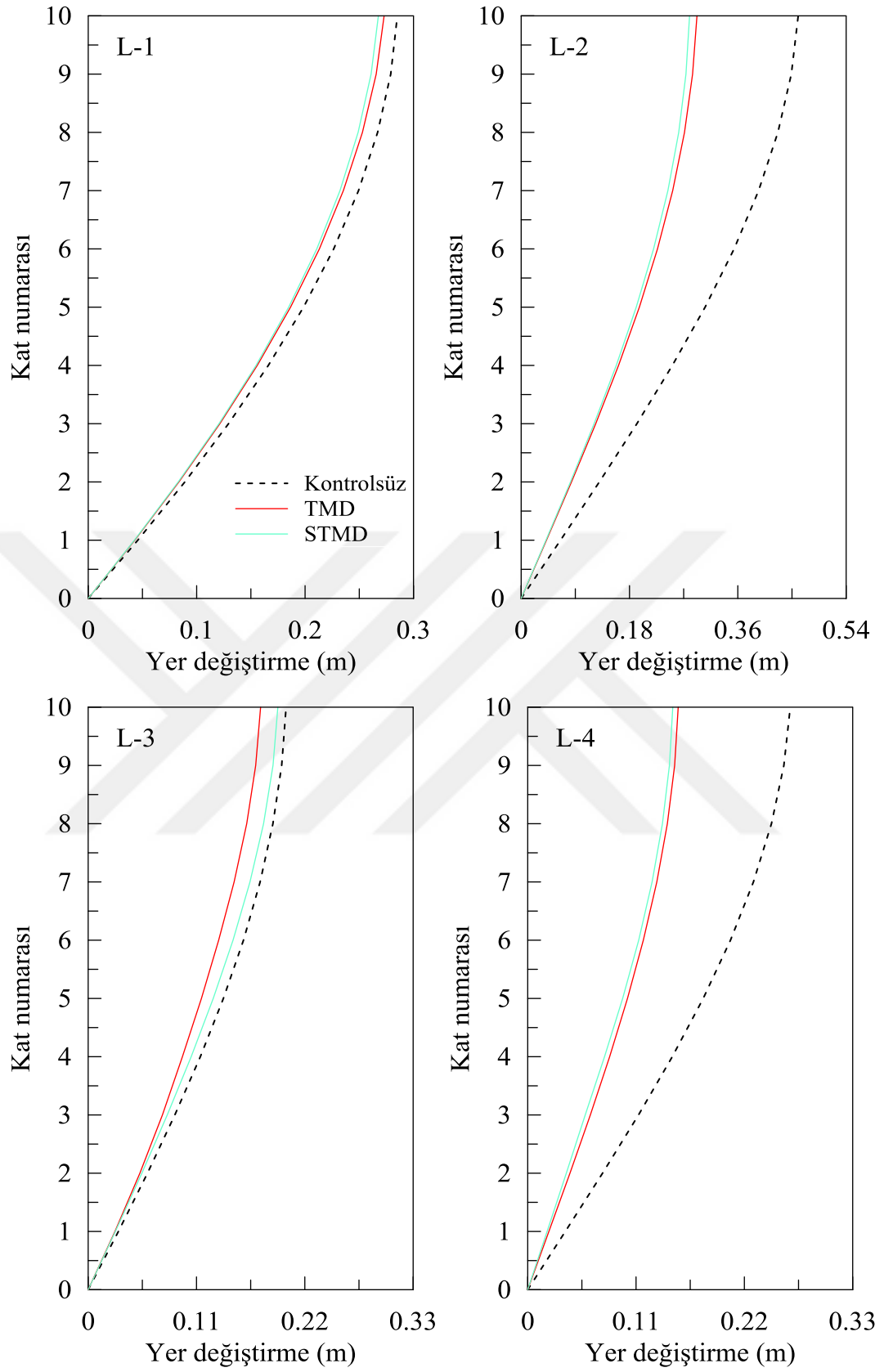
Şekil 30. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4)



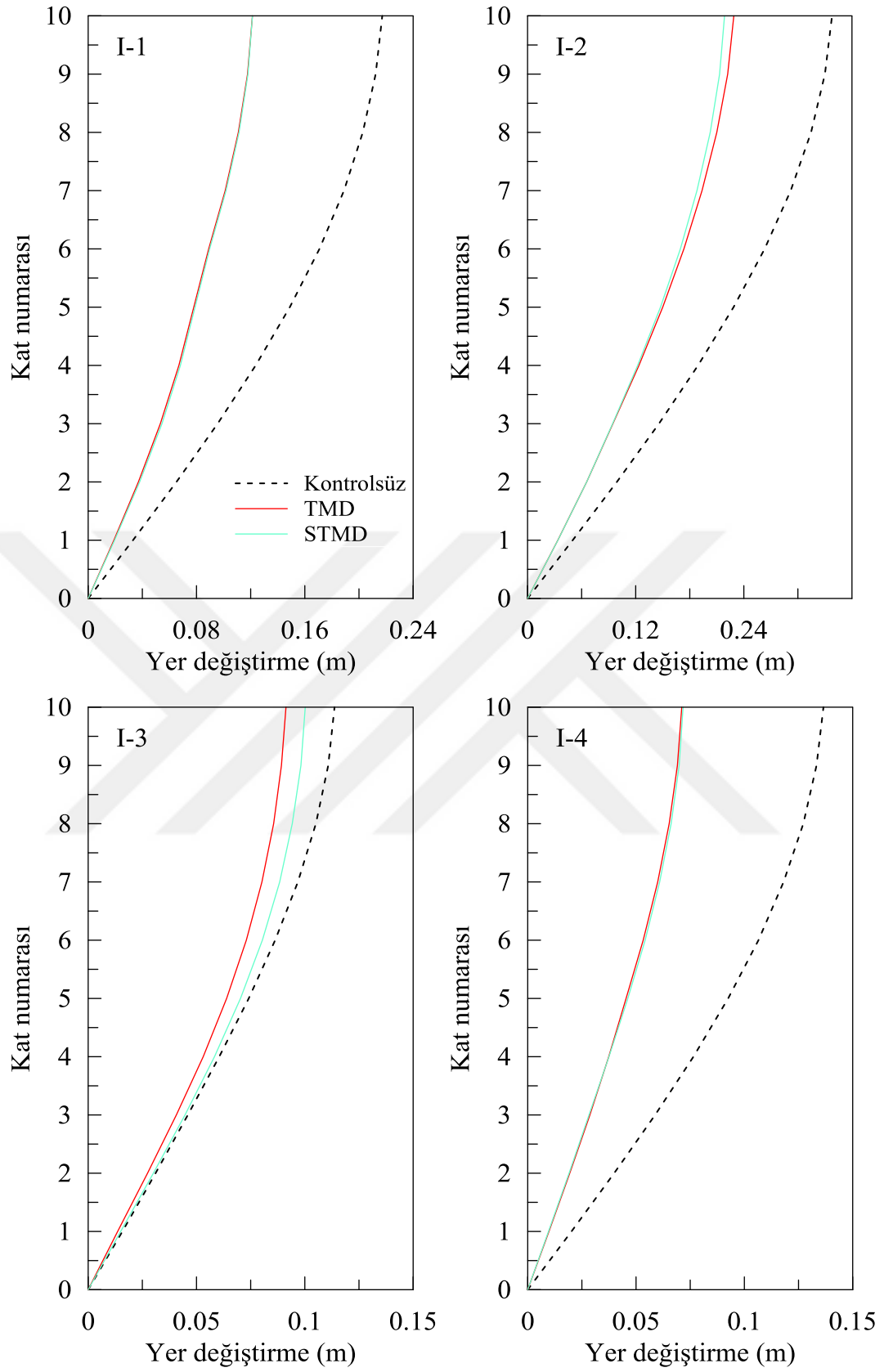
Şekil 31. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4)



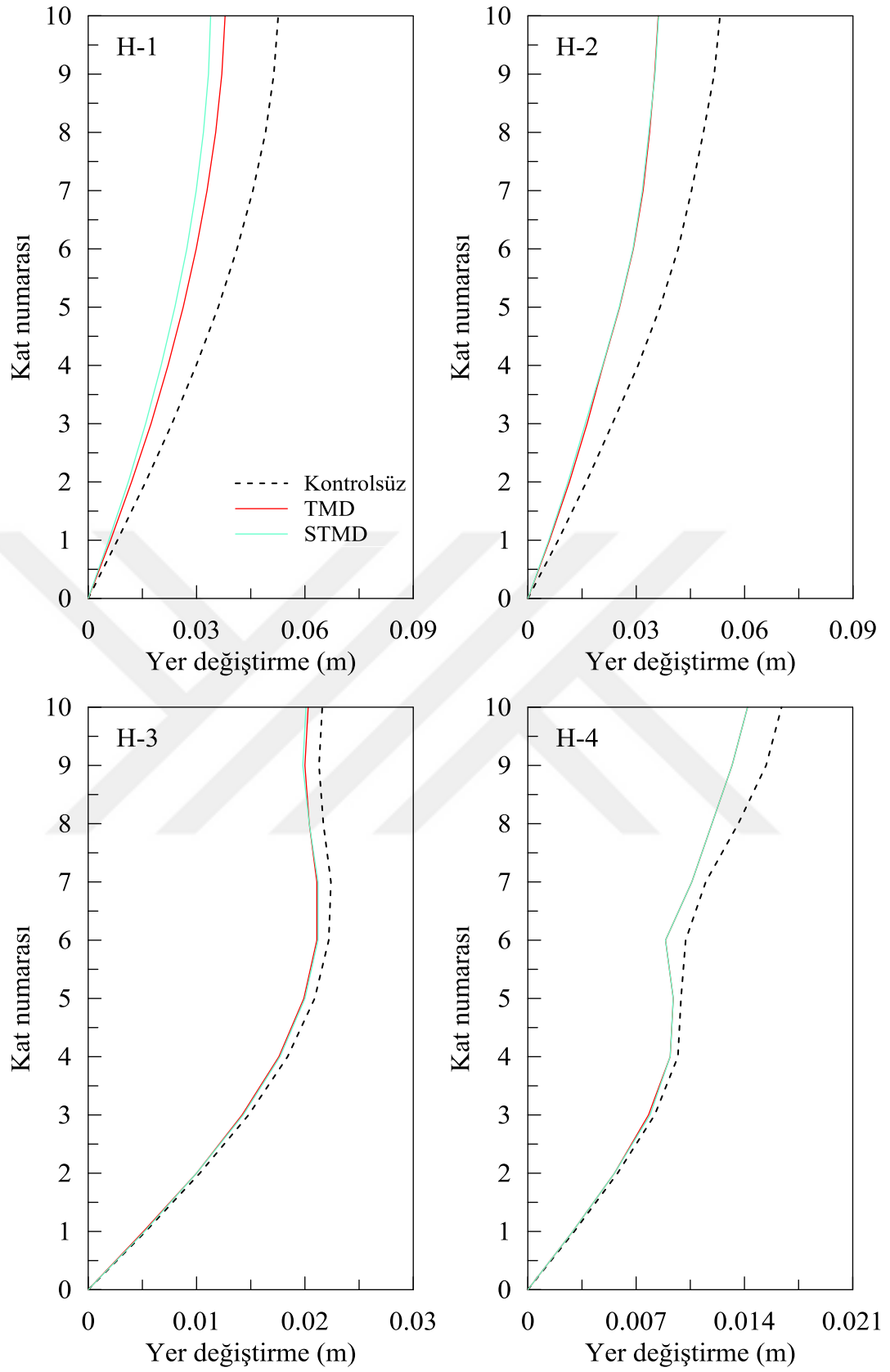
Şekil 32. S_A için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4)



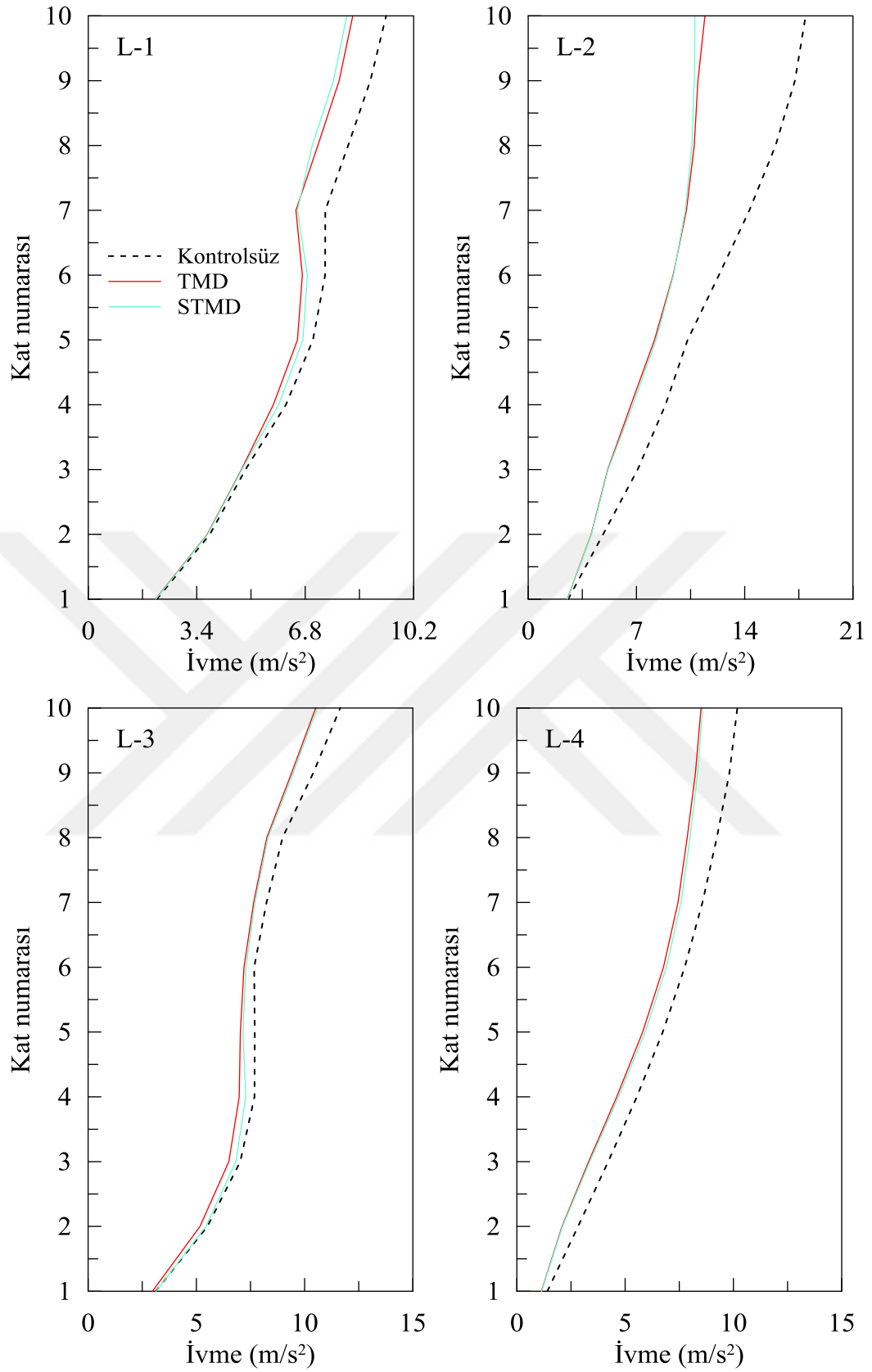
şekil 33. S_B için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (L-1-L-4)



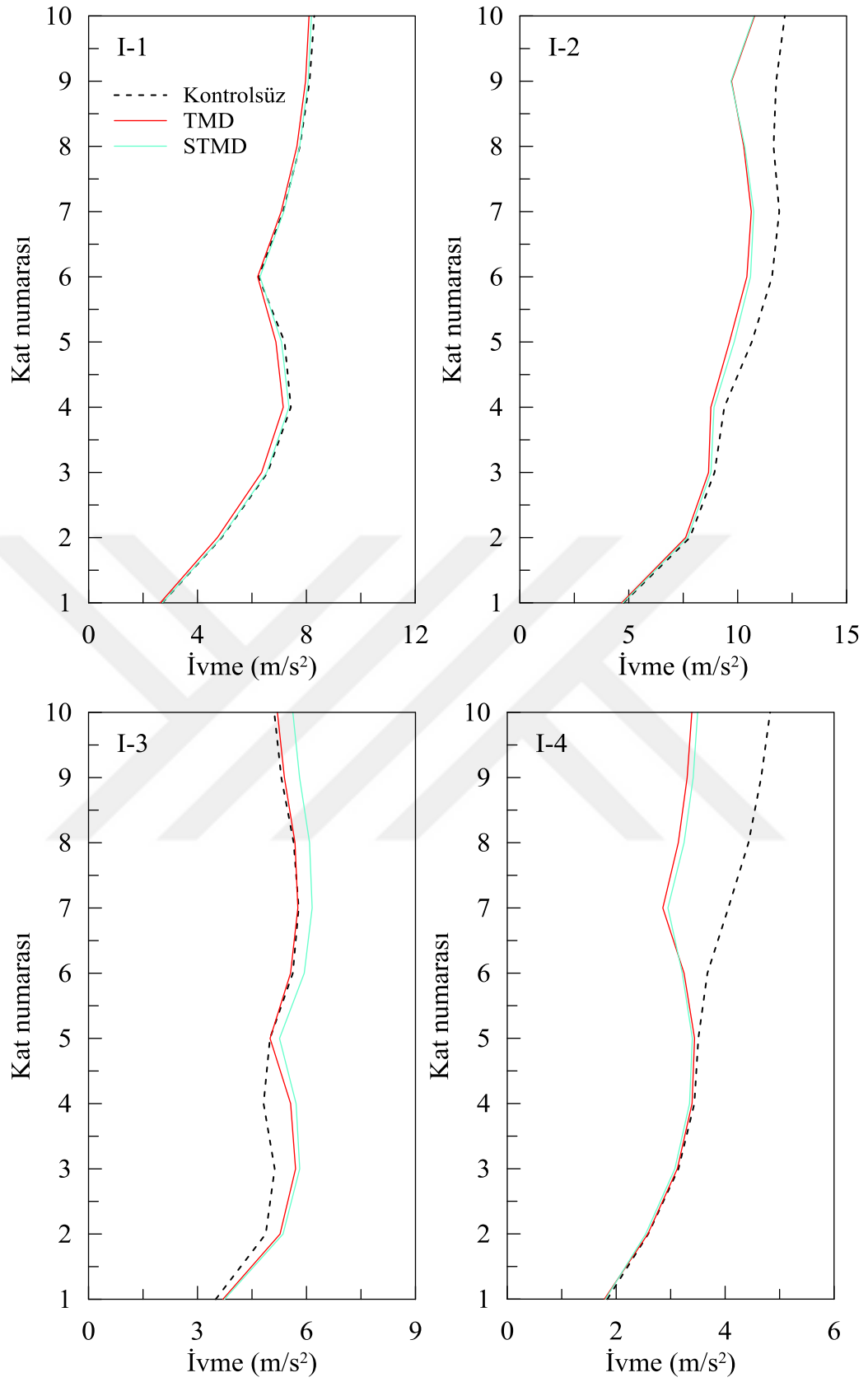
şekil 34. S_B için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4)



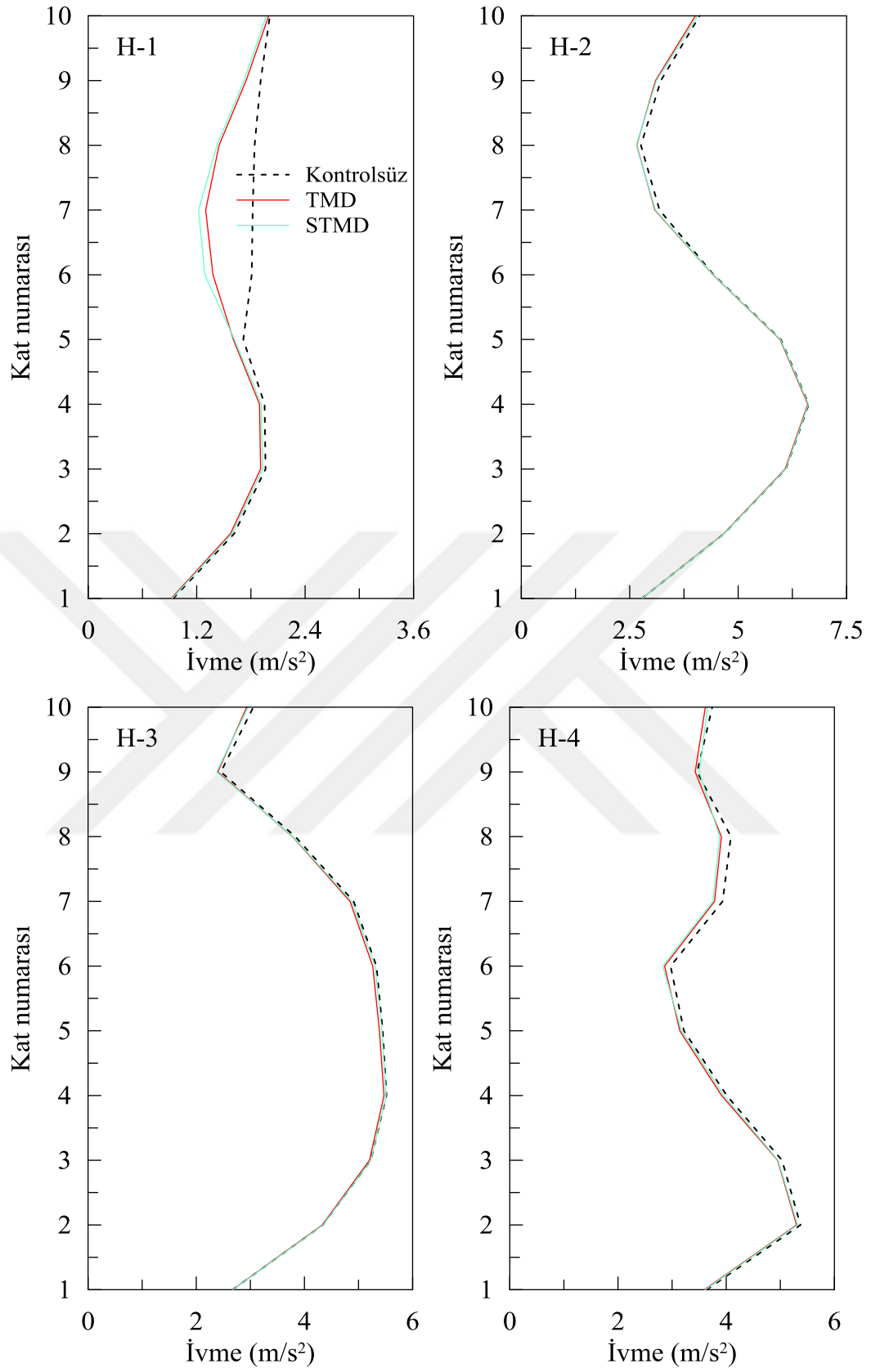
şekil 35. S_B için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4)



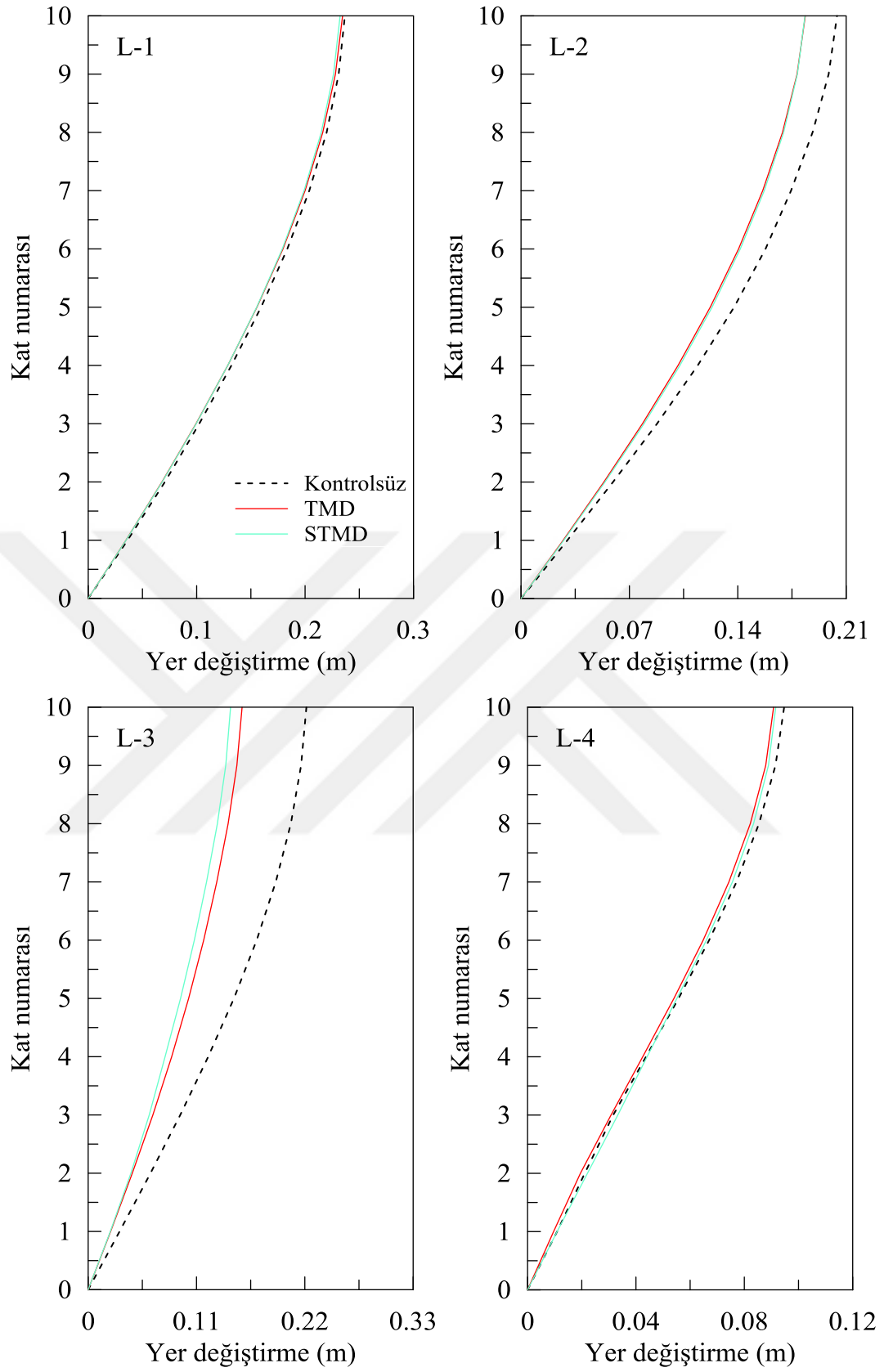
Şekil 36. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4)



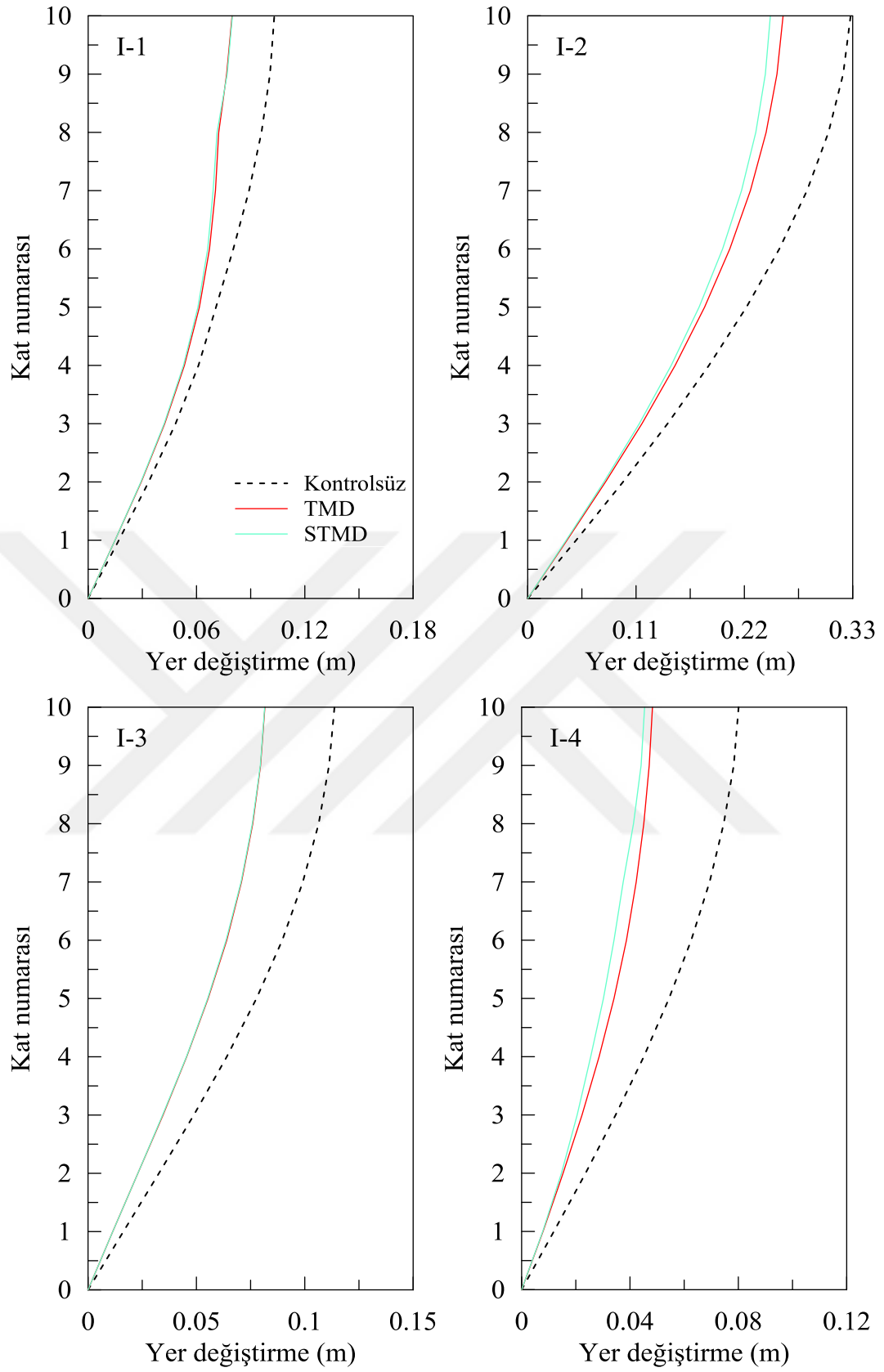
Şekil 37. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4)



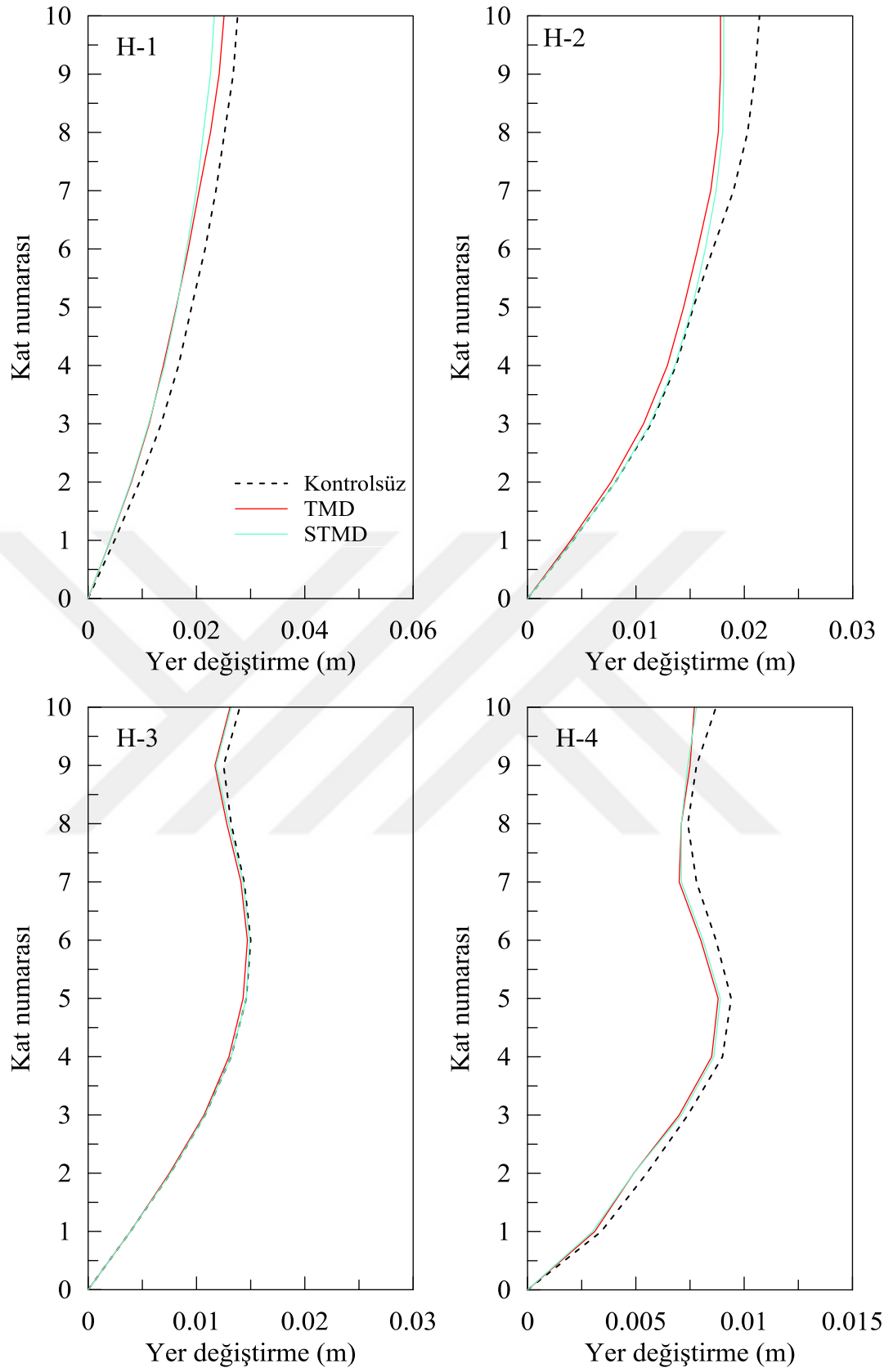
Şekil 38. S_B için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4)



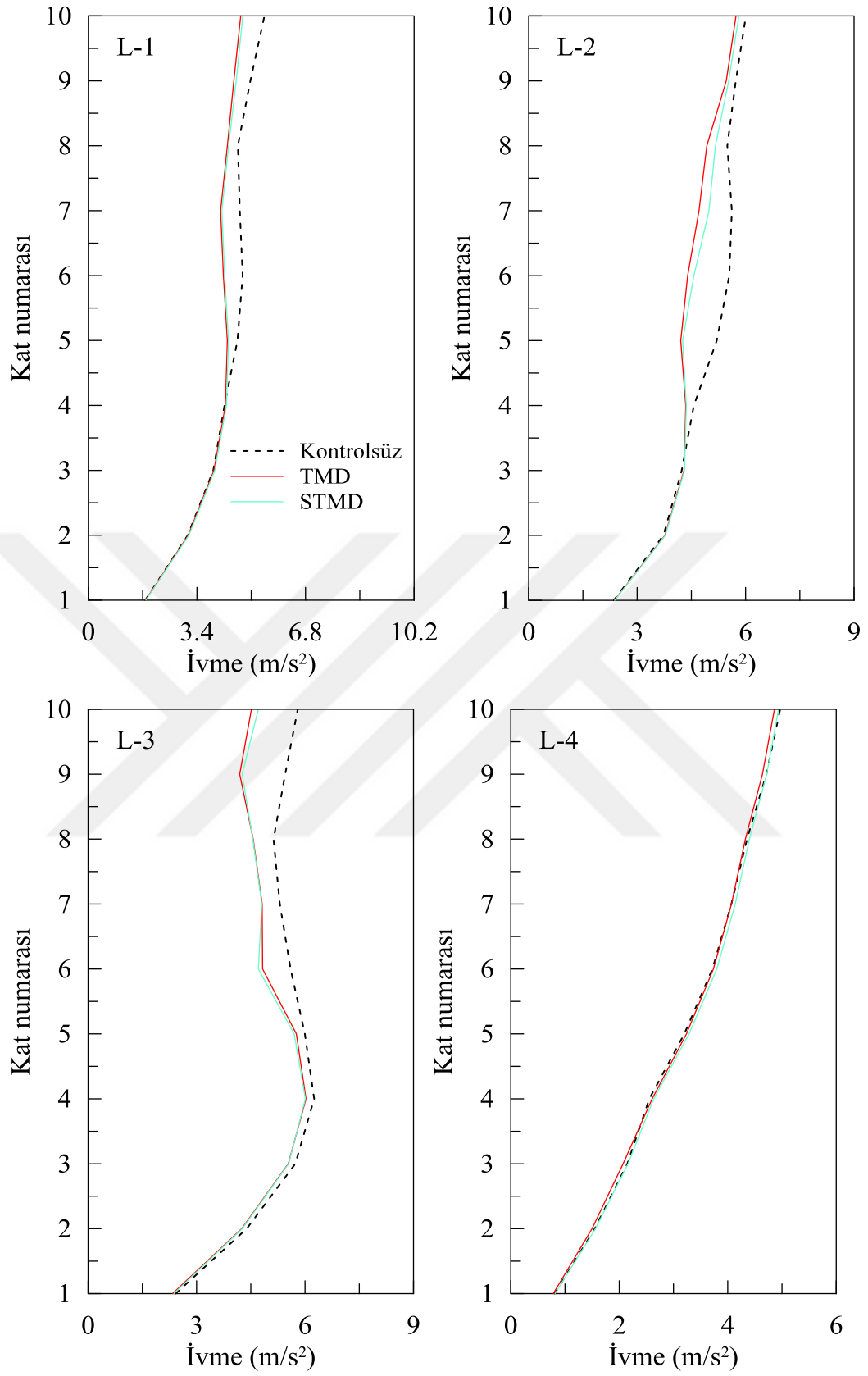
şekil 39. S_C için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (L-1-L-4)



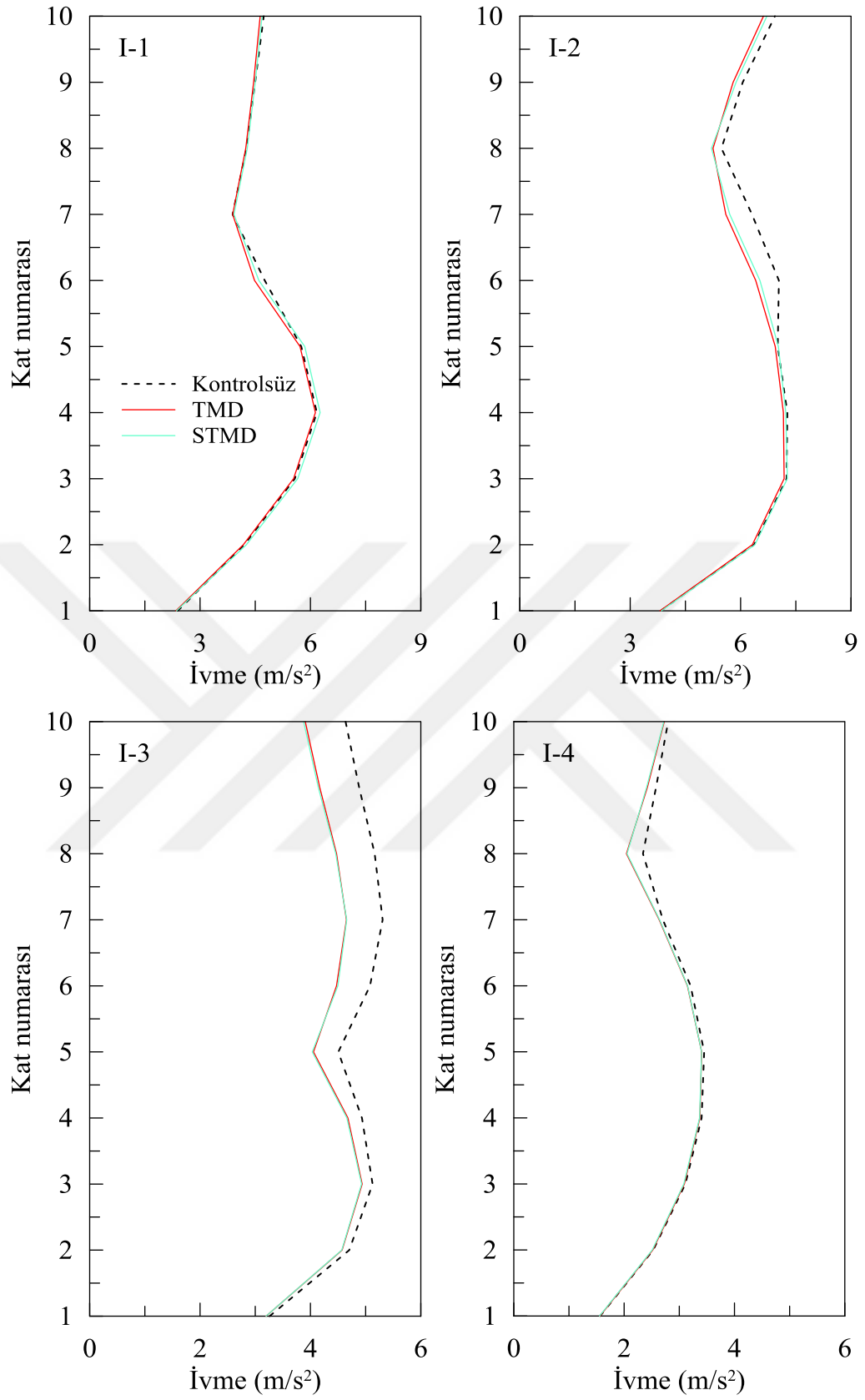
şekil 40. S_C için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (I-1-I-4)



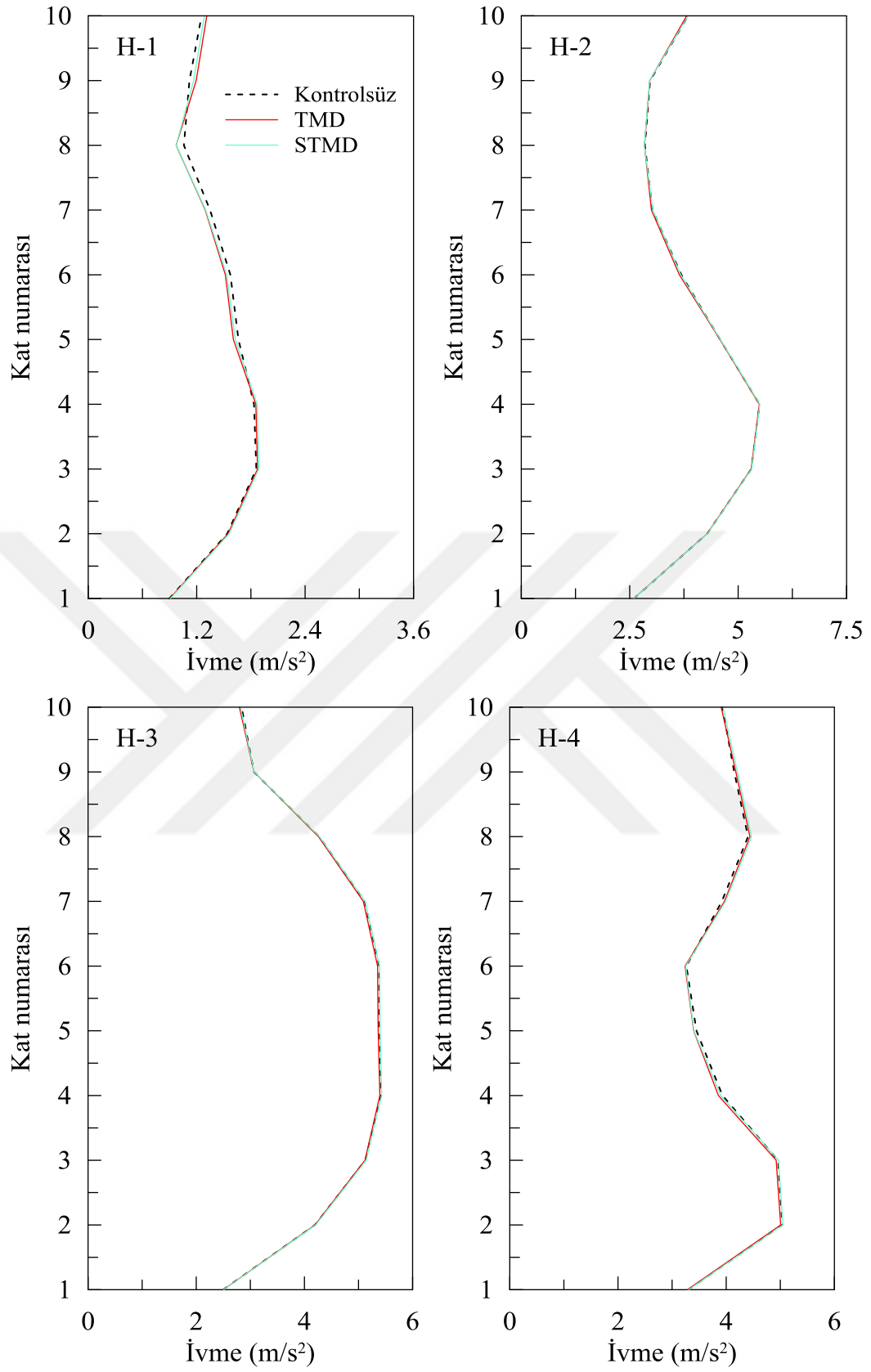
şekil 41. S_C için elde edilen maksimum kat yer değiştirmeleri (H-1-H-4)



Şekil 42. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (L-1-L-4)



Şekil 43. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (I-1-I-4)

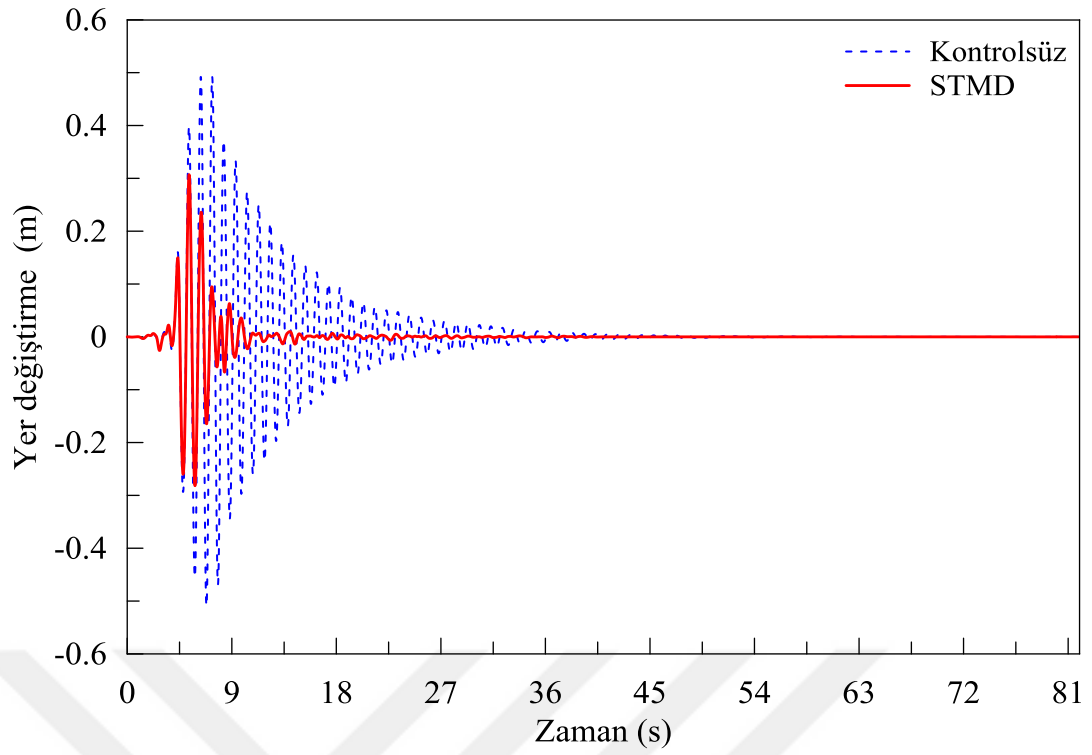


Şekil 44. S_C için elde edilen maksimum kat ivmeleri (H-1-H-4)

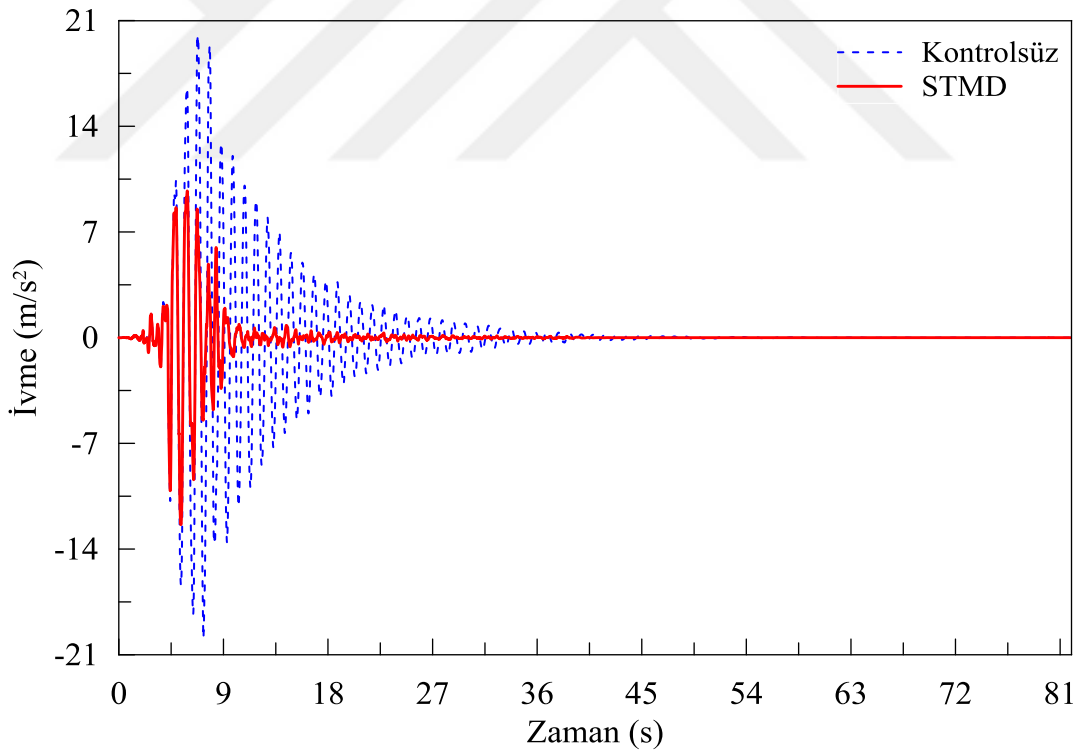
Şekil 21-23 ve Şekil 24-26'da sırasıyla rijit kabul için yapılan analizlerde elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum ivme değerlerinin katlara göre değişimi görülmektedir. Ayrıca, bu şekillerde kontrolsüz durum için elde edilen dinamik tepkiler kontrollü (TMD ve STMD) durumla karşılaştırılmıştır. Benzer şekiller, sırasıyla S_A için Şekil 27-29 ve Şekil 30-32'de, S_B için Şekil 33-35 ve Şekil 36-38'de ve S_C için Şekil 39-41 ve Şekil 42-44'de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere, en büyük yer değiştirme değerleri en üst katta meydana gelirken en büyük ivme tepkileri çoğunlukla en üst katta meydana gelmiş olsa da bazı durumlarda ara katlarda da meydana gelmektedir. Bu nedenle, TMD ve STMD'nin kontrol performanslarının karşılaştırılmasında en büyük tepkinin meydana geldiği kat dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, düşük frekans içeriğine sahip depremler genellikle daha büyük yer değiştirme ve ivme tepkileri meydana getirmektedir. Ayrıca, orta frekans içeriğine sahip depremlerin ise yüksek frekans içeriğine sahip depremlere göre daha büyük dinamik tepkiler meydana getirdiği görülmüştür. Her bir deprem için elde edilen dinamik tepkiler göz önüne alındığında en kritik tepkilerin çoğunlukla Loma Prieta (L-2) deprem kaydı için elde edildiği görülmektedir. Şekil 45 ve 46'da sırasıyla rijit kabul için Loma Prieta deprem kaydı altında en üst katta elde edilen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman eğrileri verilmiştir. Benzer şekiller, S_A , S_B ve S_C için sırasıyla Şekil 47 ve 48'de, Şekil 49 ve 50'de ve Şekil 51 ve 52'de verilmiştir. STMD kullanılarak maksimum yer değiştirme değerleri rijit kabul, S_A , S_B ve S_C için sırasıyla %39.71, %39.71, %39.21 ve %10.15 azaltılmıştır. Maksimum ivme değerleri ise rijit kabul, S_A , S_B ve S_C için sırasıyla %38.29, %37.49, %39.93 ve %3.25 azaltılmıştır. Her bir durum için elde edilen en büyük tepkiler Tablo 8'de verilmiştir. Görüldüğü üzere kritik deprem kaydı altında en büyük dinamik tepkiler rijit kabul için elde edilmektedir. Çalışma kapsamında ele alınan yapının S_C zemini yani çok yumuşak bir zemin üzerinde inşa edilmesi halinde ise dinamik tepkilerin rijit duruma göre önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Dinamik tepkilerdeki meydana gelen bu azalma STMD'nin kontrol performansını olumsuz etkilememektedir.

Tablo 8. STMD'li ve STMD'siz durum için elde edilen maksimum tepkiler

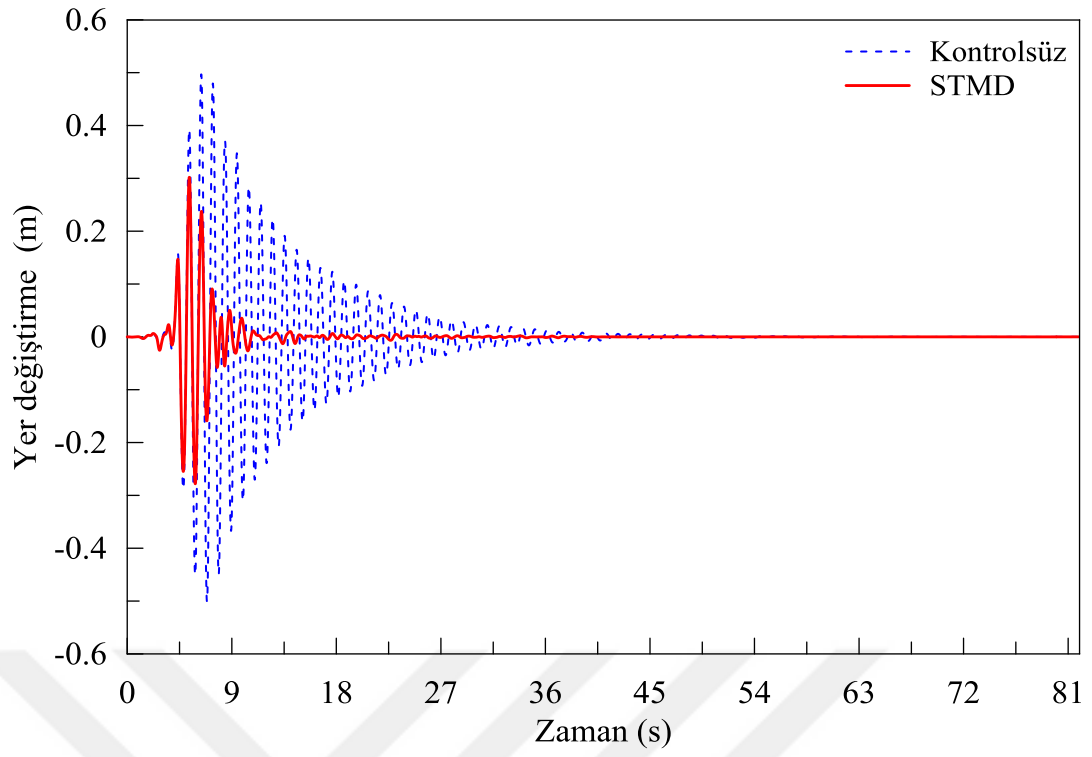
	Yer değiştirme (m)		İvme (m/s^2)	
	Kontrolsüz	Kontrollü	Kontrolsüz	Kontrollü
Rijit kabul	0.509	0.307	20.071	12.385
S_A	0.501	0.302	19.244	12.029
S_B	0.460	0.280	17.941	10.778
S_C	0.204	0.183	6.009	5.814



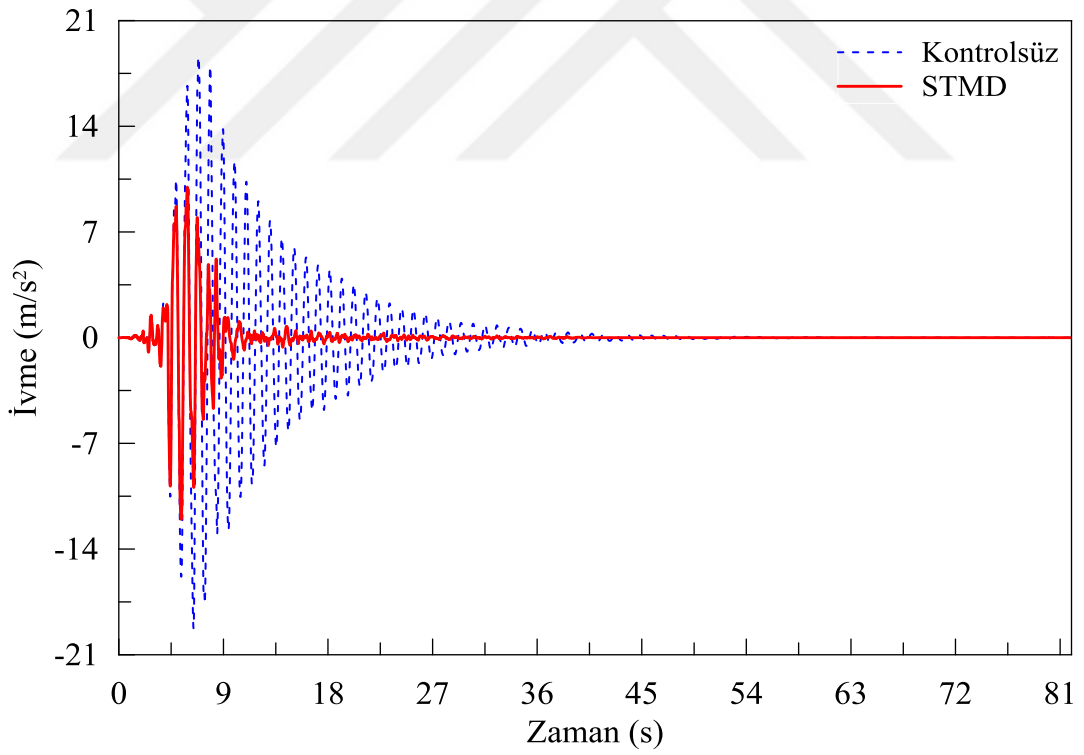
şekil 45. Rijit kabul için yer değişirme-zaman eğrisi



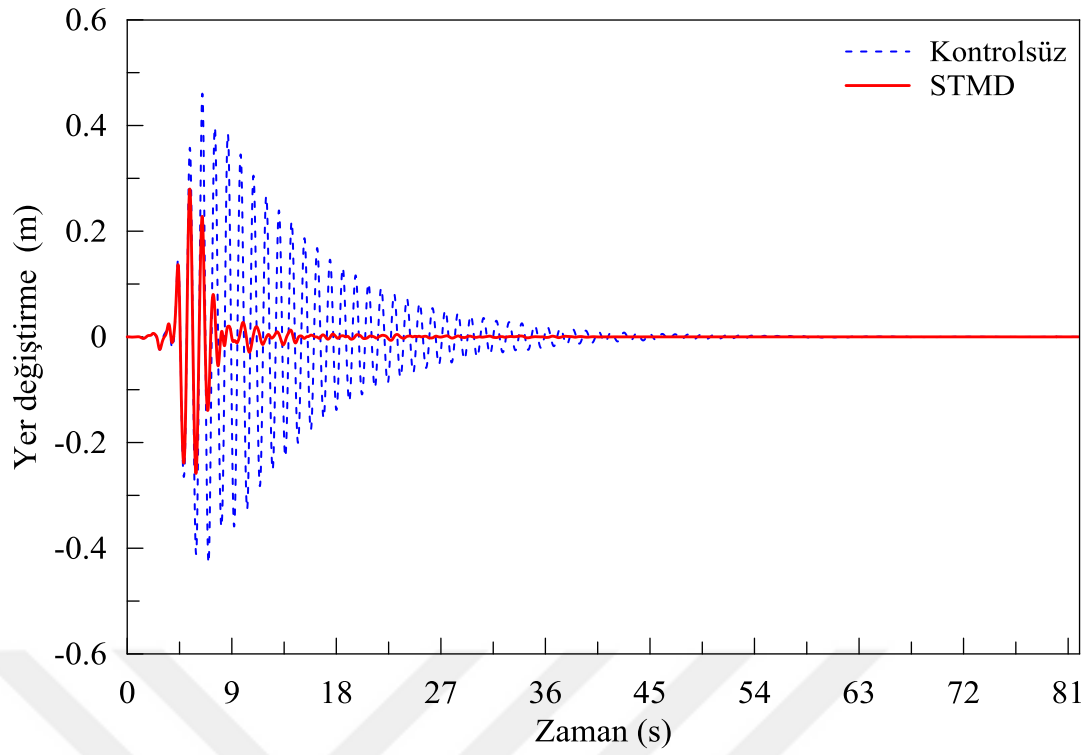
şekil 46. Rijit kabul için ivme-zaman eğrisi



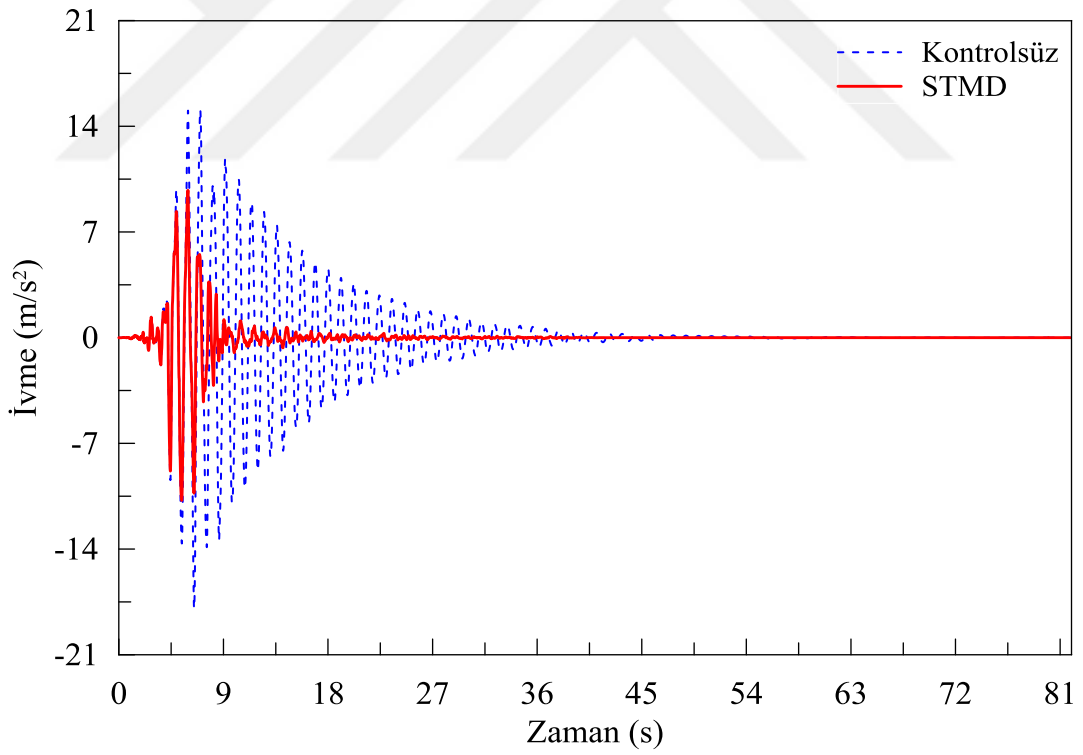
şekil 47. S_A için yer değiştirme-zaman eğrisi



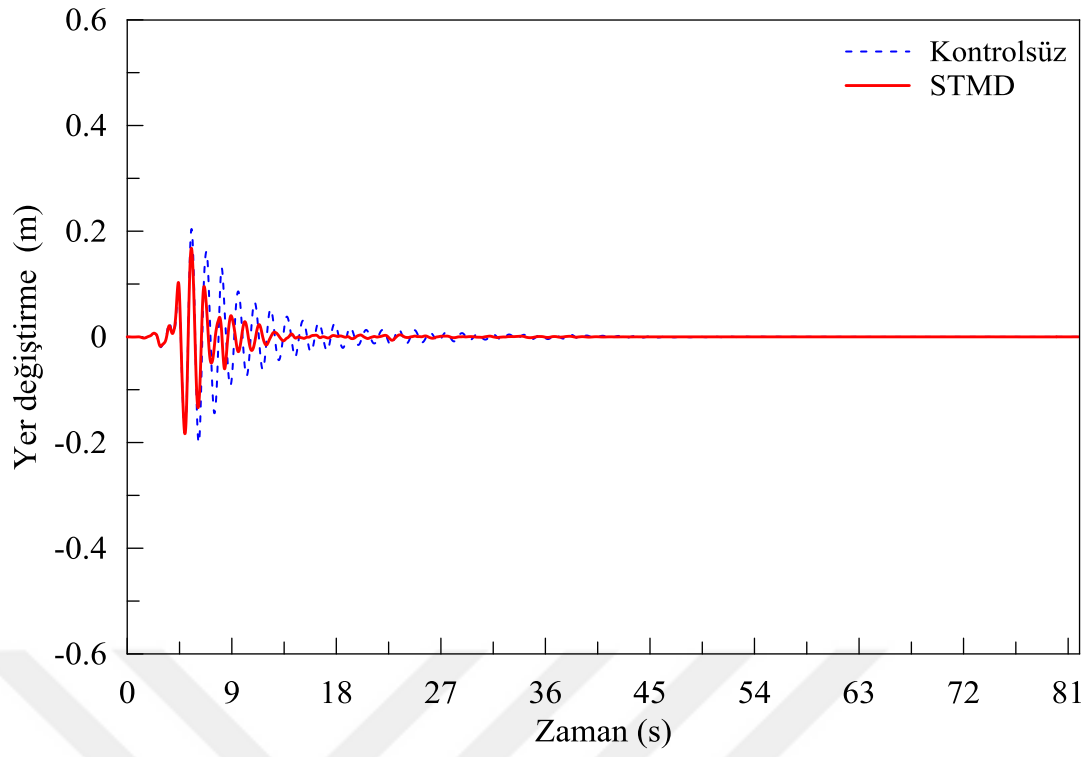
şekil 48. S_A için ivme-zaman eğrisi



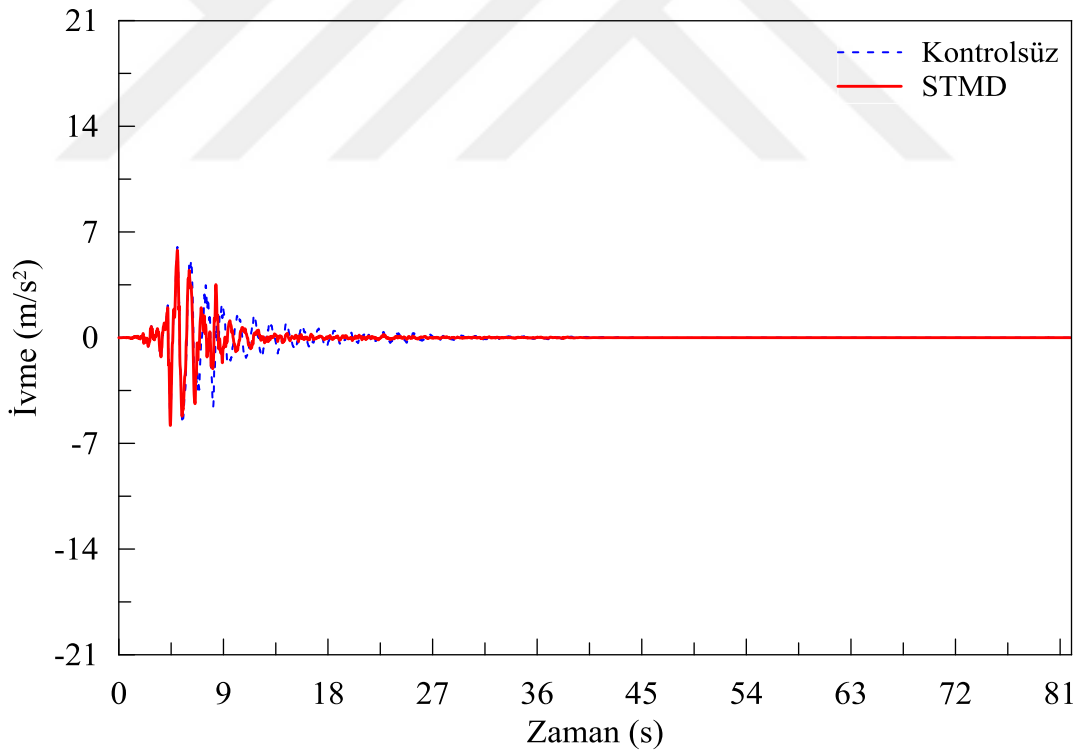
şekil 49. S_B için yer değiştirme-zaman eğrisi



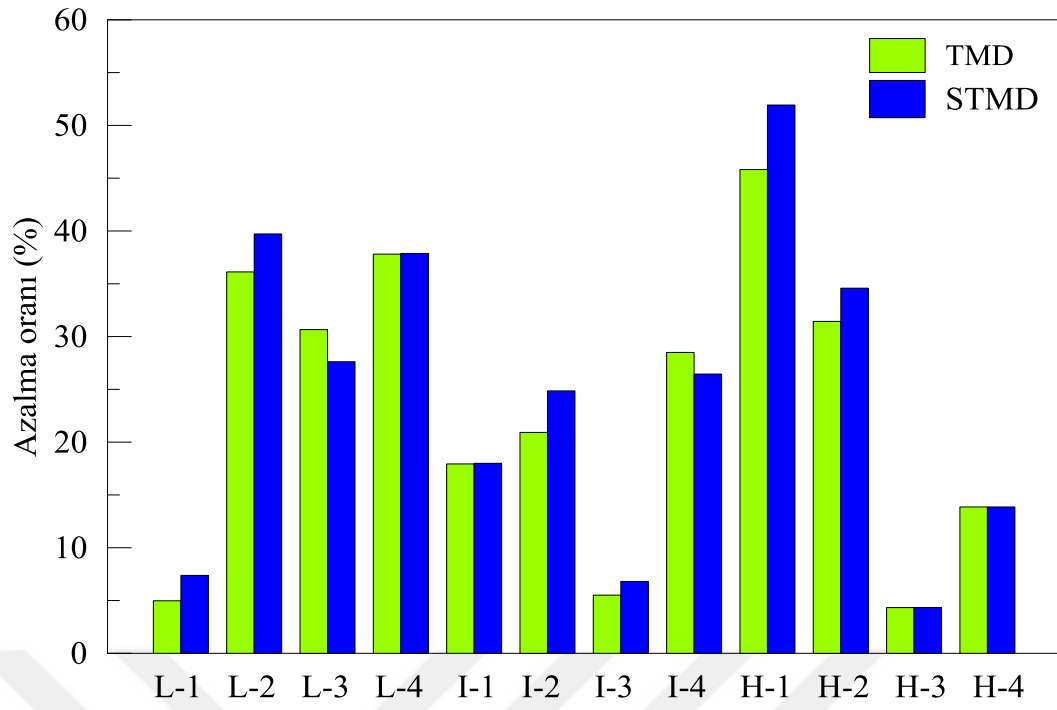
şekil 50. S_B için ivme-zaman eğrisi



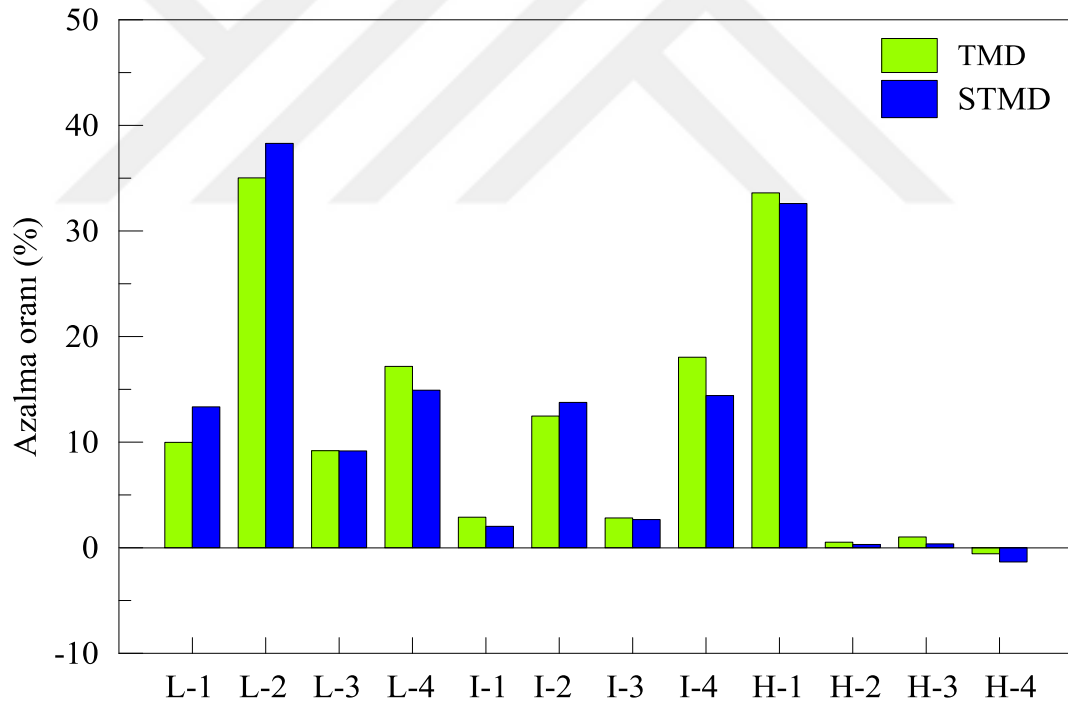
şekil 51. S_C için yer değiştirme-zaman eğrisi



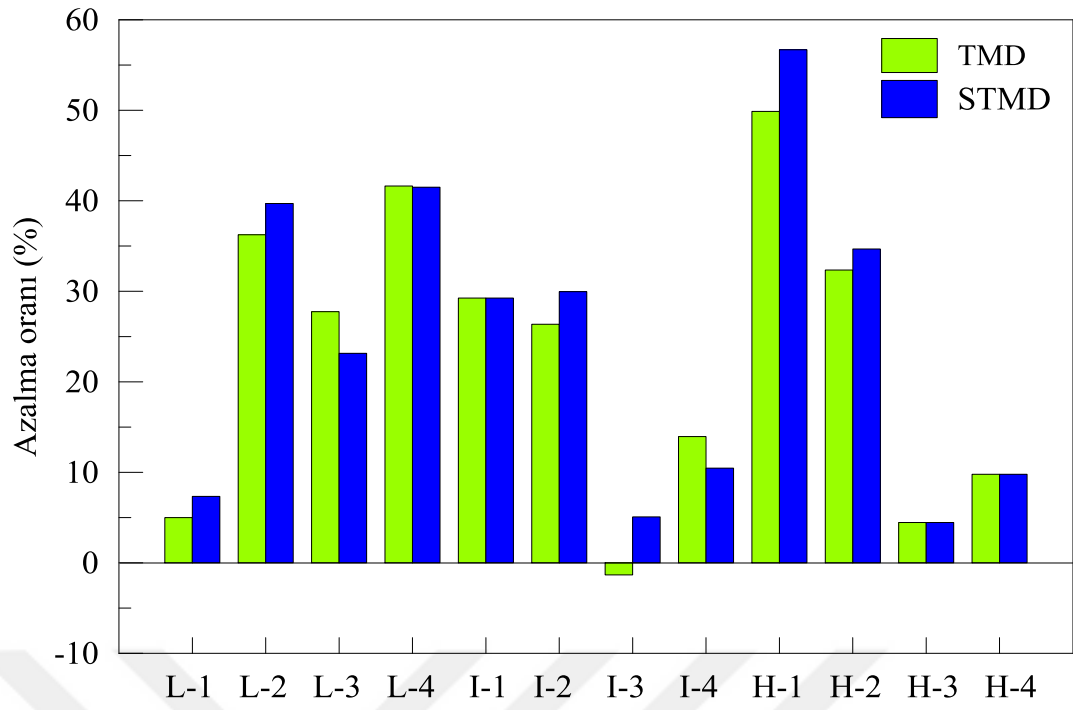
şekil 52. S_C için ivme-zaman eğrisi



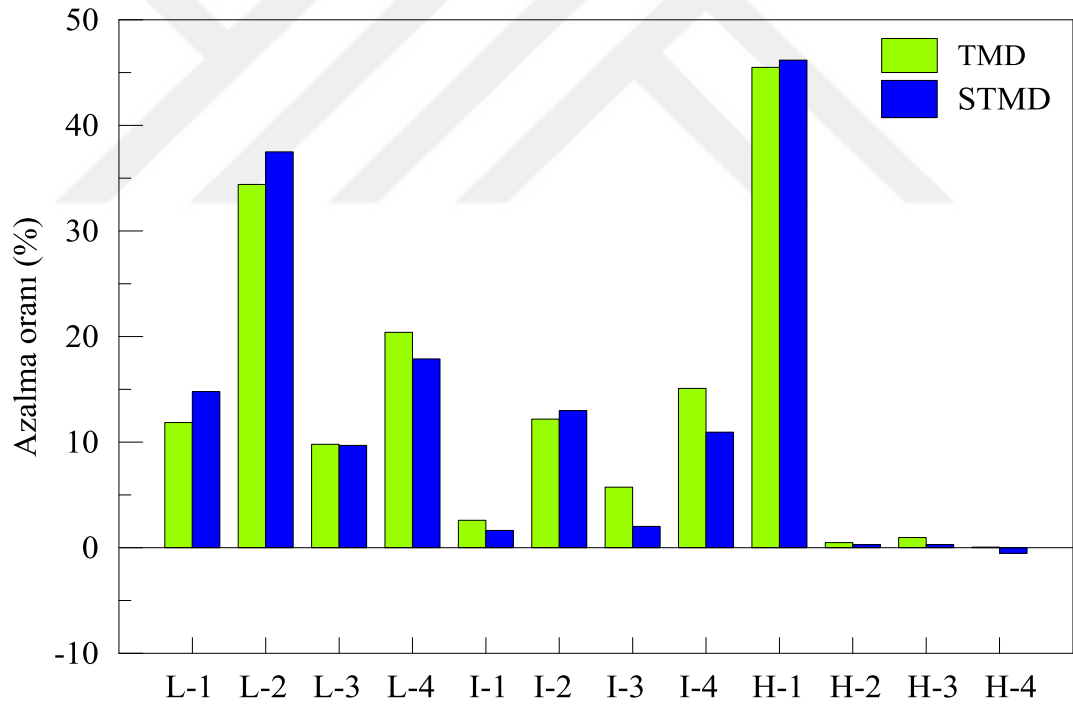
Şekil 53. Rijit kabul için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları



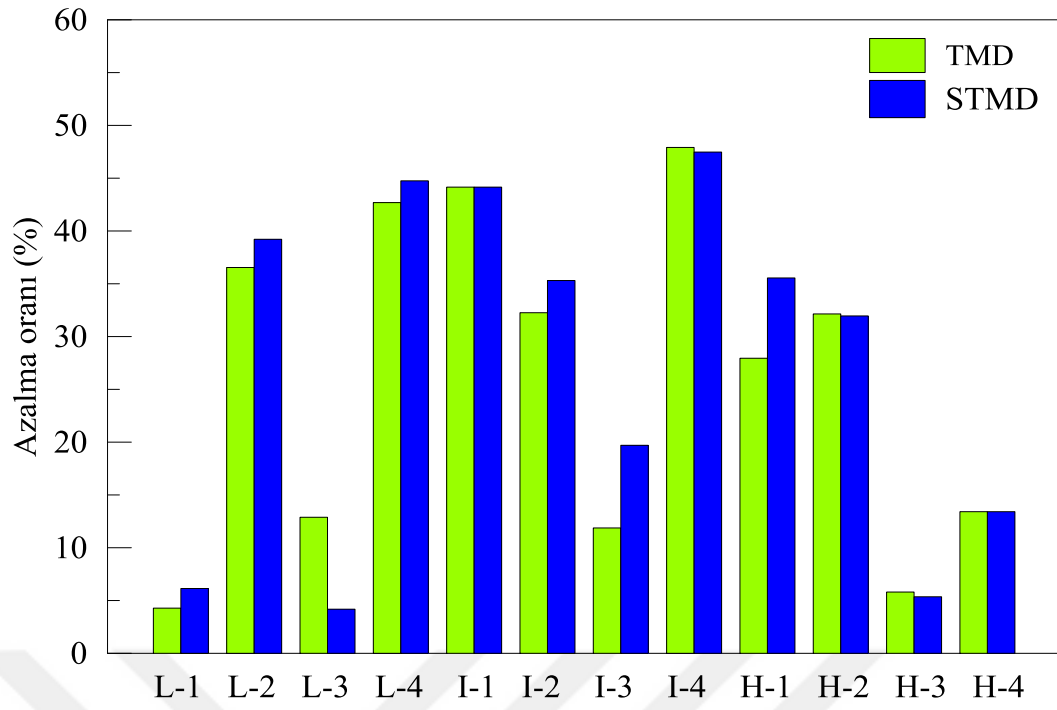
Şekil 54. Rijit kabul için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları



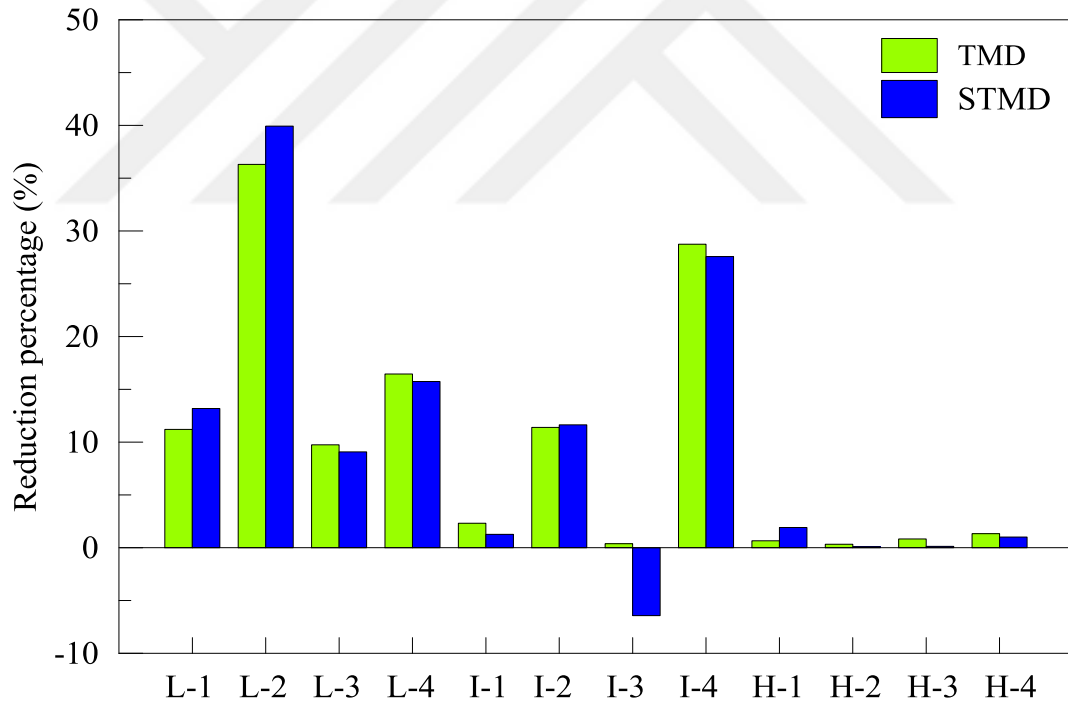
Şekil 55. S_A için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları



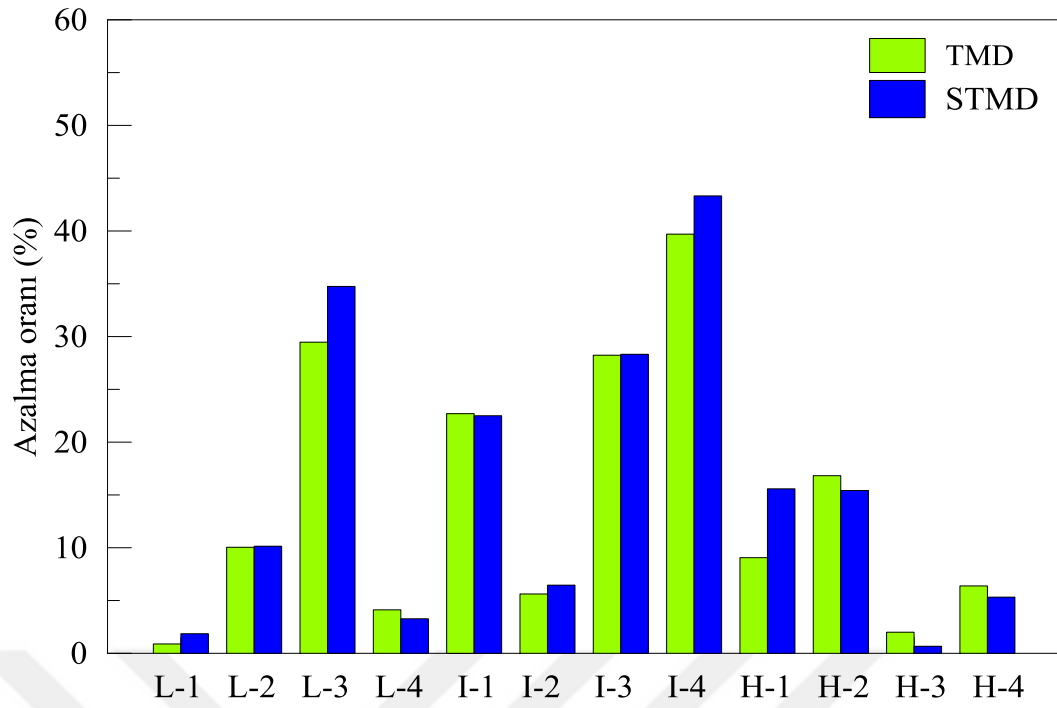
Şekil 56. S_A için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları



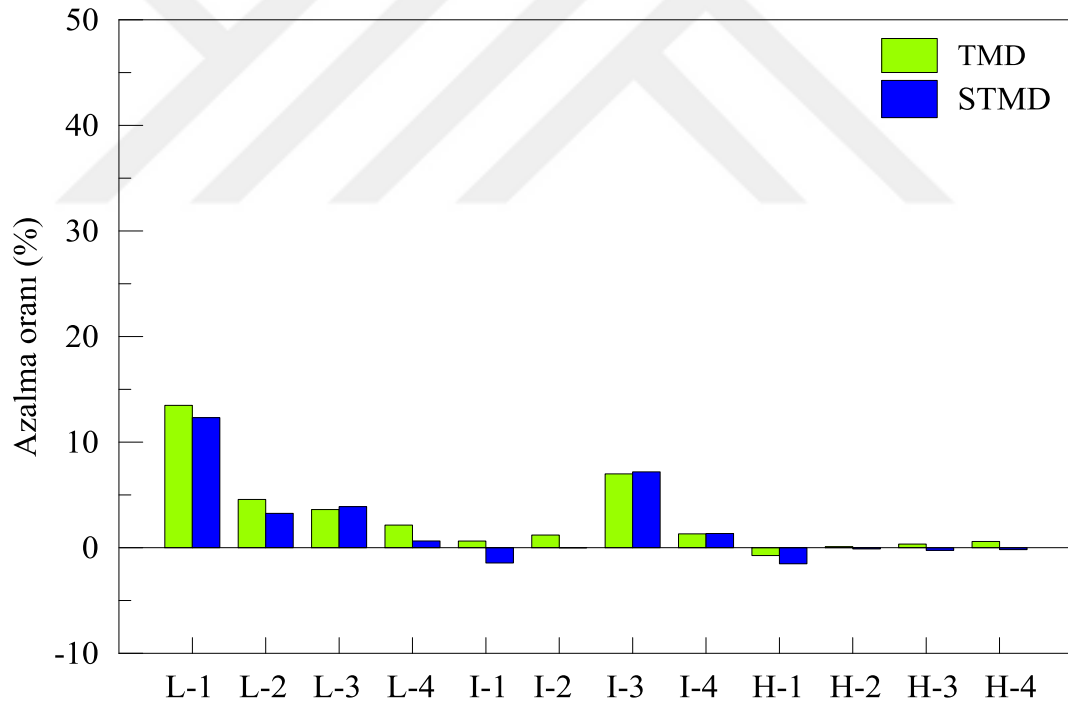
Şekil 57. S_B kabul için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları



Şekil 58. S_B için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları



Şekil 59. S_C için maksimum kat yer değiştirmelerindeki azalma oranları



Şekil 60. S_C için maksimum kat ivmelerindeki azalma oranları

Şekil 53-60'da etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için maksimum kat yer değiştirme ve ivme değerlerinde meydana gelen azalma oranları verilmiştir. Görüldüğü üzere, TMD ve STMD'nin kontrol performansı üzerinde yapı zemin etkileşimi ve depremin frekans içeriği önemli rol oynamaktadır.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak 10 katlı kesme tipi bir yapının dinamik tepkilerinin azaltılmasında SMTD'nin etkinliği araştırılmıştır. STMD nin kontrol performansı ayrıca geleneksel TMD ile karşılaştırılmıştır. Dinamik tepkilerin ve optimum parametrelerin elde edilmesinde rijit kabulun yanı sıra üç farklı zemin türü dikkate alınmıştır. TMD ve STMD'ye ait optimum parametreler, Matlab programında yer alan ga fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Bu fonksiyon, optimum parametrelerin elde edilmesinde genetik algoritmayı (GA) kullanmaktadır. Çalışmadan çıkarılan önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Düşük frekans içeriğine sahip depremler hem yer değiştirme hem de ivme tepkilerinde önemli bir artışa sebep olmaktadır. Yüksek frekans içeriğine sahip depremler ise orta frekans içeriğine sahip depremlere göre çoğunlukla daha düşük dinamik tepkiler meydana getirmektedir.
- Rijit mesnetlenme durumu için elde edilen yapısal periyot değerleri yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla birlikte artma eğilimi göstermektedir. Meydana gelen bu artış zemin rijitliğindeki azalmayla birlikte daha büyük değerlere ulaşmaktadır.
- Zemin rijitliğindeki azalma hem TMD'nin hem de STMD'nin optimum rijitlik ve sönüm değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır.
- STMD içerisindeki 1. TMD için optimum sönüm değeri hem etkileşimli hem de etkileşimsiz durum için sıfır elde edilmektedir. Buna karşın 2. TMD'nin optimum sönüm değeri zemin rijitliğindeki artışla birlikte azalma eğilimi göstermektedir.
- STMD içerisindeki her iki TMD'nin optimum rijitlik değerleri zemin rijitliğindeki azalmayla birlikte artmaktadır.
- STMD içerisindeki 1. TMD'nin kütlesi 2. TMD'nin kütlesine göre daha büyük elde edilmektedir. Kütleler arasındaki oran yaklaşık olarak 4'e karşılık gelmektedir.
- Maksimum yer değiştirme tepkileri STMD kullanılarak rijit durum için ortalama %24.4, S_A için %24.3, S_B için %27.3 ve S_C için %15.6 azaltılmaktadır. Maksimum ivme tepkileri ise STMD kullanılarak rijit durum için ortalama %11.7, S_A için

%12.8, S_B için %9.6 ve S_C için %2.1 azaltılmaktadır. Bu sonuçlardan STMD'nin en düşük kontrol performansının S_C zemin sınıfı için elde edildiği görülmektedir.

- Maksimum yer değiştirme değerlerinde STMD kullanılarak elde edilen en büyük azalma oranı rijit durum için H-1 deprem kaydında %51.9, S_A için H-1 deprem kaydında %56.7, S_B için I-4 deprem kaydında %47.5 ve S_C için I-4 deprem kaydında %43.3'dür.
- Maksimum ivme değerlerinde STMD kullanılarak elde edilen en büyük azalma oranı rijit durum için L-2 deprem kaydında %38.3, S_A için H-1 deprem kaydında %46.2, S_B için L-2 deprem kaydında %39.9 ve S_C için L-1 deprem kaydında %12.3'dür.
- Yapı-zemin etkileşimi STMD'nin kontrol performansının değişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örnek olarak, H-1 deprem kaydı altında elde edilen en büyük ivme değeri STMD kullanılarak S_A için %46.2 azaltılırken S_B için %1.9 azaltılmaktadır.
- STMD'nin kontrol performansı üzerinde yapı-zemin etkileşiminin yanı sıra deprem kayıtlarının frekans içerikleri de önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, dikkate alınan deprem kayıtları için elde edilen kontrol performansları arasında önemli farklılıklar meydana gelmektedir.
- Optimum parametreler deprem kayıtlarından bağımsız olarak elde edildikleri için bazı deprem kayıtları için kontrollü durumda elde edilen dinamik tepkilerin kontrolsüz durumdakilere göre fazla olduğu görülmektedir. Aradaki fark en fazla %1.5 olarak elde edilmiştir.
- STMD ve TMD'nin kontrol performansları ele alındığında her iki sistemin de yaklaşık olarak benzer etkinliğe sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, STMD iki farklı frekansa göre ayar edildiği için TMD'ye göre daha geniş frekans aralığında etkili olmaktadır. Bu nedenle, olası frekans sapması durumunda STMD'nin TMD'ye göre daha etkili performans göstereceği söylenebilir.
- Bu çalışma kapsamında, orta katlı yapıları temsil etmek üzere 10 katlı bir yapı ele alınmıştır. Bu nedenle, STMD'nin yüksek katlı yapılar üzerinde ne denli bir performans göstereceğini ön görmek hayli güçtür. Bunun için benzer analizlerin yüksek kat sayısına sahip bir yapı için yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Anh, N. D., Nguyen, N. X. ve Hoa, L. T. (2013). Design of three-element dynamic vibration absorber for damped linear structures. *J. Sound Vib.*, 332, 4482-4495.
- Anh, N. D., Nguyen, N. X. ve Quan, N. H. (2016). Global-local approach to the design of dynamic vibration absorber for damped structures. *Journal and Vibration Control*, 22, 1-20.
- Araz, O. (2020). Effect of detuning conditions on the performance of non-traditional tuned mass dampers under external excitation. *Arch. Appl. Mech.*, 90, 523-532.
- Araz, O. ve Kahya, V. (2018). Effects of manufacturing type on control performance of multiple tuned mass dampers under harmonic excitation. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 1, 117-27.
- Araz, O. ve Kahya, V. (2020). Series tuned mass dampers in control of continuous railway bridges. *Struct. Eng. Mech.*, 73, 133-141.
- Araz, O., Ozturk, K. F. ve Cakır, T. (2022). Effect of different objective functions on control performance of tuned mass damper for a high-rise building considering soil–structure interaction. *Archive of Applied Mechanics*, 92, 1413-1429.
- Asami, T. ve Nishihara, O. (2002). H₂ optimization of the three-element type dynamic vibration absorbers. *J. Vib. Acoust.*, 124, 583-592.
- Bekdaş, G., Kayabekir, A. C., Nigdeli, S. M. ve Toklu, Y. C. (2019). Transfer function amplitude minimization for structures with tuned mass dampers considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 552-562.
- Bekdaş, G., Nigdeli, S. M. ve Yang, X. S. (2018). A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures. *Engineering Structures*, 159, 89-98.
- Bakre, S. V. ve Jnagid, R. S. (2007). Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structural Control and Health Monitoring*, 14, 448-470.
- Bandivadekar, T. P. ve Jangid, R.S. (2013). Optimization of multiple tuned mass dampers for vibration control of system under external excitation. *J. Vib. Control.*, 19, 1854-1871.
- Cetin, H., Aydin, E. ve Ozturk, B. (2019). Optimal design and distribution of viscous dampers for shear building structures under seismic excitations. *Frontiers in Built Environment*, 5, 1-13.

- Chen, G. ve Wu, J. (2001). Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 127, 1054-1062.
- Cheung, Y. L. ve Wong, W. O. (2011). H₂ optimization of a non-traditional dynamic vibration absorber for vibration control of structures under random force excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 330, 1039-1044.
- Den Hartog, J. P. (1956). *Mechanical Vibrations*, Dover, New York.
- Frahm, H. (1909). *Device for Damped Vibration of Bodies*. U.S. Patent No. 989958.
- Ghosh, A. ve Basu B. (2004). Effect of soil interaction on the performance of tuned mass dampers for seismic applications. *Journal of Sound and Vibration*, 274, 1079-1090.
- Hadi, M. N. S. ve Arfadi, Y. (1998). Optimum design of absorber for MDOF structures. *J. Struct. Eng.*, 124, 1272-1280.
- Jabary, R. N. ve Madabhushi, G. S. P. (2017). Tuned mass damper positioning effects on the seismic response of a soil-MDOF-structure system. *J. Earthq. Eng.*, 2017, 1-22.
- Jangid, R. S. (1999). Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 28, 1041-1049.
- Joshi, A.S. ve Jangid, R. S. (1997). Optimum parameters of multiple tuned mass dampers for base-excited damped systems. *J. Sound Vib.*, 202, 657-667.
- Kahya, V. ve Araz, O. (2017). Series tuned mass dampers in train-induced vibration control of railway bridges. *Structural Engineering and Mechanics*, 61, 453-461.
- Kahya, V. ve Araz, O. (2019). A sequential approach based design of multiple tuned mass dampers under harmonic excitation. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37, 225-239.
- Kamgar, R., Khatibinia, M. ve Khatibinia, M. (2019). Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil-structure interaction effect. *Int. J. Optim. Civil Eng.*, 9, 213-232.
- Kaveh, A. ve Ardebili, S. R. (2021). A comparative study of the optimum tuned mass damper for high-rise structures considering soil-structure interaction. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65, 1036-1049.
- Khoshnoudian, F., Ziaei, R., Ayyobi, P. ve Paytam, F. (2017). Effects of nonlinear soil-structure interaction on the seismic response of structure-TMD systems subjected to near-field earthquakes. *Bull. Earthq. Eng.*, 15, 199-226.

- Li, C. (2002). Optimum multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 897-919.
- Li, C. ve Liu, Y. (2003). Optimum multiple tuned mass dampers for structures under ground acceleration based on the uniform distribution of system parameters, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32, 671-690.
- Li, C. ve Zhu, B. (2006). Estimating double tuned mass dampers for structures under ground acceleration using a novel optimum criterion. *J Sound Vib*, 298, 280-297.
- Liu, K. ve Liu, J. (2005). The damped dynamic vibration absorbers: revisited and new result. *Journal of Sound and Vibration*, 284, 1181-1189.
- Mylonakis, G. ve Gazetas, G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?. *Journal of Earthquake Engineering*, 4, 277-301.
- Ormondroyd, J. ve Den Hartog, J.P. (1928). The theory of the dynamic vibration absorber. *Transactions of ASME Journal of Applied Mechanics*, 50, 9-22.
- Özsarıyıldız, Ş. S. ve Bozer, A. (2015). Finding optimal parameters of tuned mass dampers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24, 461-475.
- Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. ve Chung, R. M. (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 617-635.
- Salvi, J. ve Rizzi, E. (2015). Optimum tuning of tuned mass dampers for frame structures under earthquake excitation. *Structural Control and Health Monitoring*, 22, 707-725.
- Salvi, J. ve Rizzi, E. (2017). Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 67-80.
- Salvi, J., Pioldi, F. ve Rizzi, E. (2018). Optimum tuned mass dampers under seismic soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 576-597.
- Sladek, J. R. ve Klingner, R. E. (1983). Effect of tuned-mass dampers on seismic response. *J Struct Eng-ASCE*, 109, 2004-2009.
- Soheili, S., Zoka, H. ve Abachizadeh, M. (2021). Tuned mass dampers for the drift reduction of structures with soil effects using ant colony optimization. *Advances in Structural Engineering*, 24, 1-13.

- Tributsch, A. ve Adam, C. (2012). Evaluation and analytical approximation of Tuned Mass Dampers performance in an earthquake environment. *Smart Struct Syst*, 10, 155-79.
- Tso, W. K., Zhu, T. J. ve Heidebrecht, A. C. (1992). Engineering implications of ground motion A/V ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, 133-44.
- URL-1, <https://www.lisega.de/en/vibration-control-en/tuned-mass-dampers-tmd/>. 15 Mart 2022.
- URL-2, <http://www.gerb.in/index.php?id=517&MP=503-614>. 25 Mart 2022.
- Wolf, J. P. (1994). *Foundation vibration analysis using simple physical models*. New Jersey, Prentice-Hall.
- Xu, K. ve Igusa, T. (1992). Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies. *Earth Eng Struct Dyn*, 21, 1059-1070.
- Yuan, M., Liu, K. ve Sadhu, A. (2018). Simultaneous vibration suppression and energy harvesting with a non-traditional vibration absorber. *Journal Intelligent Material Systems and Structures*, 29, 1748-1763.
- Zuo, L. (2009). Effective and robust vibration control using series multiple tuned-mass dampers. *J Vib Acoust*, 131, 031003.

ÖZGEÇMİŞ

Feyza KABLAN Ortaöğrenimini 2013 yılında Yeşilırmak Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Aynı yıl Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde eğitimine devam ederek 2017 yılında mezun oldu. Lisans mezuniyetinin ardından inşaat sektöründe birçok özel projede kontrol mühendisi ve şantiye şefi olarak çalıştı. 2020 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Tezli Yüksek Lisans Programı'nda eğitimine başladı. Aynı zamanda 2021 yılında Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği alanında Tezsiz Yüksek Lisans eğitime devam etmektedir. Şu anda “Karayolları 7. Bölge Müdürlüğü Sınırları Dahilinde Bulunan Tokat ilindeki Muhtelif Yol Yapım Bünyesinde Yer Alan Tesviye İşleri, Sanat Yapıları, Alttemel, Plent-Miks Temel, Bitümlü Sıcak Karışım, Köprü, Viyadük, Tünel ve Çeşitli İşlerin Yapımı, Kontrollük ve Danışmanlık Hizmeti” işinde İnşaat Mühendisliği kadrosunda GÖZLEM MÜH. MÜT. PLAN. Ve TİC. A.Ş.'ye bağlı olarak çalışmaktadır.