KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

FARKLI AÇILARDA YER HAREKETLERİNE MARUZ BİNALARDA TİTREŞİM KONTROLÜ İÇİN AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Brahim Ahmat IDRISS

TEMMUZ 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

FARKLI AÇILARDA YER HAREKETLERİNE MARUZ BİNALARDA TİTREŞİM KONTROLÜ İÇİN AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Brahim Ahmat IDRISS

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 06 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 23 / 07 / 2025

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

"Farklı Açılarda Yer Hareketlerine Maruz Binalarda Titreşim Kontrolü İçin Ayarlı Sıvı Sönümleyici Sistemlerin Etkinliğinin İncelenmesi" isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda, Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyerek yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Hocalarım Prof. Dr. Ahmet Can ALTINIŞIK, Prof. Dr. Barış SEVİM, Prof. Dr. Murat Emre KARTAL ve Doç. Dr. Mustafa ASLAN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Volkan KAHYA'ya, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR'a, Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA'ya Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT'a, Arş. Gör. Algıhan KARAHASAN'a, İnş. Yük. Müh. Muhammed Cihat ŞAHİN'e, Arş. Gör. Zafer YILMAZ'a ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı çalışanlarına en kalbi duygularımla teşekkür ederim.

Bu çalışma için Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında maddi destek sağlayan KTÜ-Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, merhum babam Sayın Ahmat IDRISS'e, annem Sayın Batoul Mahamat NASSOUR'a ve her zaman maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyerek bugünlere gelmemde büyük payı olan kardeşlerime teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Brahim Ahmat IDRISS

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "Farklı Açılarda Yer Hareketlerine Maruz Binalarda Titreşim Kontrolü İçin Ayarlı Sıvı Sönümleyici Sistemlerin Etkinliğinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/07/2025

Brahim Ahmat IDRISS

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XIIIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Ayarlı Sıvı Sönümleyici (ASS) Sistemler 2
1.2. ASS Sistemlerin Çalışma Prensibi 4
1.3. ASS Sistemlerin Sınıflandırılması 6
1.4. Tezin Amacı 12
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 14
2.1. Model Bina ve Özelikleri 14
2.2. Model Binanın Sayısal ve Deneysel Dinamik karakteristikleri 17
2.3. ASS Sistemlerin Tasarımı 20
2.3.1. Dikdörtgen Ayarlı Sıvı Sönümleyici (DASS) 23
2.3.2. Silindir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (SASS) 24
2.3.3. Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (AKSS) 25
2.3.4. Halka Ayarlı Sıvı Sönümleyici (HASS) 27
2.3.5. 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS) 28
2.3.6. 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici* (4-AKSS*) 29
2.3.7. 3L-kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (3L-AKSS) 31
2.3.8. Halka Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (HAKSS) 32
2.3.9. Geniş Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (GAKSS). 33
2.3.10. Boru Bağlantılı Silındir Ayarlı Sıvı Sönümleyici 34
2.4. Sarsma Masası Deneyleri 36
2.4.1. Model Bina İçin Dinamik Sonuçlar 40
2.4.2. DASS için Dinamik Sonuçlar 47
2.4.3. SASS için Dinamik Sonuçlar 53

2.4.4. AKSS İçin Dinamik Sonuçlar 58
2.4.5. HASS İçin Dinamik Sonuçlar 63
2.4.6. 4-AKSS ve 4-AKSS* için Dinamik Sonuçlar 69
2.4.7. 3L-AKSS İçin Dinamik Sonuçlar 80
2.4.8. HAKSS İçin Dinamik Sonuçlar 85
2.4.9. GAKSS İçin Dinamik Sonuçlar 91
2.4.10. B-SASS İçin Dinamik Sonuçlar 97
2.4.11. Akışkan Sıvı Olarak Makine Yağı kullanılması İçin Dinamik Sonuçlar 102
3. SONUÇLAR 110
4. ÖNERİLER 112
5. KAYNAKLAR 113
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

FARKLI AÇILARDA YER HAREKETLERİNE MARUZ BİNALARDA TİTREŞİM KONTROLÜ İÇİN AYARLI SIVI SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİN ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Brahim Ahmat IDRISS

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN
2025, 118 Sayfa

Bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile farklı açılarda yer hareketlerine maruz binalarda titreşim kontrolü için ayarlı sıvı sönümleyici sistemlerin etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, orta ve / veya yüksek bir binanın dinamik davranışını temsil edebilecek model çelik bir bina tasarlanarak üretilmiştir. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin etkinliğinin incelenmesi amacıyla 10 farklı geometriye sahip sönümleyici tank sistemi model bina için tasarlanmış ve üretilmiştir. Yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunun temsil edilebilmesi için model bina; kendi ekseni doğrultusunda 15 derece artan açılarda döndürülerek, 3 adet farklı genlikli harmonik hareket ve 1992 Erzincan depremi yer hareketi kullanılarak sarsma masasında dinamik testlere tabi tutulmuştur. Farklı geometrilere sahip sönümleyici tanklarda akışkan olarak su ve makine yağı kullanılmıştır. Bu sayede akışkanın viskozitesinin titreşim kontrolündeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda; ayarlı sıvı sönümleyici sistemlerin titreşim kontrolünde oldukça etkin olduğu, binaların farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda sistemlerin tank geometrilerine bağlı etkinliklerinin değiştiği veya sabit kaldığı ve farklı viskoziteye sahip akışkanların sistemlerin etkinliklerini ayrıca değiştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ayarlı sıvı sönümleyici, Sarsma masası, Titreşim kontrolü

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF TUNED LIQUID DAMPERS FOR VIBRATION CONTROL IN BUILDINGS EXPOSED TO GROUND MOTIONS FROM DIFFERENT DIRECTIONS

Brahim Ahmat IDRISS

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Murat GÜNAYDIN
2025, 118 Pages

This thesis investigates the effectiveness of Tuned Liquid Damper systems for vibration control in buildings exposed to ground motions from various directions, using shake table experiments. A scaled steel model builidng was designed and constructed to represent the dynamic behavior of mid- to high-rise buildings. Ten damper tank systems with different geometries were developed and installed on the model to evaluate the performance of Tuned Liquid Damper. To simulate ground motions acting from different directions, the model building was rotated around its vertical axis in 15-degree increments and subjected to dynamic tests on a shake table using three harmonic excitations of varying amplitudes, as well as the ground motion record from the 1992 Erzincan earthquake. Water and machine oil were used as fluids in the tanks to assess the influence of fluid viscosity on vibration control. The results show that the systems are highly effective in mitigating structural vibrations. Moreover, the performance of the dampers varied or remained consistent depending on the tank geometry when the direction of ground motion changed. It was also observed that fluid viscosity plays a significant role in the overall effectiveness of the damping system.

Key Words: Tuned liquid damper, Shake table, Vibration control

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. ASS sistemlerin çalışma prensibi 3

Şekil 2. ASS sistemlerin gemilerde yalpa önleyici olarak kullanılması 4

Şekil 3. ASS sistemleri için analitik model 6

Şekil 4. Tek serbestlik dereceli sistemin ASS ve yapı ile şematik görünümü 6

Şekil 5. ASS sistemleri: (a) sığ ASS, (b) derin ASS ve (c) orta derinlikte ASS 8

Şekil 6. AKSS için alternatif geliştirilen sistemler 10

Şekil 7. Birleşik ayarlı sıvı sönümleyiciler: (a) ASÇS + AKSS sistem, (b) B-SASS sistem 11

Şekil 8. Model binaya ait bazı çizim detayları 15

Şekil 9. Labooratuvar ortamında inşa edilen çelik model bina 16

Şekil 10. Model binanın ön görülen dinamik kuvvetler etkisindeki yapısal performansı: (a) harmonik hareket ve (b) 1992 Erzincan depremi 16

Şekil 11. Model binanın sayısal doğal frekans değerleri ve mod şekilleri 18

Şekil 12. ÇTY için ivmeölçer yerleşim planı ve model bina üzerindeki ekipmanlar 19

Şekil 13. Model bina için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri 19

Şekil 14. Model binanın deneysel doğal frekans değerleri ve mod şekilleri 20

Şekil 15. Çalışma kapsamında tasarlanan ASS sistemler: (a) Dikdörtgen Ayarlı Sıvı Sönümleyici (DASS), (b) Silindir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (SASS), (c) Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (AKSS), (d) Halka Ayarlı Sıvı Sönümleyici (HASS), (e) 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS), (f) 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS*), (g) 3L Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (3L-AKSS), (h) Halka Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (HAKSS), (i) Geniş Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (GAKSS), (ı) Boru Bağlantılı Silindir Ayarlı Sönümleyici (B-SASS) 22

Şekil 16. DASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 24

Şekil 17. SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 25

Şekil 18. AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 26

Şekil 19. HASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 28

Şekil 20. 4-AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 29

Şekil 21. 4-AKSS* sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 31

Şekil 22. 3L-SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 32

Şekil 23. HAKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 33
Şekil 24. GAKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 34
Şekil 25. B-SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank 35
Şekil 26. Tek eksende en az 500 kN dinamik yatay kuvvet için hız-frekans grafiği 37
Şekil 27. Sarsma masasına ait bazı görünüşler 37
Şekil 28. Sarsma masasında uygulanan girdi (1992 Erzincan depremi- %50'si) ve çıktı arasında ölçülen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 37
Şekil 29. Sarsma masası deneylerinde kullanılan dinamik girdiler (yer hareketleri) 38
Şekil 30. Model binanın montajı ve kendi ekseni etrafında döndürülmesi 39
Şekil 31. Model binada oluşan dinamik kuvvetlerin bileşke kuvvetinin hesaplanması 39
Şekil 32. Model binanın ASS'siz durumu için sarsma masası deneyleri 41
Şekil 33. Model binanın ASS'siz durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 42
Şekil 34. ASS'siz durum için harmonik hareketler neticesinde maksimum ivmelerin farklı açılarda değişimi 46
Şekil 35. Model binanın DASS durumu için sarsma masası deneyleri 47
Şekil 36. Model binanın DASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 48
Şekil 37. DASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi 52
Şekil 38. Model binanın DASS durumu için sarsma masası deneyleri 53
Şekil 39. Model binanın SASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik 54
Şekil 40. SASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi 57
Şekil 41. Model binanın AKSS durumu için sarsma masası deneyleri 58
Şekil 42. Model binanın AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik 59
Şekil 43. AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi 62
Şekil 44. Model binanın HASS durumu için sarsma masası deneyleri 63

Şekil 45. Model binanın HASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 64

Şekil 46. HASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi 68

Şekil 47. Model binanın (a) 4-AKSS ve (b) 4-AKSS* durumları için masası deneyleri 70

Şekil 48. Model binanın 4-AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik 71

Şekil 49. Model binanın 4-AKSS* durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 74

Şekil 50. 4-AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi 78

Şekil 51. 4-AKSS* durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi 79

Şekil 52. Model binanın 3L-AKSS durumu için sarsma masası deneyleri 80

Şekil 53. Model binanın 3L-AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik 81

Şekil 54. 3L-AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi 84

Şekil 55. Model binanın HAKSS durumu için sarsma masası deneyler 85

Şekil 56. Model binanın HAKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 86

Şekil 57. HAKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi 90

Şekil 58. Model binanın GAKSS durumu için sarsma masası deneyler 91

Şekil 59. Model binanın GAKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi 92

Şekil 60. GAKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi 96

Şekil 61. Model binanın B-SASS durumu için sarsma masası deneyler 97

Şekil 62. Model binanın B-SASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik 98

Şekil 63. B-SASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi 101

Şekil 64. Model binanın HASS ve 4-AKSS* sistemlerde makina yağı kullanılması durumu için sarsma masası deneyler 103

Şekil 65. Model binanın HASS sisteminde makina yağı kullanılması durumunda yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi halinde ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, 9 mm genlik ve (c) Erzincan depremi 104

Şekil 66. Model binanın 4-AkSS* sisteminde makina yağı kullanılması durumunda yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi halinde ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, 9 mm genlik ve (c) Erzincan depremi 107

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Sayısal ve deneysel doğal frekans değerleri 20
Tablo 2. DASS sistem için bazı (*h/L*) oranları için tank özellikleri..... 23
Tablo 3. SASS sistem için bazı (*h/R*) oranları için tank özellikleri 25
Tablo 4. HASS sistemi için bazı (ξ_n)değerleri..... 27

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde farklı amaçlara hizmet eden çeşitli mühendislik yapıları inşa edilmektedir. Köprüler, barajlar, binalar, sanayi bacaları, tüneller ve stadyumlar bu yapıların başlıca olanlarıdır. Yapı mühendisliğin temel görevi yapıların maruz kalacağı statik ve dinamik kuvvetlere karşı yapı güvenliğini hedeflenen ölçüde sağlamaktır. Yapılarda oluşan hasarlar ve / veya göçmeler genellikle zamana bağlı değişen tersinir tekrarlı dinamik kuvvetler kaynaklıdır. Bu kuvvetler deprem, rüzgâr ve makine titreşimlerine bağlı oluşabilmektedir. Deprem kaynaklı dinamik kuvvetler şüphesiz en tehlikeli ve yıkıcı olanlarıdır. Dolayısıyla yapıların dinamik kuvvetlere karşı korunması ve oluşabilecek yıkıcı etkilerin azaltılması ihtiyacı doğmaktadır.

Günümüzde; artan nüfus, kısıtlı arazi alanları ve ticari gelişmelere paralel olarak orta ve / veya yüksek katlı binalara olan gereksinim giderek artmaktadır. Bu aşamada gelişen inşa teknolojileri ve kullanılan yapı malzemeleri sayesinde bu binalar inşa edilebilmektedir. Bu yapılar insanların yoğun olarak bulunduğu ve önem derecesi yüksek sistemlerdirler. Ayrıca bu binalar yapısal özellikleri gereği (rijitlik, periyot ve sönüm özellikleri gibi) deprem ve rüzgar gibi dinamik etkiler kaynaklı titreşimlere daha duyarlıdır. Titreşim sonucunda, yapılarda çatlak ve mikro çatlaklarda sürtünme oluşması, malzemelerin zorlanması ve akma göstermesi gibi mekanizmalar aracılığıyla enerji sönümlenir. Bu süreçte, yapının çevreden aldığı mekanik enerji ısı ve ses enerjisine dönüştürülerek ortama yayılır. Ancak, yapının titreşimi güvenlik veya kullanılabilirlik açısından izin verilen sınırların üzerine çıktığında, yapısal titreşimleri sınırlamak amacıyla ek bir sönümleme cihazı gereksinimi olabilmektedir.

Dinamik kuvvetlerin meydana getirdiği titreşimlerin azaltılması (sönümlenmesi) ve yapı güvenliğinin artırılması amacıyla bazı koruma sistemleri (sönümleyiciler) geliştirilmiştir. Bunlar;

- Pasif kontrol sistemleri
- Aktif kontrol sistemleri
- Yarı aktif kontrol sistemleridir
- Karma kontrol sistemleri

olarak sınıflandırılabilir.

Pasif kontrol sistemleri enerji kaynağı gereksinimi olmadan yapılara yerleştirilen ve maliyetleri yapı maliyeti ve aktif kontrol sistemlerine kıyasla düşük sistemlerdir. Bu

sistemler; sismik izolatörler (taban yalıtım sistemleri), ayarlı kütle sönümleyiciler, ayarlı sıvı sönümleyiciler, viskoelastik sönümleyiciler, metalik sönümleyiciler ve sürtünme tipi sönümleyiciler şeklinde sıralanabilir.

Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetlerinin uygulanabilmesi için harici enerji kaynağı gereksinimi vardır. Bu sistemlerde yapıya dışarıdan etki edebilecek kuvvetler belirlenir ve bu kuvvetlerin etkisini azaltacak kontrol kuvvetleri hesaplanır ve bu kuvvetler bazı mekanizmalar yardımıyla yapıya uygulanır. Aktif sistemler, dışarıdan enerji beslemesi ve bilgisayar kontrollü geri besleme mekanizmaları ile çalışır. Sensörlerden alınan veriler, kontrol üniteleri tarafından işlenir ve aktüatörler yardımıyla yapıya karşı kuvvet uygulanarak titreşimler azaltılır.

Dinamik etki esnasında sönüm ve rijitlikleri kontrol edilebilen, enerji ihtiyacı aktif sistemlere kıyasla düşük olan sistemler yarı aktif sistemler olarak adlandırılır. Bu sistemler pasif ve aktif kontrolün bir kombinasyonudur. Bu sistemler elektrik ya da manyetik alana duyarlı sıvılar içermektedir (MR sönümleyiciler gibi).

Karma sistemlerde pasif, aktif ve yarı aktif kontrol yöntemleri bir arada kullanılarak daha etkili bir sönümleme elde edilir. Özellikle yüksek binalar ve köprülerde, farklı dinamik etkilerle başa çıkmak için hibrit çözümler geliştirilmiştir. Bu sistemler büyük enerji gereksiniminden yoksun çalışabilmekte, aktif sistemler için gerekli enerjinin sağlanamaması durumunda ise pasif sistem ile dahi koruma sağlanabilmektedir (Aldemir ve Aydın, 2005).

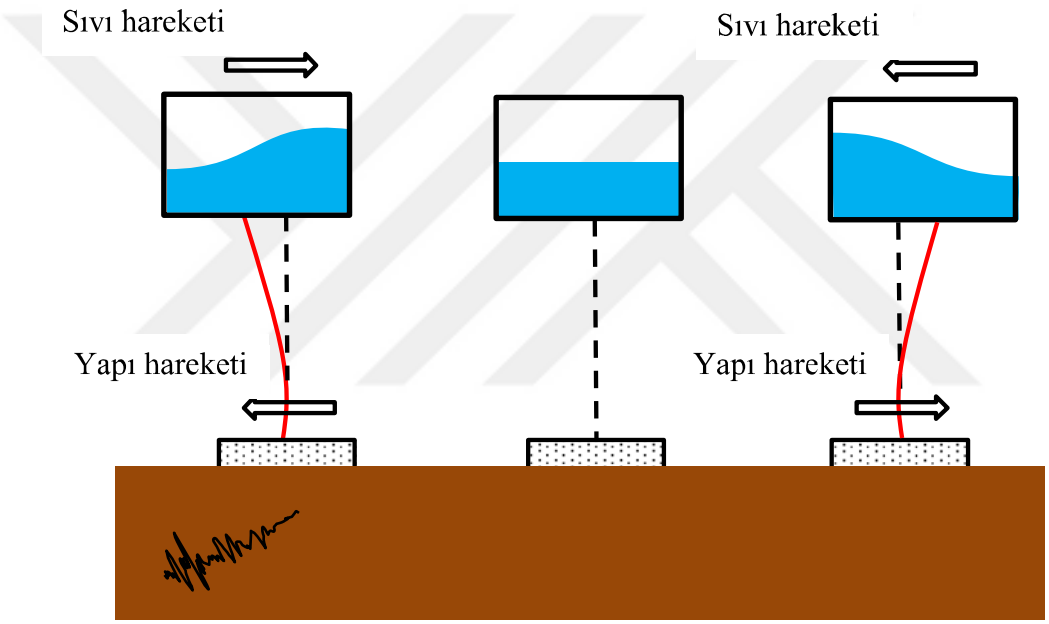
1.1. Ayarlı Sıvı Sönümleyici (ASS) Sistemler

ASS sistemler; titreşimlerden kaynaklanan yapısal tepkileri azaltmak ya da sönümlemek amacıyla kullanılan, basit tasarımlı, düşük maliyetli ve az bakım gerektiren, titreşim kontrolünü farklı geometrilere sahip tanklar içerisindeki sıvının hareketinin sağladığı atalet kuvveti ile gerçekleştiren ve genellikle yapıların tepesine konumlandırılan pasif kontrol cihazlarıdır.

ASS bir tank içerisindeki sıvının (çoğunlukla su veya benzeri düşük viskoziteli akışkanlar) çalkalanma hareketlerinden yararlanarak yapıda ilave sönüm oluşturan sistemlerdir. Kısmen dolu bir tankın salınımına bağlı su yüzeyinde oluşan dalga hareketi "çalkalanma" olarak tanımlanır. Şekil 1'de görüleceği üzere yapı yanal titreşim ya da ivmelere maruz kaldığında tank içerisindeki su, tankın bir tarafında yükselirken diğer tarafında alçalır ve dalga hareketi oluşturur. Daha sonra tankın yüksek kısmı alçalır, alçak

kısmı ise yükselerek dalga hareketi devam eder. Bu sistemlerde, sıvının serbest yüzey hareketi yapısal titreşimlerden kaynaklanan enerjiyi alarak dalgalanma ve/veya dalga kırılması şeklinde harcar. Böylece, yapının aldığı mekanik enerji ısı ve türbülans gibi farklı enerji formlarına dönüşür ve çevreye yayılır.

Bilindiği üzere yapılar doğal frekans değerlerine bağlı titreşim (salınım) hareketi yaparlar. Doğal frekans değerleri yapının kütle ve rijitliğine bağlı değişmektedir. Dalga hareketinin (çalkalanmasının) tankın geometrisi ve boyutları, su yüksekliği ve yerçekimi ivmesi bağlı doğal frekans değeri hesaplanabilmektedir. Etkin sönüm için ASS sistemin doğal frekans değerinin yapı hakim doğal frekans değerine ayarlanması gerekmektedir.



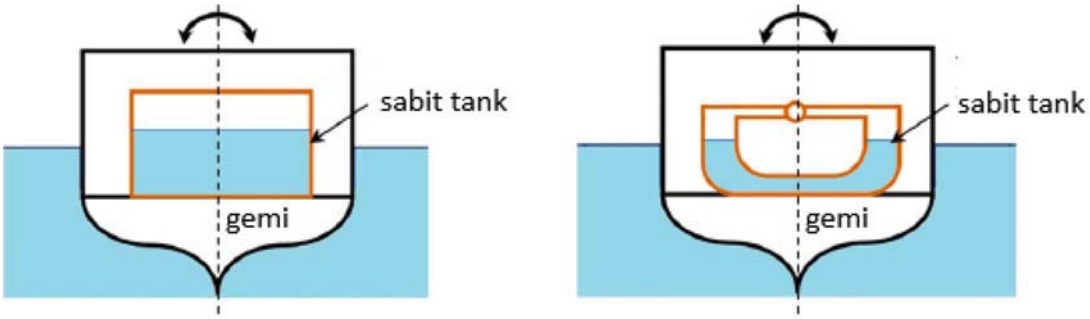
Şekil 1. ASS sistemlerin çalışma prensibi

ASS sistemler; titreşimlerden kaynaklanan yapısal tepkileri azaltmak ya da sönümlemek amacıyla kullanılan, düşük maliyetli ve az bakım gerektiren sistemler olup orta ve / veya yüksek katlı binalarda ve kulelerde (Noji vd., 1991; Tamura vd., 1992; Teramura vd., 1996; Tamura, 1998; Kareemt vd., 1999; Li vd., 2002; Das vd., 2017; Wang vd., 2021; Ocak vd., 2022; Shah & Usman, 2022), sanayi bacalarında (Marulli & Moutinho, 2024), uzun açıklıklı köprülerde (Modi & Welt, 1988; Kitazawa vd., 1992; Fujino vd., 1993; Reiterer & Ziegler, 2006; Nakamura & Fujino, 2002), rüzgar türbinlerinde (Colwell & Basu, 2009; Jeon et al., 2013; Ghaemmaghami vd., 2013; Ghaemmaghami vd., 2016; Park vd.,

2020; Zuo vd., 2020; Awada vd., 2021), ve açık deniz platformlarında (Vandiver & Mitome, 1979; Jin vd., 2007; Hua & Juang, 2012; Zeng vd., 2015) kullanılabilmektedir.

1.2. ASS Sistemlerin Çalışma Prensibi

Titreşim kontrolünde sıvı hareketinin kullanılmasına ilişkin kavram 19. yüzyıla kadar uzanmakta olup, ilk olarak gemilerde yalpa önleyici tanklarda uygulanmıştır (Froude, 1861; Watts, 1883) (Şekil 2). Bu tasarımlar, daha sonra inşaat mühendisliğinde kullanılan çalkalanma temelli sönümleme prensiplerinin temelini oluşturmuştur. Ayarlı Sıvı Sönümleyici (ASS) sistemlerin yapısal titreşim kontrolünde kullanımı ise özellikle 1970'li yıllarda hız kazanmış, 1978'te Vandiver ve Mitome tarafından gerçekleştirilen ve açık deniz platformlarına yerleştirilen tankların çalkalanma davranışını inceledikleri öncü çalışma bu alandaki gelişmelere yön vermiştir. Bu çalışmalardan kısa süre sonra Sayar ve Baumgarten (1981, 1982) tarafından akışkan davranışını anlamak için doğrusal olmayan modeller geliştirilirken Lee ve Reddy (1982) tarafından damper ayarını optimize etmek için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



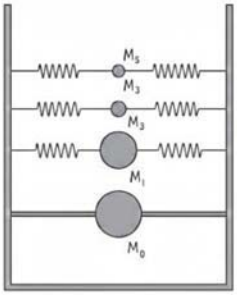
Şekil 2. ASS sistemlerin gemilerde yalpa önleyici olarak kullanılması
(Konar ve Ghosh, 2023 çalışmasından uyarlanmıştır)

1980 ve 1990'lı yıllarda ASS sistemler için yapılan araştırmalar genişlemiştir. Bauer (1984) tarafından içerisinde birbirine karışmayan iki sıvı bulunan dikdörtgen bir tank sönümleyici önermiştir. Kareem ve Sun (1987), Fuzino vd. (1988) tarafından tank içerisindeki sıvının çalkalanma dinamiği ve ASS sistemlerin rüzgar ve sismik kuvvetler etkisindeki etkinlikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmişlerdir. Bu dönemlerde Sun vd. (1992) sıvı çalkalanması ve dalga kırılması olaylarının enerji sönümlenmesinde etkinliğinin araştırılması amacıyla kısmen doldurulmuş tanklar üzerinde araştırmalar yapmaya

başlamıştır. 1990'lı yıllar ve 2000'li yılların başı, sönümleme mekanizması olarak delikler aracılığıyla meydana gelen yerçekimi kaynaklı yük kaybını kullanan Ayarlı Sıvı Kolon Sönümleyiciler (ASKS) gibi alternatif ASS türlerinin gelişimine sahne olmuştur (Saoka vd.,1988; Sakai vd., 1989; Sun vd., 1992; Xu vd., 1992).

ASS'lerin sönümleme yeteneklerini artırmak amacıyla, akış sönümleme ekipmanları etkinliği irdelenmiştir. Bu cihazlar arasında tank içi ağlar (Kaneko ve Ishikawa, 1999; An vd., 2019), tank için engeller (Tait, 2008), tank için bölmeler (Anderson et vd., 2000a-b) ve yüzeyde yüzen nesneler (Tamura vd., 1992) yer almaktadır. Ayrıca, enerji dağılımını artırmak, yapı frekansına etkin ayarlama ve karmaşık mimari ortamlardaki sönümleyicilerin uyum yeteneğini geliştirmek için çeşitli tank geometrileri (dikdörtgen, dairesel, U şeklinde, halka ve kombinasyonları) (Sakai vd., 1991; Watkins, 1991; Hitchcock vd., 1997a-b; Reiterer ve Ziegler, 2006; Patil ve Singh, 2016; Rozas vd., 2016; Altunışık vd., 2018; Cao, 2020; Love vd., 2020; Mehrkian ve Altay, 2020; Ding vd., 2021; Vafaei vd., 2021) farklı akışkan sıvılarla (çamurlu su, şeker suyu, aseton, yağ, manyetik sıvı vb.) (Abe vd., 1997; Savada vd., 1999; Horie vd., 2007; Das ve Choudhury, 2017; Ocak vd., 2022) irdelenmiştir.

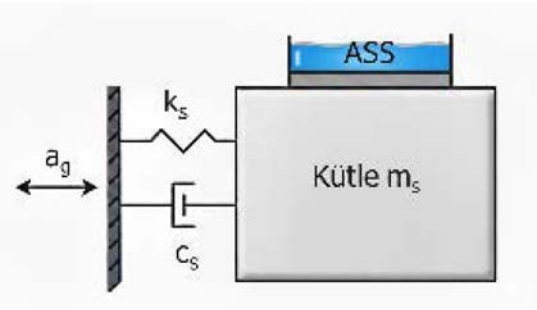
Ayarlı sıvı sönümleyicilerin analitik modeli; çalkalanma yapan kısım kütle yay modeli ile, durağan kısım ise tanka rijit bağlı kütle ile temsil edilebilmektedir (Şekil 3). Üzerinde ASS ile tek serbestlik dereceli bir yapı (Şekil 4), deprem gibi bir yer hareketine maruz kaldığında sistem için dinamik hareket denklemi Denklem (1) ile ifade edilebilir. Denklemde m_s , k_s ve c_s sırasıyla yapının kütle, sönüm ve rijitliğini, u_s yapının zemine göre rölatif yer değiştirmesini, a_g yer ivmesini ve F, ASS içerisindeki sıvının çalkalanması nedeniyle meydana gelen taban kesme kuvvetini ifade etmektedir. Denklem (1) yapı kütlesine göre Denklem (2) gibi düzenlenebilir. Burada; $\omega_s=2\pi/T_s$ ve ξ_s sırasıyla yapısal doğal frekans ve sönüm oranını, T_s ise doğal periyodu ifade eder. ASS'nin oluşturduğu F taban kesme kuvveti tank içerisindeki sıvının hareket denkleminin çözümü ile hesaplanır (Housner, 1954; Banerji vd., 2000).



Şekil 3. ASS sistemleri için analitik model (Housner, 1954)

$$m_s\ddot{u}_s + c_s\dot{u}_s + k_s u_s = -m_s a_g + F \tag{1}$$

$$\ddot{u}_s + 2\xi_s\omega_s\dot{u}_s + \omega_s^2 u_s = -a_g + \frac{F}{m_s} \tag{2}$$



Şekil 4. Tek serbestlik dereceli sistemin ASS ve yapı ile şematik görünümü

1.3. ASS Sistemlerin Sınıflandırılması

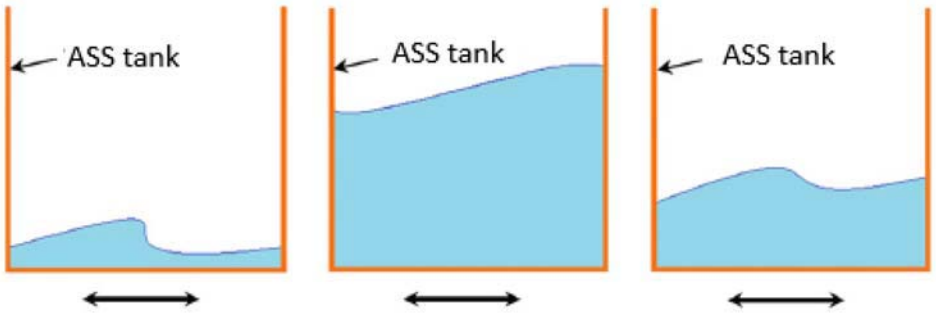
Genel olarak ASS sistemleri enerjiyi sönümleme durumlarına bağlı 5 gruba ayrılabilir: *(i)* ayarlı sıvı çalkantılı / dalgalanmalı sönümleyiciler (ASÇS) (tuned sloshing dampers), *(ii)* ayarlı kolon sıvı sönümleyiciler (tuned liquid column dampers), *(iii)* birleşik (ayarlı sıvı çalkantılı sönümleyiciler + ayarlı kolon sıvı sönümleyiciler) (combined (tuned sloshing dampers + tuned liquid column dampers) sıvı sönümleyiciler, *(iv)* adaptasyonlu sıvı sönümleyiciler (compliant liquid dampers) *(v)* tank içerisinde batık ayarlı sarkaç sönümleyiciler (liquid damper with submerged tuned oscillator).

Ayarlı sıvı çalkantılı sönümleyicilerde sıvı çalkantısı tank yüzeylerinde viskoz tabakalar oluşur. Tabakalar enerji kaybı yaratarak salınım hareketinin sönümlenmesine katkı sağlar. Ayrıca büyük genlikli salınımlar sırasında zaman zaman dalga kırılması meydana gelebilir. Bu olay, türbülans oluşumuna ve dolayısıyla enerji kaybının artmasına neden olur,

böylece sönümleme etkisi daha da güçlenir. Ek sönümleme sağlamak amacıyla, tanka akış sönümleme cihazları (flow damping devices - FDD) yerleştirilebilir. Bu yapılar, çalkalanan sıvı ile etkileşime girerek kinetik enerjiyi emer ve salınım genliklerini azaltır. Ayarlı kolon sıvı sönümleyicilerde (AKSS) salınım yapan sıvının deliklerden geçişi, türbülanslı girdapların oluşmasına neden olur ve bu durum viskoz enerji kayıplarına yol açar. Zaman zaman, sönümleme etkisini artırmak amacıyla, akış sönümleme elemanları (flow damping devices - FDD) salınım yapan sıvının hareket yönü boyunca yerleştirilir. Birleşik sıvı sönümleyiciler hem ayarlı çalkalanma sönümleyiciler hem de ayarlı kolon sıvı sönümleyicilerin çalışma mekanizmasını barındırır. Bu iki mekanizma eşzamanlı olarak etkinleşebileceği gibi, uyarının belirli bir asal eksen boyunca uygulanması durumunda yalnızca bir mekanizma aktif hale gelirken, diğer eksen boyunca diğer mekanizma etkin olabilir. Adaptasyonlu sıvı sönümleyiciler, sönümleyici içerisindeki sıvı, sönümleyici konfigürasyonuna bağlı olarak rezonans dışı salınım veya sıvı salınımı yoluyla enerji sönümleme mekanizmasına katılır. Sıvı salınımı durumunda, sönümleme mekanizması ayarlı çalkalanma sönümleyicilerde olduğu gibi gerçekleşir. Buna karşılık, sıvı salınımı yerine sıvı kolonunun ileri-geri salınımı söz konusu olduğunda, sönümleme mekanizması ayarlı kolon sıvı sönümleyicilere benzer şekildedir. Ayrıca, sönümleyici haznesi ile birincil yapı arasındaki bağlantıda bulunan yay elemanına paralel olarak genellikle bir harici sönümleme elemanı kullanılır. Tank içerisinde batık ayarlı sarkaç sönümleyicilerde, sarkaç etkisi, tank içerisindeki sıvıda akış düzensizliği, kayma akışı ve türbülans akışı oluşumuna neden olarak enerji sönümlenmesine neden olur.

ASS sistemlerden, ayarlı sıvı çalkantılı sönümleyiciler (ASÇS) genellikle dikdörtgen, silindir, halka ve küre geometrisinde tank ile sığ, orta sığ ve derin su yüksekliklerine bağlı (oluşan dalganın karakteristiğine bağlı olarak) tasarlanabilmektedir. Halka geometrisi özellikle baca gibi silindir geometrilere sahip sistemler için uygun olabilmektedir. Sığ bir ASÇS'de, titreşim enerjisi, ilerleyen salınım dalgalarının (traveling sloshing waves) oluşumuna neden olur; bu dalgalar, dalga dikleşmesi veya dalga kırılması gibi fiziksel olgular sergiler. Bu durum, ilerleyen dalgaların tepe noktalarındaki parçacıkların, alt kısımdaki parçacıklara göre daha yüksek hızla ileri doğru hareket etmesi sonucu meydana gelir. Bu koşul, Saint-Venant denklemleri ya da doğrusal olmayan sığ su dalga denklemleri ile ifade edilir. Bu durumda d/B (su yüksekliği / çap - genişlik) oranı genellikle 0.1-0.12 arasındadır. Öte yandan, yatay yönde uyarılan derin bir ASÇS, temel modda duran salınım dalgaları (standing sloshing waves) üretir. Derin ASS'lerde d/B oranı 0.5'ten büyüktür ve

tank haznesinin tabanı yakınında herhangi bir dalga hareketi gözlenmez. Buna karşılık, 0.1 < d/B < 0.5 aralığında olan ASÇS, orta derinlik olarak sınıflandırılabilir; bu durumda, titreşim sırasında geçiş (transisyonel) dalgaları oluşur. (Şekil 5) (Konar ve Ghosh, 2023).



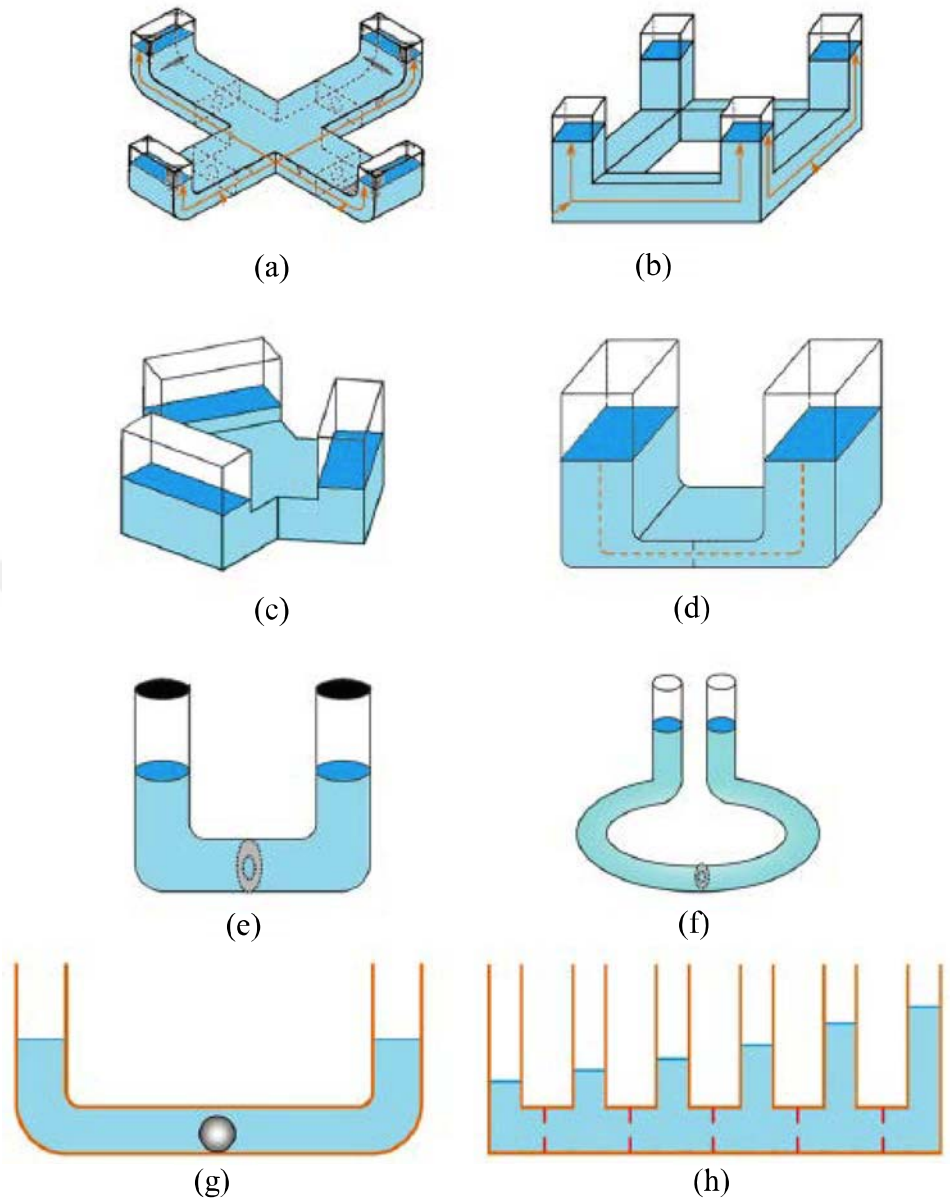
(a) (b) (c)

Şekil 5. ASS sistemler: (a) sığ ASS, (b) derin ASS ve (c) orta derinlikte ASS (Konar ve Ghosh, 2023 çalışmasından uyarlanmıştır)

Bir ASÇS'nin doğal sönümleme kapasitesi, d/B oranına bağlıdır. d/B oranı arttıkça, ASS'nin doğal sönümleme oranı azalır ve d/B > 0.5 olduğunda, yani ASS derin ASS konumuna geldiğinde, asimptotik bir değere ulaşır. Ayrıca, B değerinin artmasıyla birlikte, ASÇS'nin enerji sönümleme kapasitesi de azalmaktadır. Bu durum uygulamada ASÇS'lerin tek bir tank yerine birden çok daha küçük tanklar ile yerinde uygulamasını gerektirir. Örneğin Tokyo Uluslararası Havalimanı kulesinde 1404 adet dairesel kesitli (B= 0.6, d/B= 0.088) ASS kullanılmıştır (Tamura vd., 1995). Diğer ASÇS türlerine kıyasla daha yüksek doğal sönümleme kapasitesine sahip olmalarına rağmen, sığ ASÇS'lerin yapısal titreşim kontrol elemanları olarak kullanılması durumunda çok sayıda haznenin yerleştirilmesi ve tasarlanan sıvı seviyesinin korunması pratik açıdan zorluklar doğurmaktadır. Ayrıca, sığ ASÇS'lerin yüksek genlikli yatay uyarılara verdiği tepki belirgin biçimde doğrusal olmayan bir davranış sergiler ve bu durum, bu tür sönümleyicilerin yapı tasarımına entegrasyonu açısından uygulama güçlüklerine yol açmaktadır (Konar ve Ghosh, 2023). Orta derinlikte ASÇS'lerde, d/B oranının artmasıyla birlikte doğrusal olmayan davranışın derecesi azalır. Ancak, görece yüksek d/B oranı nedeniyle bu tür ASÇS'lerin doğal sönümleme kapasitesi daha düşüktür. Bu durum, orta derinlikte ASÇS'lerde akış sönümleme elemanlarının (FDD) kullanılmasını gerekli kılar. FDD'ler, salınım yapan sıvı ile hidrolik etkileşim yoluyla ASS içindeki enerji sönümlemesini artırmak üzere özel olarak tasarlanmış eklentilerdir (Konar ve Ghosh, 2023). Ayrıca, orta derinlikte veya derin ASÇS'ler FDD ile birlikte tasarlandığında, ASÇS'nin doğal sönümlemesi, FDD'nin sağladığı sönümlemeye kıyasla ihmal edilebilir

düzeyde olduğu için genellikle hesaplamalarda dikkate alınmaz. Yaygın olarak kullanılan FDD örnekleri arasında ağ yapılar (nets) bulunmaktadır. Bu manada askıda yüzen elemanlar, bölmeler veya engeller (örneğin, York Place of Wanchai, Hong Kong, 152 metre kulede rüzgar kontrolü için kullanılan ASÇS'de, 8.45 m x 5.43 m, d/B = 0.227, iki adet engel kullanılmıştır) ayrıca kullanılabilmektedir.

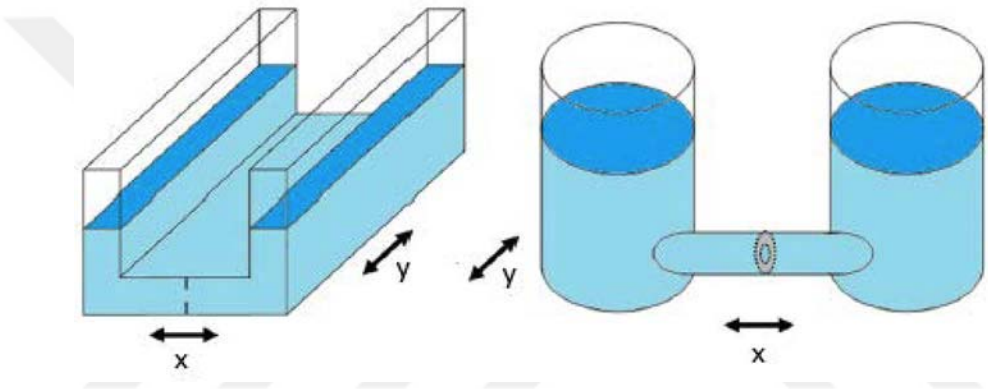
Ayarlı kolon sıvı sönümleyiciler (AKSS) kısmen sıvı ile doldurulmuş U şeklinde bir hazneden oluşur. Bu sistem, yatay yönde bir uyarıya maruz kaldığında, hazne içindeki sıvı kolonunda salınım hareketi oluşturur (Saoka vd., 1988; Sakai vd., 1989). Sıvı kolonunun salınım frekansı, yapının baskın titreşim frekansına ayarlanarak, ayarlı kolon sıvı sönümleyici titreşim kontrol elemanı olarak etkin biçimde kullanılabilir. AKSS'de enerji sönümlemesi, sıvının doğal yük kaybı özelliklerine sahip deliklerden (orifis) geçişi sırasında gerçekleşir. Orifisin yük kaybı katsayısı, açıklık oranı (Φ) olarak adlandırılan ve orifisin kesit alanının, U şeklindeki haznenin kesit alanına oranı şeklinde tanımlanan büyüklüğe bağlıdır. AKSS'lerin ayarlı çalkalanma sönümleyicilere göre; *(i)* sıvı hacmi verimliliği, *(ii)* farklı uyarım genliklerinde daha tutarlı olma, *(iii)* sönümleme mekanizmasının açık ve tutarlı olması ve doğrudan hesaplanabilmesi ve *(iv)* sıvı kolon yüksekliği değiştirilerek AKSS'nin doğal frekansının kolaylıkla ayarlanabilir olması gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel AKSS sistemlerinin iki temel sınırlaması bulunmaktadır. Birincisi, geleneksel AKSS'nin etkinliği (sönüm etkisi) tek yönlüdür; oysa yatay düzlemdeki yapı tasarımlarının, rüzgâr veya deprem gibi en az iki doğrultuda etki eden uyarılara karşı koyabilecek şekilde yapılması gerekir. İkincisi, geleneksel AKSS doğası gereği uzun periyotlu bir sistemdir; bu nedenle, görece kısa periyotlu (örneğin 2 saniyenin altındaki) yapılara ayarlanmak istendiğinde, tasarım gereği sıvı kolonunun uzunluğu pratik olarak uygulanamayacak kadar büyük olabilmektedir (Corte vd., 2007). Bu sınırlamaları gidermek amacıyla farklı geometrilerde ve farklı kol sayısına sahip bazı alternatif sistemler veya çeşitli varyasyonlar, sistemin her iki doğrultudaki performansını artırmak ve mimari uyum kabiliyetini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 6'da geliştirilen alternatif sistemeler sunulmaktadır. Bu geliştirilmiş türler, AKSS teknolojisinin daha etkin, uyarlanabilir ve mühendislik açısından uygulanabilir hale gelmesini sağlamıştır.



Şekil 6. AKSS için alternatif geliştirilen sistemler: (a) 4 kollu ayarlı kolon sıvı sönümleyici (4-AKSS) (bi-directional TLCD suggested by Sakai et al., 1991), (b) 4 kollu ayarlı kolon sıvı sönümleyici* (4-AKSS*) (bi-directional TLCD suggested by Rozas et al., 2016), (c) 3L kollu ayarlı kolon sıvı sönümleyici (3L-AKSS) (omnidirectional TLCD with 3L-shaped limbs, very recently proposed by Mehrkian and Altay, 2020), (d) geniş kollu ayarlı kolon sıvı sönümleyici (GAKSS) (liquid column vibration absorber (LCVA)), (e) kapalı AKSS, (f) dairesel AKSS, (g) bilyalı ayarlı kolon sıvı sönümleyici ve (h) çok kollu ayarlı kolon sıvı sönümleyici (Konar ve Ghosh, 2023 çalışmasından uyarlanmıştır)

Birleşik (ASÇS + AKSS) sıvı sönümleyiciler tank içerisindeki sıvının hem çalkalanma (sloshing) hem de osilasyon - salınım (oscillatory motion) hareketleri aracılığıyla enerji sönümlemesi yapabilmesini sağlar. Sistemin tasarımına bağlı olarak, birleşik bir sistem düzeninde bulunan sıvı, her iki hareket türünü eşzamanlı olarak sergileyebilir ya da uyarının

belirli bir yönde uygulanması durumunda yalnızca salınım veya osilasyon hareketlerinden birini gösterebilir. Bu tür birleşik sistemler arasında, AKSS ve ASÇS sistemi ve boru bağlantılı silindir ayarlı sıvı sönümleyici (B-SASS) (tank – pipe damper (T-P damper) bulunmaktadır (Şekil 7). Bu sistemler, her iki sönümleme mekanizmasını bir araya getirerek, titreşim kontrolünde daha geniş bir frekans aralığında etkin enerji sönümlemesi sağlamaktadır. Her iki sistemde yapıların iki yönlü (bi-directional) titreşim tepkilerini kontrol etmek için uygundur. Ancak, her iki sistemin x ve y ana yönleri dışındaki herhangi bir yönden uyarılması durumundaki davranışını inceleyen araştırmalara henüz rastlanılmamıştır.



Şekil 7. Birleşik ayarlı sıvı sönümleyiciler: (a) ASÇS + AKSS sistem, (b) B-SASS sistem (Konar ve Ghosh, 2023 çalışmasından uyarlanmıştır)

Yapısal sönümleme kapasitesini artırmak amacıyla ASS'lerin yapısal uygulamaları ilk olarak 1980'lerin ortalarında Japonya'da başlatılmıştır. O tarihten bu yana ASS'ler, binalar, köprüler, kuleler ve bacalar gibi çeşitli gerçek yapı sistemlerine yerleştirilerek titreşim tepkilerinin azaltılmasında kullanılmıştır. Bununla birlikte, çok sayıda farklı ASS türü geliştirilmiş olmasına rağmen, gerçek uygulamalarda kullanılan ASS tipleri esas olarak dört ana kategoriyle sınırlı kalmıştır: *(i)* sığ derinlikli ASÇS, *(ii)* orta derinlikli ASÇS, *(iii)*, klasik AKSS ve *(iv)* iki yönlü AKSS. Diğer tüm ASS türleri halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Konar ve Ghosh (2023), ASS sistemlerinin gerçek mühendislik yapılarında uygulamalarına ait önemli bir derleme sunmuşlardır. Özetle; bina, köprü, kule veya baca gibi farklı yapı türlerinde uygulandığı, Japonya (yoğun kullanım alanı), Kanada (2000'li yıllarda sonra artan kullanım), Amerika, Çin (2000'li yıllardan sonra artan kullanım) gibi ülkelerdeki uygulama örnekleri olduğu, genellikle sığ ASÇS, orta derinlikte ASÇS, klasik AKSS veya çift yönlü AKSS sistemleri kullanıldığı, yapının üst kat veya çatı seviyelerini

konumlandırıldıkları, rüzgar veya deprem kuvvetlerini sönümlemek için tercih edildikleri, bazı durumlarda tek ASS yerine birden çok küçük ASS sistemlerin kullanıldığı, yeni nesil ASS'lerin (iki yönlü AKSS) sınırlı sayıda uygulaması olduğu, genellikle dikdörtgen ya da silindir geometriye sahip tank geometrileri kullanıldığı tespit edilmiştir. ASS tasarımı üzerine yapılan çalışmaların ana odağı, sönümleyici performansını artırmak ve optimum tasarım parametrelerini belirlemektir. Birçok araştırma, kütle oranı, ayar oranı ve sönüm oranı gibi temel parametrelerin etkisini incelemiştir. Buradaki ana amaç, bu üç parametre için optimum kombinasyonu bulmak ve yapının doğal frekansına en uygun ayarı sağlamaktır. Bu çalışmalar genellikle sayısal analiz veya deneysel modeller üzerine kuruludur (Sakai vd., 1989; Kareem vd., 1999; Banerji vd., 2000, Konar ve Ghosh, 2010; Pandey vd., 2019, Vázquez-Greciano vd., 2024). Fakat birçok çalışma dinamik etkinin tek doğrultuda etkimesi altında gerçekleştirilmiştir. Oysa gerçek yapılar farklı açılarda dinamik etkilere maruz kalabilir. Birçok önerilen ASS sistemin (örneğin, 4-AKSS, 4-AKSS*, 3L-AKSS gibi) dinamik davranışı hâlâ yeterince farklı dinamik kuvvetler etkisinde araştırılmamış ve / veya test edilmemiştir.

1.4. Tezin Amacı

ASS sistemleri yapı titreşimlerinin kontrolünde düşük maliyetli, kolay kurulum ve pasif çözümler sunmaları nedeniyle son yıllarda yoğun biçimde araştırılmıştır. Yapılan çalışmaların büyük bir bölümü, sönümleyici performansını artırmak amacıyla temel tasarım parametrelerinin optimizasyonu, farklı geometrik konfigürasyonların değerlendirilmesi ve deneysel doğrulama üzerine odaklanmıştır. ASS'lerin çoğu çalışması, yalnızca tek yöndeki (x veya y, ASS'nin efektif çalışma doğrultusunda) dinamik hareketler etkisinde sistemlerin etkinliğini ele almıştır. Ancak gerçek yapıların rüzgâr ve deprem yükleri genellikle çok yönlü ve farklı açılarda etkiyebilme etkilerine sahiptir. Literatür incelemeleri, çift yönlü ve çok yönlü titreşim kontrolü amacıyla geliştirilen çeşitli ASS sistemlerinin, farklı açılarda etki eden yer hareketleri altında etkinliklerinin değerlendirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı ve yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla, farklı açılarda etki eden yer hareketleri altındaki ASS sistemlerinin etkinliğinin araştırılması gelecekteki çalışmalar için önemli bir gerekliliktir.

Literatüre katkı sağlaması amaçlanan bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler aracılığıyla, farklı açılardan etki eden yer hareketlerine maruz

binalarda titreşim kontrolü için ASS sistemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Bu tez üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, konuya ilişkin genel bilgiler ele alınmakta, önceki çalışmalar özetlenmekte ve çalışmanın önemi vurgulanmaktadır. İkinci bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır: Birinci kısımda, model bina özellikleri, ASS sistemlerinin tasarım esasları ve ASS sistemlerinin tasarım süreci detaylandırılmıştır. İkinci kısımda ise sarsma masası deneyleri ve bu deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve öneriler yer almaktadır. Tez, kaynakça ve özgeçmiş bölümleriyle tamamlanmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

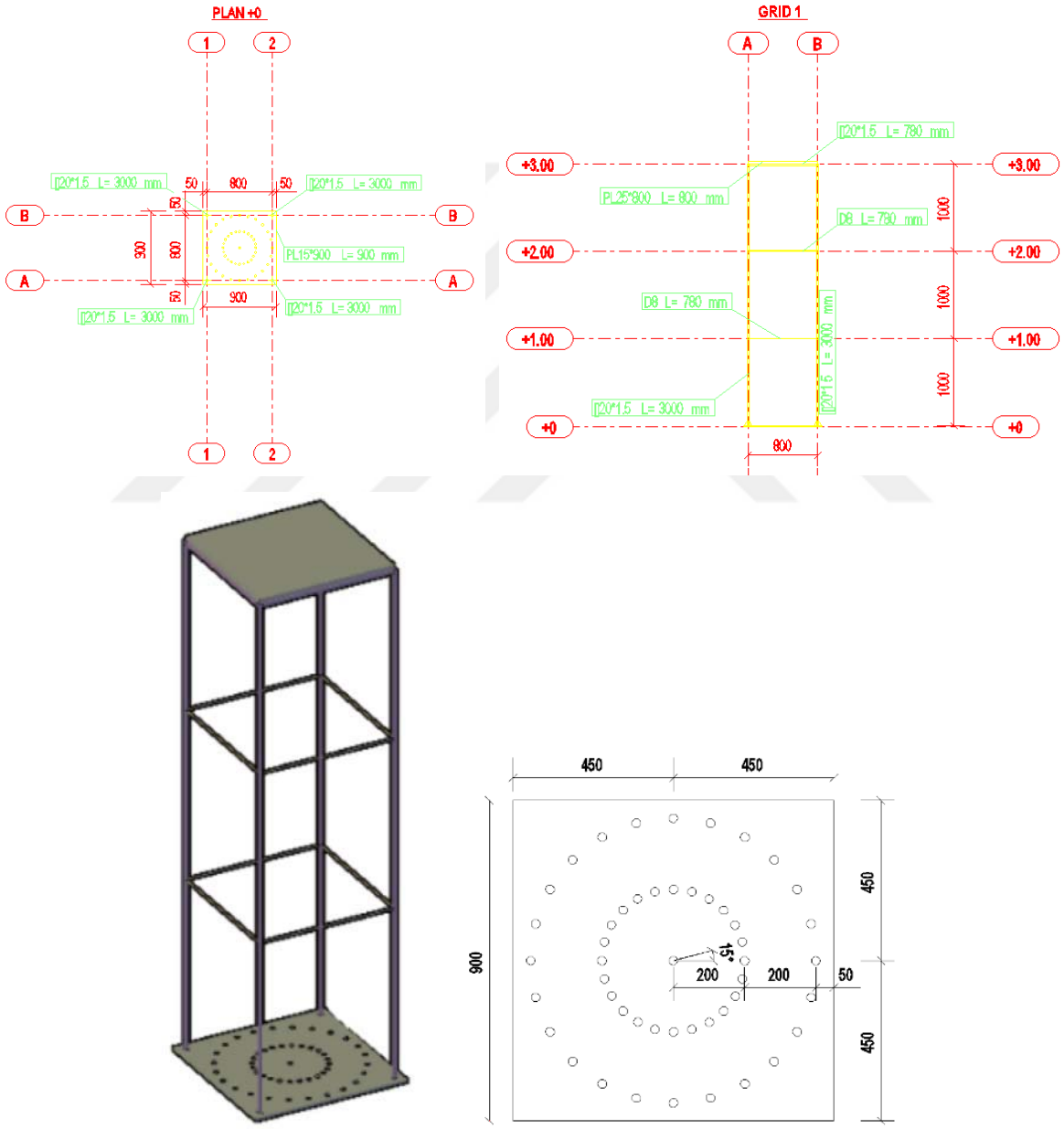
Bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler aracılığıyla farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalan binalarda titreşim kontrolü için ayarlı sıvı sönümleyici sistemlerin etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, orta ve/veya yüksek katlı bir binanın dinamik davranışını temsil edebilecek model çelik bir bina tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin etkinliğini incelemek amacıyla, 10 farklı geometriye sahip sönümleyici tank sistemleri model bina için tasarlanmış ve üretilmiştir. Yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunu temsil edebilmek için model bina, kendi ekseni doğrultusunda 15°'lik artışlarla döndürülerek; üç farklı genlikteki harmonik hareket ve 1992 Erzincan depremine ait yer hareketi kullanılarak sarsma masasında dinamik testlere tabi tutulmuştur. Farklı geometrilere sahip sönümleyici tanklarda akışkan olarak su ve makine yağı kullanılmış; böylece akışkanın viskozitesinin titreşim kontrolündeki etkisi ayrıca incelenmiştir.

Bu bölümde model bina özellikleri, ASS sistemlerinin tasarım esasları ve ASS sistemlerinin tasarım süreci detaylandırılmıştır. Ayrıca sarsma masası deneyleri ve bu deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve irdelenmiştir.

2.1. Model Bina ve Özellikleri

Farklı tip 10 adet ASS sistemlerin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kaldıklarında etkinliklerinin araştırılması amacıyla laboratuvar ortamında çelik model bir bina inşa edilmiştir. Model binanın orta ve /veya yüksek katlı bir binanın dinamik davranışını temsil edebilecek nitelikte olması hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, taşıyıcı elemanların boyutlarının ve model kütlesinin belirlenmesinde etkili olmuştur. Bina modeli (Şekil 8), üç katlı ve her iki doğrultuda tek açıklıklı çelik bir çerçeveden oluşmaktadır (0.80 x 0.80 x 3.0 m; genişlik x derinlik x yükseklik). Model, kutu kesitli kolonlar (20 x 20 x 1.5 mm) ve kiriş elemanlar (Ø8 mm) kullanılarak imal edilmiştir (Şekil 9). Modelin taban ve tavan seviyesi rijit bir kare çelik plaka ile (900 x 900 x 25 mm) sabitlenmiştir. Bina her iki doğrultuda aynı rijitliğe sahip olması için kolonları kare kesitli seçilmiştir. Bu sayada atalet etkilerinden kaynaklı sonuçların değişimi engellenmiştir. Hedeflenen dinamik davranışın sağlanması amacıyla ilave kütle sağlaması açısından tavanda iki adet plaka konumlandırılmıştır. Binanın farklı

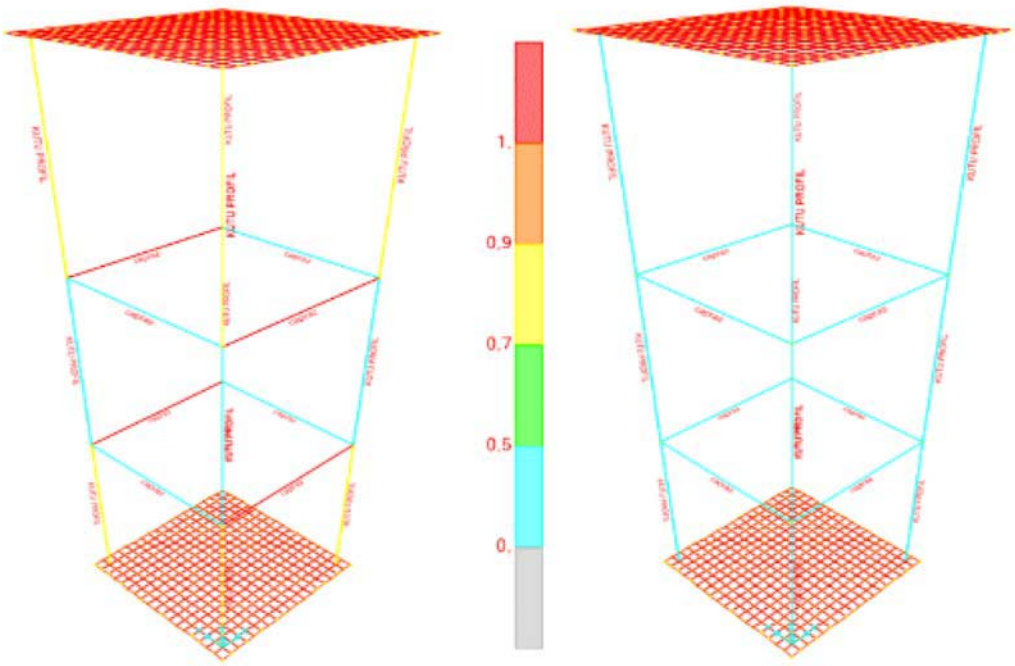
açılarda yer hareketlerine maruz kalabilmesi için model tabanındaki rijit plakada 15°'lik açılarda dairesel Ø20 çapında boşluklar (yiv) açılmıştır. Bu sayede model bina 15°'lik artan açılarda sarsma masası üzerinde 360° (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150° ve 165° 180°) döndürülebilmiştir. Taban plakası dahil model binanın toplam ağırlığı 172 kg'dır. Model bina sarsma masası deneylerinde kullanılacak 3 adet harmonik hareket ve 1992 Erzincan depremini karşılayacak kesitlerde üretilmiştir (Şekil 10).



Şekil 8. Model binaya ait bazı çizim detayları



Şekil 9. Laboratuvar ortamında inşa edilen çelik model bina



Şekil 10. Model binanın ön görülen dinamik kuvvetler etkisindeki yapısal performansı :(a) harmonik hareket ve (b) 1992 Erzincan depremi

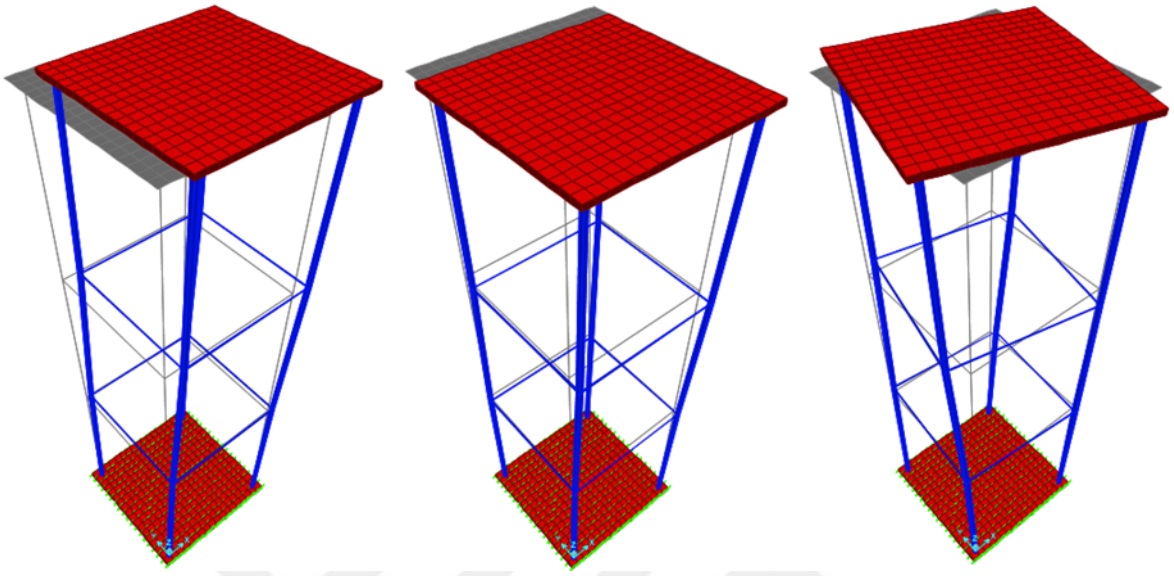
2.2. Model Binanın Sayısal ve Deneysel Dinamik Karakteristikleri

Yapıların dinamik davranışları sayısal ve / veya deneysel olarak hesaplanan dinamik karakteristiklere bağlıdır. Yapı dinamik karakteristikleri doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranlarıdır. Sayısal dinamik karakteristikler (doğal frekans ve mod şekli) Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile belirlenebilmektedir. Sayısal doğal frekanslar ve mod şekilleri, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu kapsamda SEY ile modal analizler gerçekleştirilir. Deneysel dinamik karakteristikler ise doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı) Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi ile belirlenebilmektedir. DMA yöntemi kendi içerisinde Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY) ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Model binanın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde SEY yöntemi ve ÇTY kullanılmıştır. ÇTY yapıların dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla, çevresel veya işletme koşullarından kaynaklanan düşük genlikli titreşimlerin ölçülmesine dayanan deneysel bir yöntemdir. Bu yöntem, yapıya herhangi bir yapay titreşim girişi uygulanmaksızın; rüzgâr, trafik, insan hareketi veya yer kabuğu titreşimleri gibi doğal çevresel etkiler altında oluşan ivme yanıtlarının kaydedilmesi esasına dayanır. Elde edilen ölçümler, yapıların doğal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri gibi temel dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. ÇTY'nin en önemli avantajı, yapıya zarar vermeden veya ek bir yükleme yapılmadan dinamik tepkinin ölçülebilmesidir. Uygulama sürecinde, yapının belirli noktalarına yerleştirilen ivmeölçer sensörleri aracılığıyla zaman tanım alanında ivme verileri toplanır ve bu veriler genellikle frekans ortamında ayrıştırılarak yapının doğal frekans mod şekli ve sönüm oranları belirlenir. Bu sayede, yapıların mevcut durumlarının izlenmesi, hasar tespiti ve model iyileştirmesi gibi mühendislik çalışmaları için güvenilir bir temel sağlanır.

Model binanın dinamik davranışı orta ve /veya yüksek katlı bir binanın dinamik davranışını temsil edebilecek nitelikte olması amaçlanmış ve binanın hakim periyot değerinin 1.5- 2.0 saniye civarında olması hedeflenmiştir. Bu yaklaşımda mevcut sarsma masanın kapasitesi ve laboratuvar ortamının fiziki koşulları kısıtlayıcı olmuştur.

Sayısal dinamik karakteristikler için binanın sonlu elemanlar modeli SAP2000 (SAP2000, 2015) sonlu elemanlar paket programında oluşturulmuştur. Model binanın modal analizi sonucunda ilk üç moda ait elde edilen sayısal doğal frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 11'de verilmektedir. Model bina için ilk üç doğal frekans değeri sırasıyla 0.59 Hz ve

1.40 Hz olarak hesaplanmıştır. Mod şekilleri ise ötelenme ve burulma modu olarak elde edilmiştir.

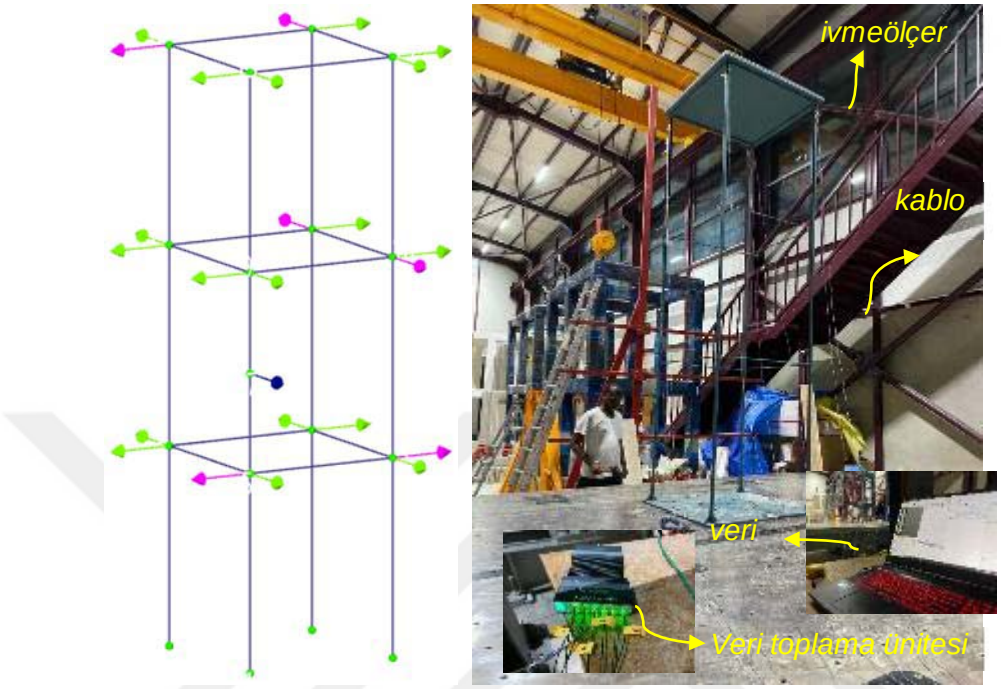


f_1=0.59 Hz f_2=0.59 Hz f_3=1.40 Hz

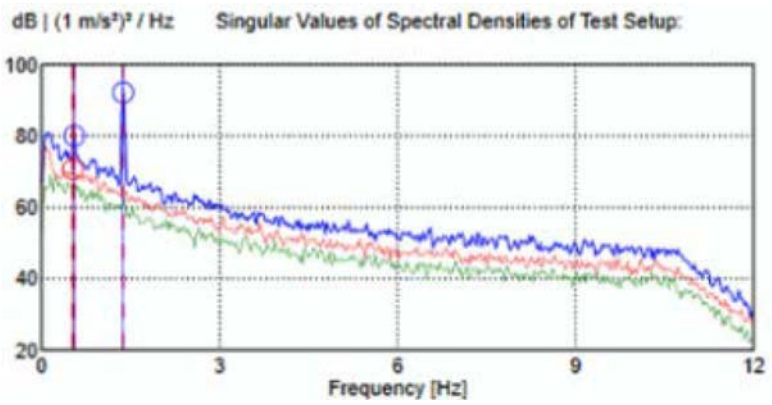
Şekil 11. Model binanın sayısal doğal frekans değerleri ve mod şekilleri

Model binanın deneysel dinamik karakteristiklerinin ÇTY ile elde edilmesi amacıyla; 12 kanallı B&K 3053 veri toplama sistemi, 9 adet B&K4507 tek eksenli ivmeölçer (1 V/g hassasiyette ve 0.3-6000 Hz frekans aralığında) ve tek eksenli sinyal kabloları kullanılmıştır. Ölçüm esnasında frekans aralığı 0-12 Hz seçilmiş ve toplam 15 dakika boyunca model üzerinden ivme verileri toplanmıştır. Veriler, BK Connect (2021) yazılımı aracılığıyla işlenmiş ve dinamik karakteristikler, OMA (Operational Modal Analysis) yazılımı (2021) kullanılarak Geliştirilmiş Frekans Alanı Ayrıştırma (GFOA) (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) yöntemiyle (Peeters, 2000) elde edilmiştir. Şekil 12'de bina modeli üzerindeki ivmeölçer yerleşimini, OMA yazılımındaki temsilî modeli ve OMA testi sırasında alınan görüntüyü göstermektedir. Şekil 13 GFOA yöntemiyle elde edilen spektral yoğunlukların tekil değerlerini göstermektedir. İlk üç deneysel mod şekli ve bunlara karşılık gelen doğal frekanslar ise Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'ten görülebileceği üzere, elde edilen ilk üç mod öteleme ve burulma modlarıdır. Ayrıca, ilk üç doğal frekans sırasıyla 0.53 Hz, 0.54 Hz ve 1.38 Hz olarak hesaplanmıştır. Tablo 1'den görüleceği üzere sayısal ve deneysel dinamik karakteristikler arasında güçlü bir uyum gözlenmiştir. Bu durum, ayarlı

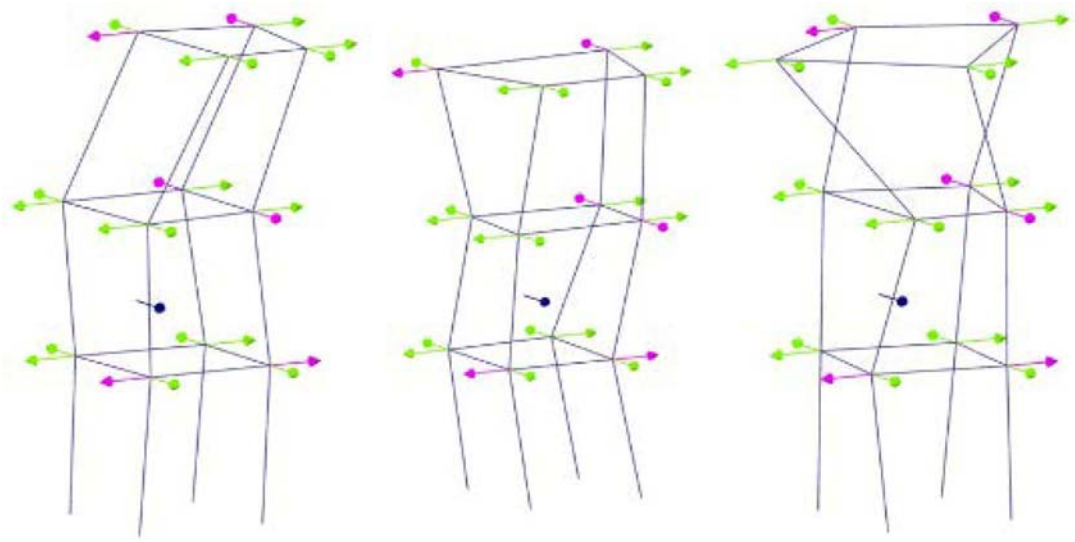
Sıvı Sönümleyici (ASS) tasarımının bina modelinin birinci baskın frekansına etkili bir şekilde ayarlanabileceğini doğrulamaktadır.



Şekil 12. ÇTY için ivmeölçer yerleşim planı ve model bina üzerindeki ekipmanlar



Şekil 13. Model bina için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



f_1=0.53 Hz f_2=0.54 Hz f_3=1.38 Hz

Şekil 14. Model binanın deneysel doğal frekans değerleri ve mod şekilleri

Tablo 1. Sayısal ve deneysel doğal frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)	
	Sayısal	Deneysel
1	0.59	0.53
2	0.59	0.54
3	1.40	1.38

2.3. ASS Sistemlerin Tasarımı

ASS sistemlerin tasarımı beklenen yükleme koşulları altında sönümleyicinin en iyi performansı göstermesini sağlamayı amaçlar. Bu hedef, belirli uygulama sınırları içinde, üç temel karakteristik parametrenin; kütle oranı, ayar oranı ve sönüm oranının en uygun değerlerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilir. Genel olarak kütle oranı (mass ratio), sönümleyicinin etkin kütlesinin yapının toplam kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır. ASS'nin etkin kütlesi, sistemin geometrik konfigürasyonuna bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, ASÇS'nin etkin kütlesi, sıvı kütlesinin birinci salınım moduna katılan kısmından oluşurken; geleneksel AKSS'nin etkin kütlesi, sönümleyici içindeki toplam sıvı kütlesine eşittir. Atalet temelli sönümleyicilerin performansı, kütle oranının artmasıyla birlikte önemli ölçüde iyileşmektedir. Optimum kütle oranı, sönümleyicinin konfigürasyonuna bağlı olmakla birlikte genellikle oldukça yüksek değerlere ulaşabilir

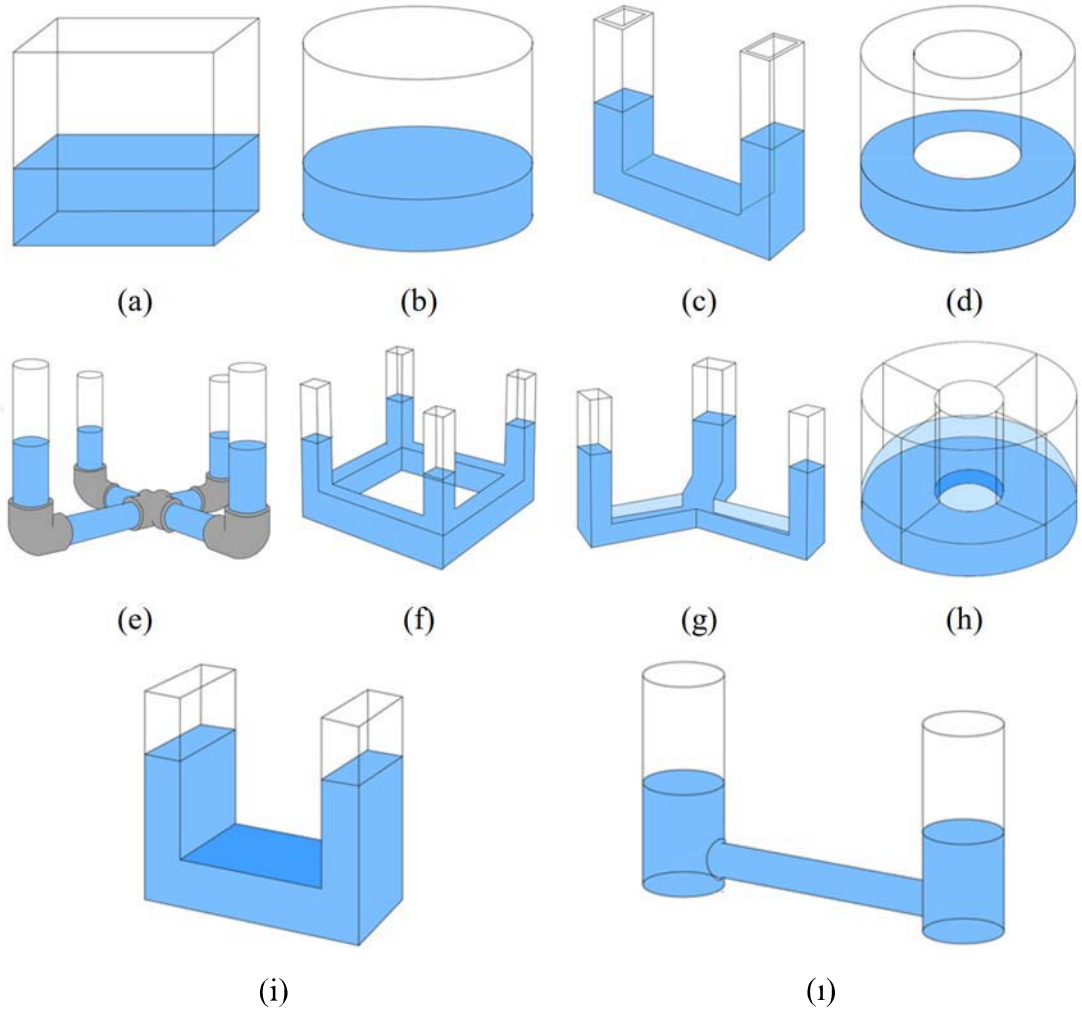
(örneğin %20'nin üzerine çıkabilmektedir) (Issa, 2013). İnşaat mühendisliği yapıları söz konusu olduğunda, genellikle yüksek kütle oranına sahip bir ASS'nin yerleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, yapıda mevcut alan sınırlamaları ve ek ölü yük artışı gibi kısıtlamalardır. Bu nedenle, ASS tasarımı sırasında kütle oranı genellikle çok daha düşük tutulmakta ve sönümleyicinin yapıya yerleştirilmesinin pratik uygulanabilirliği göz önünde bulundurularak belirlenmektedir Gerçek uygulamalarda kullanılan TLD'lerin tasarımında kütle oranı genellikle %1.5'in altında tutulmaktadır (Hitchcock vd., 1997a-b; Kaneko ve Ishikawa, 1999; Lago vd., 2019; Tamura vd., 1995; Konar ve Ghosh, 2023).

Sönümleyicinin frekansının kontrol edilmek istenen yapısal titreşim modunun frekansına oranı ayar oranı (tuning ratio) olarak tanımlanmaktadır. Farklı ASS konfigürasyonları için optimum ayar oranı değişiklik göstermekle birlikte, kütle oranının düşük ve yapısal sönümün zayıf olduğu durumlarda (bu koşullar inşaat mühendisliği yapılarında kullanılan sönümleyiciler için oldukça yaygındır) optimum ayar oranı genellikle 1'e yakın (0.94-1.04) değerlerde kalmaktadır.

Bir ASS'nin performansı, büyük ölçüde sönümleyicinin enerji sönümleme kapasitesine bağlıdır. Bu özellik, genellikle sönümleyiciye ait eşdeğer viskoz sönüm oranı kavramı ile ifade edilmektedir. Eğer sönümleyicinin sönüm oranı optimum değerden daha yüksek olursa, yapı ile sönümleyici arasındaki dinamik etkileşim azalır ve bu durum sönümleyicinin performansında düşüşe neden olur. Diğer yandan, ASS'nin sönüm oranı optimum değerin altında kaldığında, sönümleyici emilen enerjinin tamamını dağıtamaz. Bu durumda, sönümlenmemiş enerjinin bir kısmı yapıya geri aktarılır ve bu etkileşim sonucunda yapısal tepki içerisinde "beat" (çakışma) olayı olarak bilinen titreşim paternleri ortaya çıkar (Fujino vd., 1988; Konar ve Ghosh, 2023).

Bu bölüm kapsamında 10 adet farklı tip ASS sisteminin model bina için efektif tasarımı irdelenmiştir. Tasarımda model binanın tavan döşemesi boyutları, ASS sistemlerin tavan seviyesine konumlandırılması bakımından sınırlayıcı olmuştur (ASS sistemlerin boyutlandırılmasında model binaya geometrik olarak adaptasyonuna dikkat edilmiştir). Çalışma kapsamında tasarımı irdelenen ASS sistemler: Dikdörtgen Ayarlı Sıvı Sönümleyici (DASS), Silindir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (SASS), Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (AKSS), Halka Ayarlı Sıvı Sönümleyici (HASS), 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS), 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS*), 3L Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (3L-AKSS), Halka Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (HAKSS), Geniş Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (GAKSS), Boru Bağlantılı Silindir Ayarlı Sönümleyici (B-

SASS) şeklinde adlandırılmıştır (Şekil 15). Tasarlanan her bir tank 2.0 mm kalınlığında plexiglass plakalardan üretilmiştir.



Şekil 15. Çalışma kapsamında tasarlanan ASS sistemler: (a) Dikdörtgen Ayarlı Sıvı Sönümleyici (DASS), (b) Silindir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (SASS), (c) Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (AKSS), (d) Halka Ayarlı Sıvı Sönümleyici (HASS), (e) 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS), (f) 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS*), (g) 3L Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (3L-AKSS), (h) Halka Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (HAKSS), (i) Geniş Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (GAKSS), (ı) Boru Bağlantılı Silindir Ayarlı Sönümleyici (B-SASS)

2.3.1. Dikdörtgen Ayarlı Sıvı Sönümleyici (DASS)

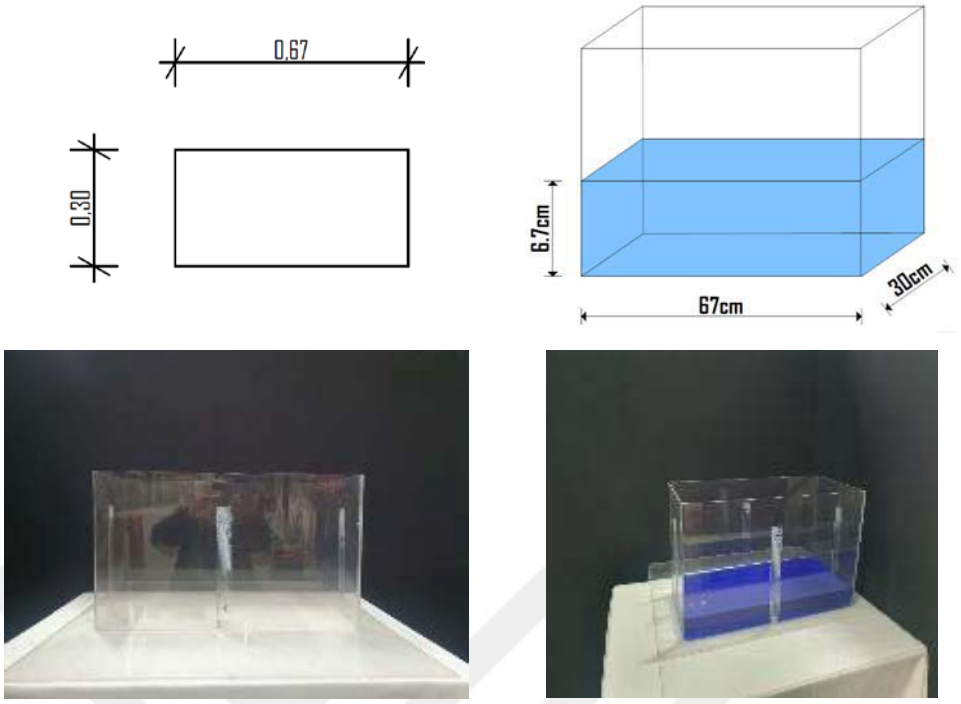
Doğrusal dalga teorisine göre (Lamb, 1932; Housner, 1963), dikdörtgen tanklardaki sıvı çalkalanma (sloshing) frekansı Denklem (3) ile tanımlanmaktadır. Bu frekans, yalnızca tankın geometrik özelliklerine, yani uzunluk (L), sıvı yüksekliği (h) ve yerçekimi ivmesi (g) ile modları tanımlayan değişkenlere (a_n) bağlıdır. (a_n)farklı modlar için hesaplanır. Dikdörtgen tanklar için $a_n=\pi(2n-1)$, $a_1=\pi$, $a_2=3\pi$, $a_3=5\pi\ldots$ olarak hesaplanabilir.

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{a_n g}{L} tanh(\frac{a_n h}{L})} \tag{3}$$

ASS tasarım sürecinde, çalkalanma frekansı f_w binanın birinci doğal frekansına eşitlenerek (h) ve (L) belirlenir. DASS tasarımında, su derinliğinin tank uzunluğuna oranı (h/L) 0.1 olarak alınmıştır; bu değer, ASS uygulamaları için tipik olarak kullanılan 0.1 ile 5 aralığında yer almaktadır. Bu oran ve tank uzunluğu (L = 0.67 m) esas alınarak, su derinliği (h) 0.067 m olarak hesaplanmıştır. Gerekli sıvı kütlesi, toplam yapı kütlesine göre yaklaşık %8'lik bir kütle oranı (tipik olarak %1 ile %10 aralığında) dikkate alınarak 13.47 kg olarak hesaplanmıştır. Belirtmek gerekir ki farklı (h/L) oranları için farklı boyutlarda tanklar tasarlanabilmektedir (Tablo 2). Burada model bina için geometrik olarak en uygun tank (h/L) = 0.1 olarak tasarlanan tanktır. DASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 16'da verilmektedir.

Tablo 2. DASS sistem için bazı (h/L) oranları için tank özellikleri

h/L	L (m)	b (m)	h (m)	Su kütlesi (kg)	Kütle oranı (%)
0.1	0.67	0.3	0.067	13.467	7.82
0.15	0.97	0.3	0.145	42.195	24.53
0.2	1.23	0.3	0.246	90.774	52.77
0.25	1.45	0.3	0.360	156.60	91,04
0.3	1.60	0.3	0.480	230.40	133.95



Şekil 16. DASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.2. Silindir Ayarlı Sıvı Sönümleyici (SASS)

Doğrusal dalga teorisine göre (Lamb, 1932; Housner, 1963), silindir tanklardaki sıvı çalkalanma (sloshing) frekansı Denklem (4) şeklinde yazılır. Bu frekans, yalnızca tankın geometrik özelliklerine, yarıçap (R), sıvı yüksekliği (h) ve yerçekimi ivmesi (g) ile modları tanımlayan değişkenlere (λ_n) bağlıdır. (λ_n) farklı modlar için (n) değişkeni birinci türden Basel fonksiyonlarının türevinden (köklerden) elde edilir. Buna göre $\lambda_1 = 1.8412$, $\lambda_2 = 5.3314$, $\lambda_{31} = 8.5363$, $\lambda_{14} = 11.7060$…olarak hesaplanır (Vazquez-Greciano vd., 2024).

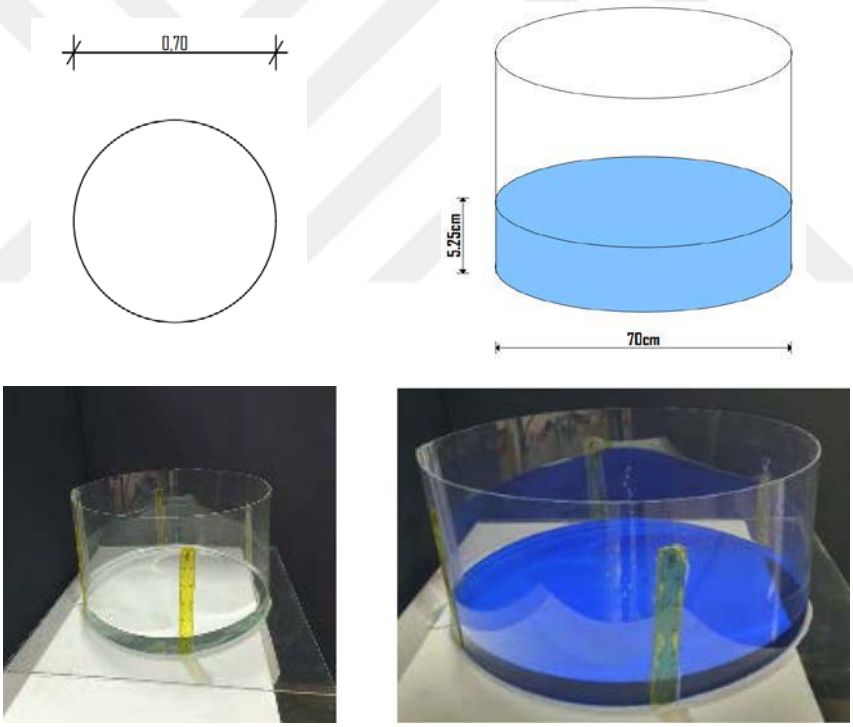
$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\lambda_n g}{R} tanh(\frac{\lambda_n h}{L})} \tag{4}$$

ASS tasarım sürecinde, çalkalanma frekansı f_w binanın birinci doğal frekansına eşitlenerek (h) ve (R) belirlenir. SASS tasarımında, su derinliğinin tank yarıçapına oranı (h/L) 0.15 ve $\lambda_1 = 1.8412$ dikkate olarak alınmıştır. Buradan Denklem 4 kullanılarak R= 0.35 m ve D (çap) = 0.70 m olarak hesap edilir. Sıvı yüksekliği (h) ise 0.0525 m olarak elde edilir. Dolayısıyla tan içerisindeki sıvı kütlesi 20 kg olup kütle oranı yaklaşık %11 olmaktadır. Tablo 3'te görüleceği üzere farklı (h/R) oranları için farklı boyutlarda tanklar

tasarlanabilmektedir. Burada su kütlesinin DASS sisteme uyumlu olması bakımından en uygun (*h/R*) oranı 0.15 seçilmiştir. SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 17'de verilmektedir.

Tablo 3. SASS sistem için bazı (*h/R*) oranları için tank özellikleri

h/R	R (m)	h (m)	Su kütlesi (kg)	Kütle oranı (%)
0.1	0.24	0.024	4.34	2.52
0.15	0.35	0.0525	19.29	11
0.2	0.46	0.092	61.12	47
0.25	0.56	0.14	137.88	104
0.3	0.65	0.195	258.69	196



Şekil 17. SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

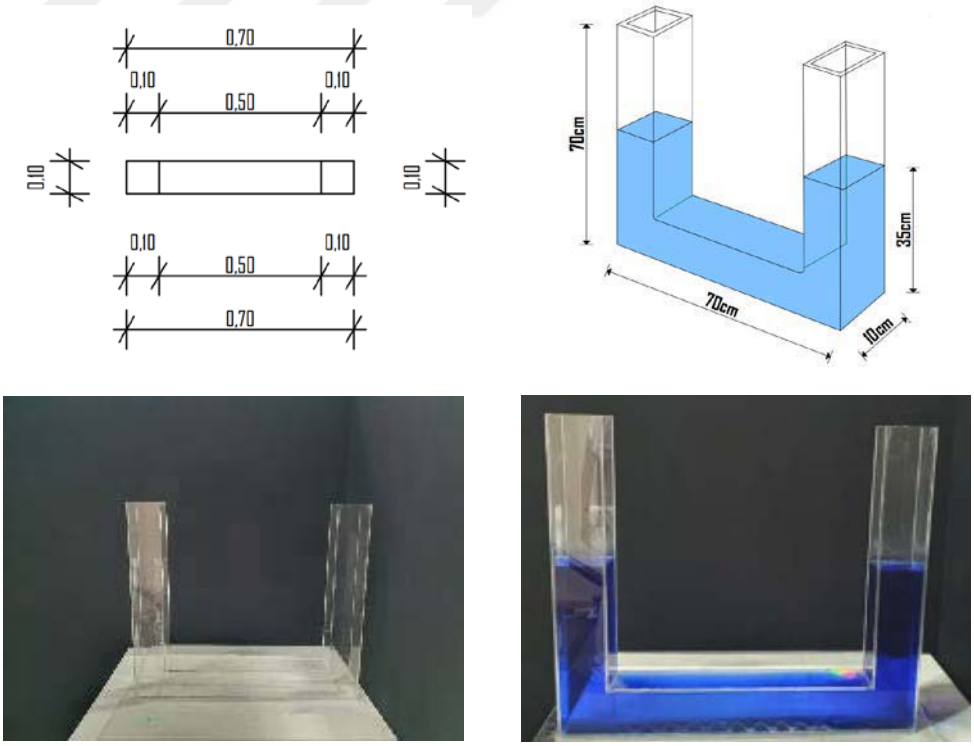
2.3.3. Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (AKSS)

AKSS sistemleri, iki sütun arasında (genellikle U şekli) ileri-geri salınan sıvının hareketinden yararlanarak titreşim enerjisini sönümlemektedir. Sönümleme sürecinde, sütunlar içerisinde dalgalanma (sloshing) oluşmaz ve AKSS'de toplam sıvı kütlesinin tamamı sönümleme mekanizmasına katılmaktadır. Dolayısıyla, sistemdeki tüm kütle etkin

kütle olarak kabul edilmektedir. Sıvı sütununun salınım frekansı, Denklem (5)'te verildiği üzere, AKSS'nin titreşim kontrol cihazı olarak etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yapının baskın (birinci) doğal frekansına ayarlanmıştır. Denklemde (L) suyun temas ettiği toplam kol uzunluğu ($L_d + L_y$), (g) ise yerçekimi ivmesidir.

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L}} \tag{5}$$

Denklem (5)'te (L) değeri 1.40 m olarak elde edilir. (μ) su kütlesinin yapı kütlesi (M_s) oranı olmak üzere ve 0.1 kabul edilirse; $\mu = \frac{\rho AL}{M_s} = 0.1$ olur. Buradan kesit alanı 0.0122 m^2 ve AKSS'nin kollarının kare kesitli olacağı kabulü ile kesit uzunluğu 0.10 m elde edilir. Literatürde L_d / L oranı genellikle 0.5-0.9 arasında değişmektedir (faklı oranlar için elde edilen AKSS sistemler için bakınız Tablo 4). Bu oran 0.5 kabul edilirse; (L_y) 0.7 m ve (L_d) 0.35 m olarak hesap edilir. AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 18'de verilmektedir.



Şekil 18. AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.4. Halka Ayarlı Sıvı Sönümleyici (HASS)

HASS sistemler SASS'nin özel hallerinden birdir. Geleneksel ASS sistemlerinden farklı olarak sıvı halka biçimli, yani dairesel kesitli ve içi boş bir tank içerisinde hareket eder. Bu halka biçimli düzen, sıvı hareketini dairesel doğrultuda sınırlandırarak hem yer verimliliği sağlar hem de sönümleme performansını artırabilir. Yönden bağımsız (omnidirectional) bir sönümleme etkisi sunar; bu da çok yönlü deprem ve rüzgâr etkilerine karşı avantaj sağlar. HASS sistem için doğal çalkalanma frekansı Denklem (6)'da verilmektedir.

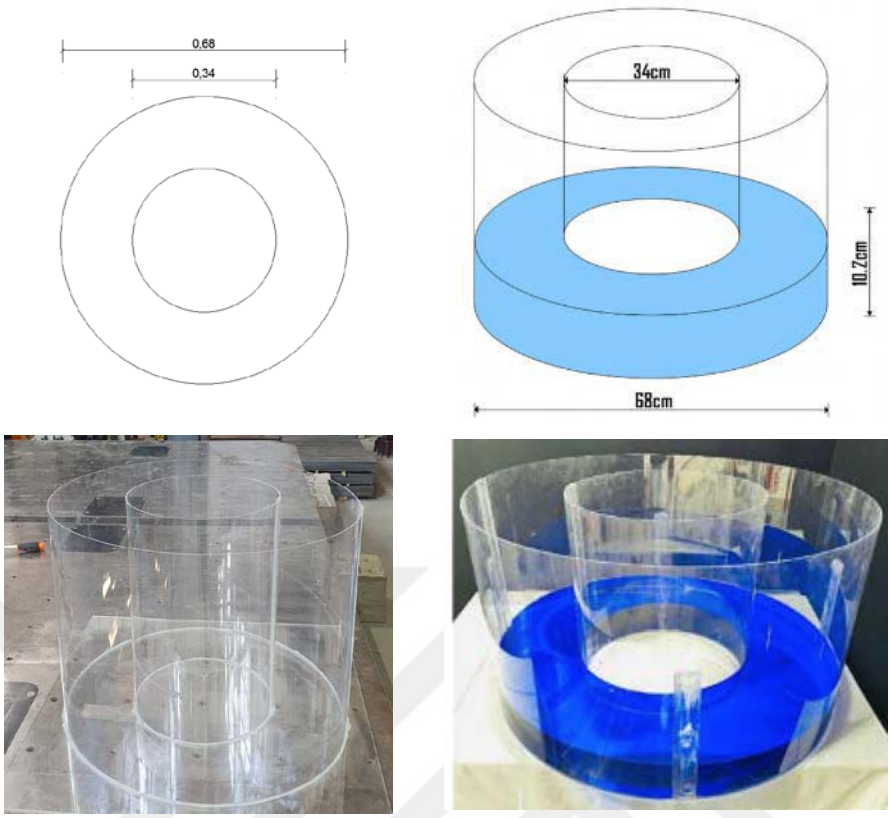
$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\xi_n \times 9{,}81}{R} tanh(\frac{\xi_n \times h}{R})} \tag{6}$$

Denklemde (h) sıvı yüksekliği, (R) tankın dış yarıçap uzunluğunu ifade etmektedir. Bauer (1960) tarafından farklı iç yarıçap / dış yarıçap oranları (r / R) için (ξ_n) değerleri sunulmuştur. (r / R) = 0 durumu için (ξ_n) = 1.84 edilmekte olup, bu değer ile sistem silindirik bir tanka dönüşmektedir. Farklı (r / R) oranları (k) için mod numarasına bağlı hesap edilen (ξ_n) değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Tablodan (k) değeri 0.5, (n) değeri 1'e karşı (ξ_n) 1.355 olarak elde edilmiştir. (h / R) oranı 0.3 seçilirse, (R) değeri Denklem (5) kullanılarak 0.34 m olarak hesap edilir. Dolayısıyla (r) 0.17 m olur. (h) sıvı yüksekliği ise 0.102 m hesap edilir. HASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 19'de verilmektedir. Üretilen tank içerisinde 27 kg sıvı ile kütle oranı %16'dır.

Tablo 4. HASS sistemi için bazı (ξ_n) değerleri (Bauer, 1960)

		ξ_n: (r / R) = k									
n	**m**	**0**	**0.1**	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**
0	1	3.832	3.941	4.236	4.706	5.391	6.393	7.93	10.522	15.738	31.429
0	2	7.016	7.331	8.055	9.104	10.558	12.625	15.747	20.969	31.431	62.839
1	0	1.841	1.804	1.705	1.582	1.462	1.355	1.262	1.182	1.113	1.053
1	1	5.331	5.137	4.904	5.137	5.659	6.665	8.041	10.592	15.778	31.421
1	2	8.536	8.199	8.433	9.308	10.683	12.706	15.801	21.004	31.451	62.847
2	0	3.054	3.053	3.035	2.968	2.842	2.681	2.516	2.363	2.227	2.106
2	1	6.706	6.687	6.495	6.274	6.416	7.063	8.367	10.799	15.898	31.5
2	2	9.97	9.888	9.55	9.918	11.056	12.949	15.962	21.106	31.511	62.874
3	0	4.201	4.201	4.199	4.18	4.108	3.958	3.754	3.54	3.339	3.159
3	1	8.015	8.014	7.964	7.721	7.535	7.84	8.889	11.136	16.096	31.588
3	2	11.346	11.338	11.106	10.92	11.666	13.348	16.226	21.276	31.61	62.918

n: mod numarası, m: radial mod numarası

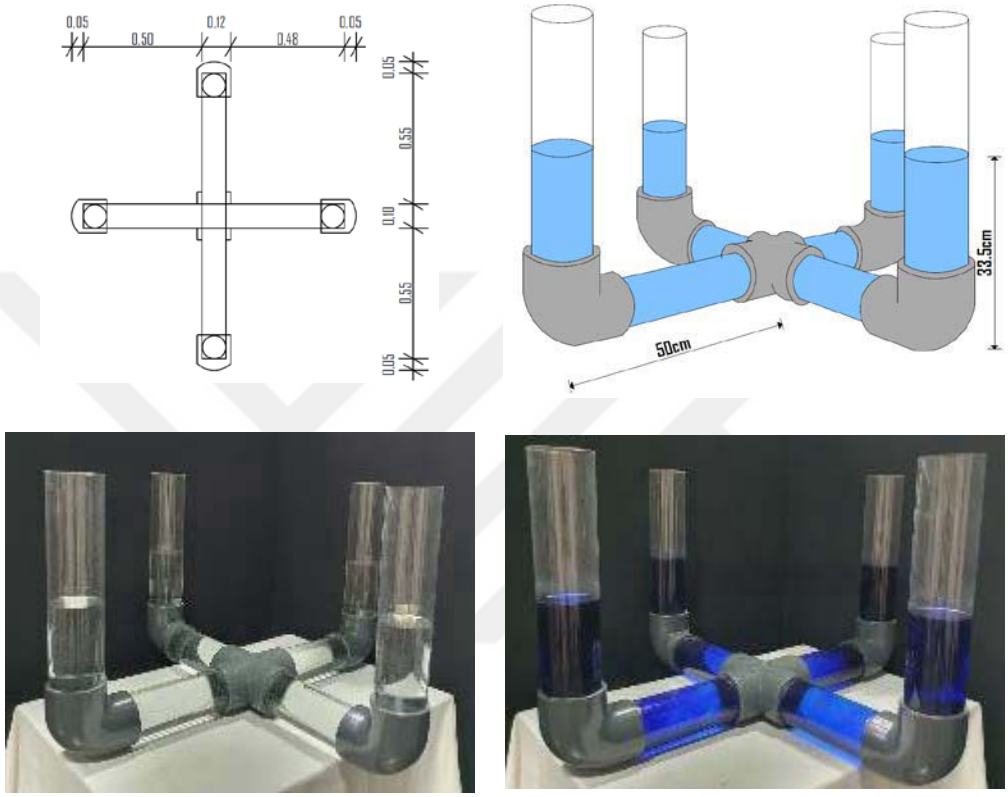


Şekil 19. HASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.5. 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS)

4-AKSS sistemler yapıların iki yatay doğrultudaki salınımlarını eşzamanlı olarak kontrol etmek amacıyla Sakai vd., (1991) tarafından geliştirilmiştir. Klasik AKSS sistemlerinden farklı olarak 4-AKSS'ler, birbirine dik iki sıvı kolonunun ortak bir sıvı haznesi üzerinden bağlandığı bir geometriye sahiptir. Bu sayede sistem, hem x hem de y yönündeki titreşimleri etkin biçimde sönümleyebilir. 4-AKSS sistemlerde kollar çapraz bir şekilde birleştirilir. 4-AKSS'nin ana doğrultularındaki frekansı, Rozas vd.. (2016) tarafından verilen Denklem (7) kullanılarak belirlenebilir. Denklemde (L_x) ve (L_y) x ve y doğrultusunda suyun temas ettiği toplam uzunluğu ifade etmektedir. Tankın tasarım esasları 4-AKSS* sisteminkine benzer olduğundan ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur. 4-AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 20'de verilmektedir. Üretilen tank içerisinde 25,8 kg sıvı ile kütle oranı %15'tir.

$$f_{dx} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L_x}}$$
$$f_{dy} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L_y}} \quad (7)$$



Şekil 20. 4-AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.6. 4 Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (4-AKSS*)

4-AKSS* sistemler 4-AKSS sistemlerin farklı bir versiyonu olarak Rozas vd., (2016) tarafından önerilmiştir. Bu sistem, temelde dört adet tek yönlü AKSS'nin tek bir birim içinde birleştirilmiş hali olarak düşünülebilir ve üstten bakıldığında halka biçimli bir dikdörtgen formuna sahiptir. 4-AKSS*'ın ana doğrultularındaki frekansı, Rozas vd.. (2016) tarafından verilen Denklem (8) kullanılarak belirlenebilir. Denklemde (L_x) ve (L_y) x ve y doğrultusunda suyun temas ettiği toplam uzunluğu, g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. f_w ve buna karşılık gelen etkin uzunluğu (L_{xy}) belirlemek için öncelikle sistemin dinamik

parametrelerinin adım adım hesaplanması gerekir. İlgili hesaplar için formülasyonlar Denklem (9)'da verilmektedir.

$$f_{dx} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L_x}}$$
$$f_{dy} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L_y}} \tag{8}$$

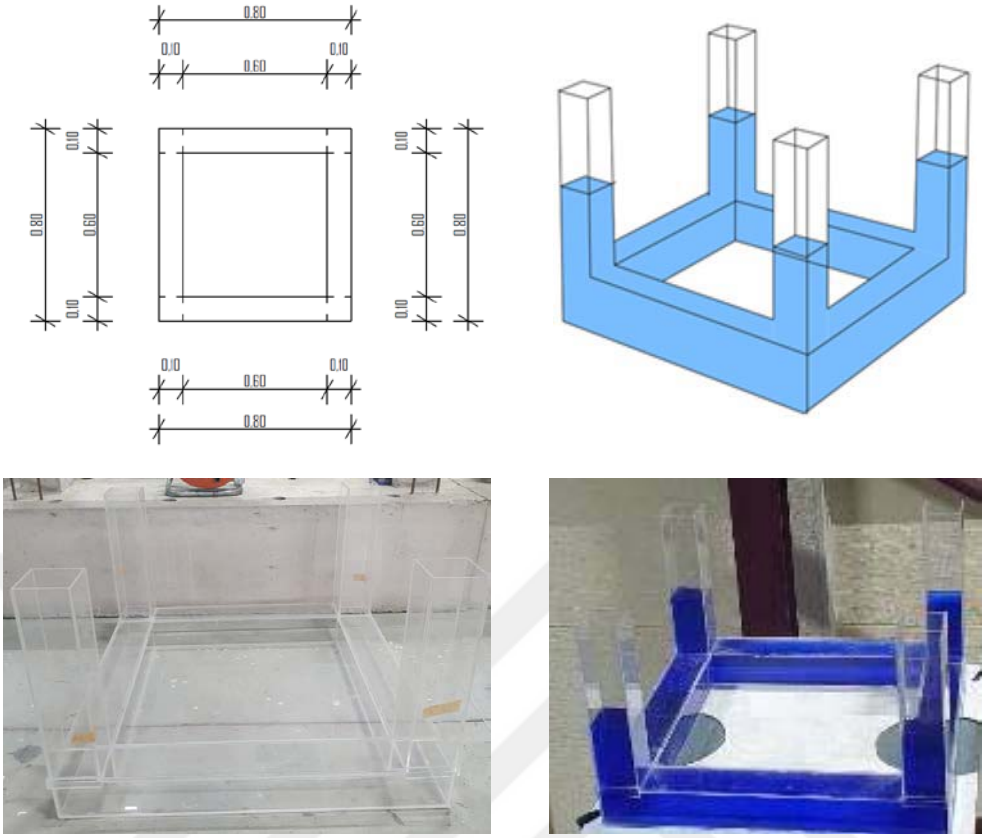
$$\mu^* = \frac{\mu \times \gamma^2}{1+\mu\,(1-\gamma^2)} = 0.043 \quad ve\ \gamma = \frac{H}{L} = 0.6$$

$$m_s^* = m_s(1+\mu)(1-\gamma^2) = 0.197\, m_s$$

$$f_s^* = f_s\sqrt{\frac{m_s}{m_s^*}} = 0.553\ Hz \tag{9}$$

$$fd_{opt} = f_s^*\sqrt{\frac{1-\frac{\mu^*}{2}}{1+\mu}} = 0.53\ Hz$$

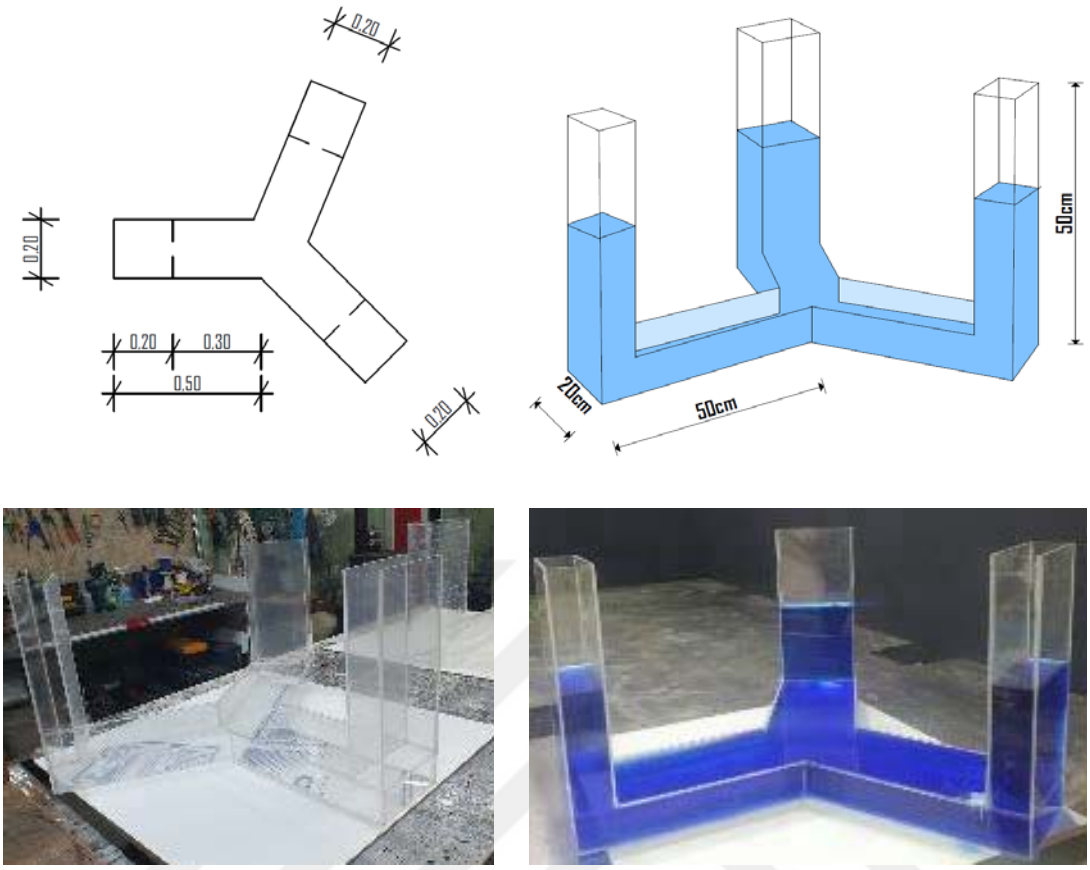
Ayarlama koşulu $\frac{f_d-0.53}{0.53} \leq D_f = 0.01$ ile sağlanmıştır. Buna göre $f_d = 0.54$ Hz olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, 4-AKSS* sisteminde etkin sıvı uzunluğu Denklem 8'den $(L) = 1.67$ m olarak hesaplanmıştır. Yatay kol uzunluğu (*H/L=0.6*) Denklem 9'dan 1.0 m olarak hesaplanır. Dikey kol uzunluğu ise (*L=2V+H*) olduğundan (*V*)=0.335 m olur. Denklem 9'da (m_s), sönümleyicisiz yapının toplam kütlesini, (f_s) ise doğal frekansını ifade eder. (μ) sıvı kütlesinin yapı kütlesine oranıdır ve $(\mu) = \frac{n\rho A(2V+H_i/2)}{m_s}$ bağıntısıyla tanımlanır ve (n) kol sayısını ifade eder (bu çalışmada $n = 4$). (μ*) sistem geometrisine bağlı etkin kütle oranını, (m_s*) eşdeğer yapı kütlesini, (f_s*) ayarlanmış doğal frekansı ve (f_d) ise sistemin ayar frekansını göstermektedir. (γ) geometrik faktörü ifade eder. (f_s^*) ile (f_d) arasındaki yakınlık, en yüksek sönümleme performansını sağlar. (f_s) ise yapının doğal frekansıdır. 4-AKSS* sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 21'de verilmektedir. Üretilen tank içerisinde 34 kg sıvı ile kütle oranı %20'dır.



Şekil 21. 4-AKSS* sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.7. 3L Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (3L-AKSS)

Üç adet L şeklindeki koldan oluşan çok yönlü (omnidirectional) 3L-AKSS sistem, yapıları farklı yönlerden gelen titreşimlere karşı korumak amacıyla geliştirilmiştir. Klasik AKSS'lerden farklı olarak, üç kolun merkezde birleştiği bu simetrik yapı sayesinde sönümleyici, yatay düzlemde tüm yönlerde etkin bir enerji sönümleme kapasitesine sahiptir. 3L-AKSS sistem için tasarım esasları Denklem (8) ve Denklem (9) ile belirlenmektedir. Buradan; (f_d) 0.54 Hz, (L) 1.86 m, (H) 0.93 m, (V) 0.465 m olarak hesaplanır. (n) kol sayısı ise 3'tür. 3L-AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 22'de verilmektedir. Üretilen tank içerisinde 34 kg sıvı ile kütle oranı %20'dır.



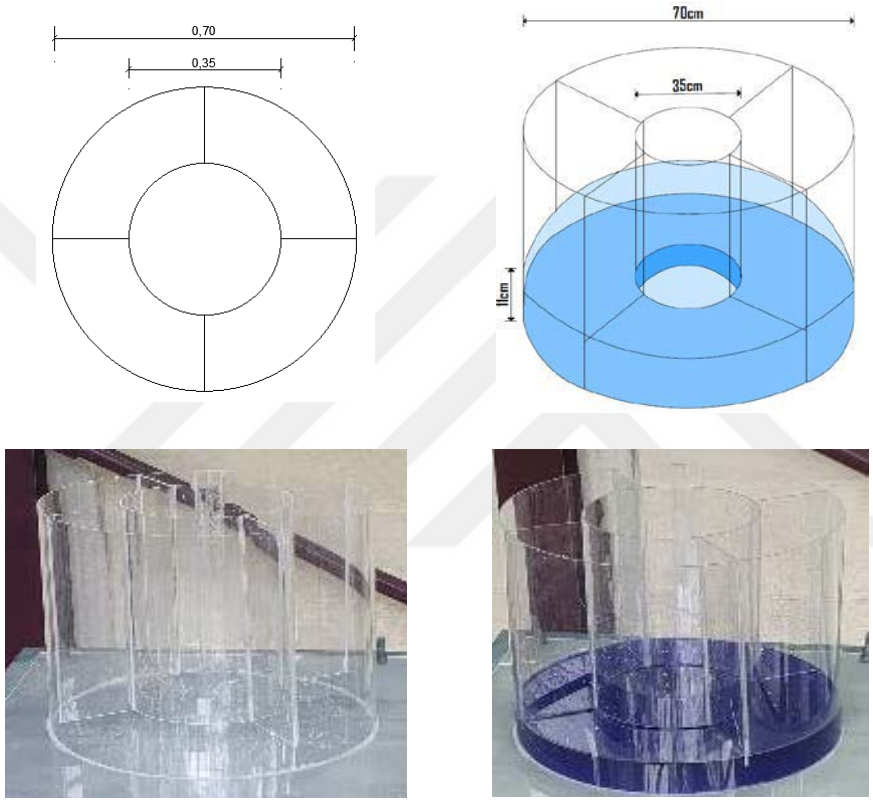
Şekil 22. 3L-AKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.8. Halka Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (HAKSS)

HAKSS sistemler HASS sistemin özel bir halidir. Bu sistemde düşeyde halka ekseninde düşey bölmeler ile kolonlar oluşturulur. Bu sayede sönümleyicinin etkili uzunluğu artırılarak tüm yönlerde etkili sönümleme amaçlanır. Bazı tasarımlarda taban seviyesinde bölmelerin altından suyu akışı serbest bırakılır (bu amaçla taban seviyesinde delikler ya da kapaklar teşkil edilir). HAKSS sistem için doğal çalkalanma frekansı Denklem (10)'da verilmektedir. Denklemde (h) sıvı yüksekliği, (R) tankın dış yarıçap uzunluğunu ifade etmektedir. Bauer (1960) tarafından farklı iç yarıçap / dış yarıçap oranları (r / R) için (ξ_n) değerleri sunulmuştur. (r / R) = 0 durumu için (ξ_n) = 1.84 edilmekte olup, bu değer ile sistem silindirik bir tanka dönüşmektedir. Farklı (r/R) oranları (k) için mod numarasına bağlı hesap edilen (ξ_n) değerleri Tablo 4'te verilmektedir. Tablodan (k) değeri 0.5, (n) değeri 1'e karşı (ξ_n) 1.355 olarak elde edilmiştir. (h / R) oranı 0.3 seçilirse, (R) değeri Denklem (10) kullanılarak 0.35 m olarak hesap edilir. Dolayısıyla (r) 0.175 m olur. (h) sıvı yüksekliği ise

0.11 m hesap edilir. HAKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank Şekil 23'te verilmektedir. Tank içerisindeki kolon sayısı 4 ve tankın taban seviyesinde kolonların altındaki boşluk miktarı 5 cm olarak dikkate alınmıştır.

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\xi_n \times 9{,}81}{R} tanh(\frac{\xi_n \times h}{R})} \tag{10}$$

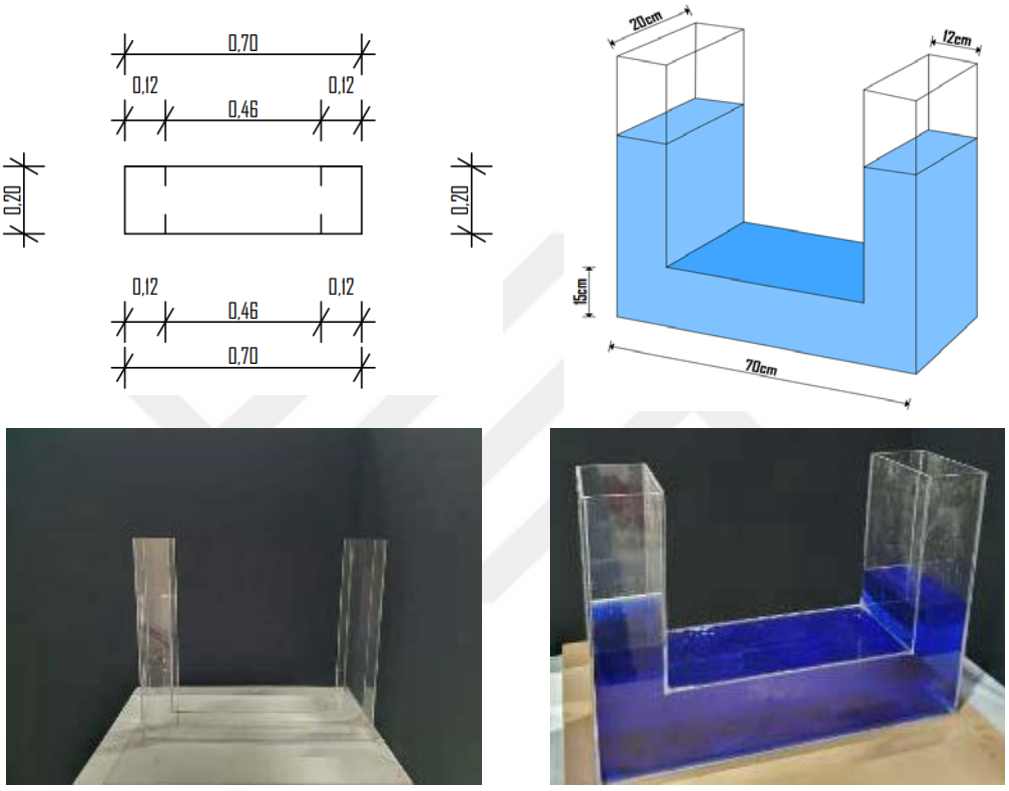


Şekil 23. HAKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.3.9. Geniş Kollu Ayarlı Kolon Sıvı Sönümleyici (GAKSS)

GAKSS sistemler düşey ve yatay kollarında farklı kesit alanlarına sahip olan klasik AKSS'nin farklı bir formudur. Klasik AKSS'nin boğaz (orifis) sönümlemesine ek olarak, GAKSS'de düşey ve yatay kollar arasındaki kesit alanı değişiminden kaynaklanan yük kayıpları nedeniyle ilave enerji sönümlemesi gerçekleşmektedir. GAKSS'nin doğal frekansı yalnızca sıvı kolonunun uzunluğuna değil, aynı zamanda yatay ve düşey kolların kesit alanı oranına da bağlı olduğundan, belirli bir doğal frekans için farklı sistem konfigürasyonları tasarlanabilir. Bu durum, sistemin çok yönlü ve mimari açıdan uyumlu olmasını sağlar

(Konar ve Ghosh, 2023). Sistem tasarımı AKSS sistem ile benzerdir (Denklem (5)). AKSS tasarımına benzer yaklaşımla; (L) suyun temas ettiği toplam kol uzunluğu ($L_d + L_y$) = 1.40 m olarak hesaplanır. Uygun geometrik tasarım için (μ) = 0.19 seçilirse, kesit alanı 0.024 m^2 olarak elde edilir. Buradan dikdörtgen kenar ölçüleri 0.20 cm ve 0.12 cm olarak belirlenir (Şekil 24). Yatay kol yüksekliği ise 15 cm olarak seçilmiştir.



Şekil 24. GAKSS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

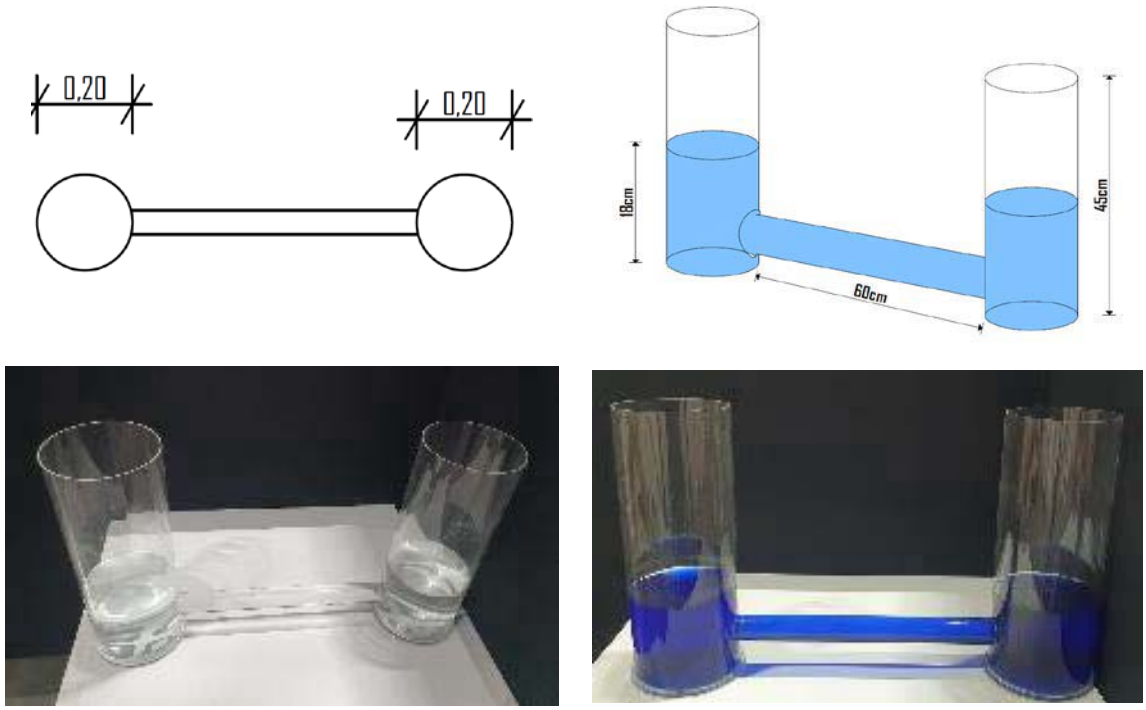
2.3.10. Boru Bağlantılı Silindir Ayarlı Sönümleyici (B-SASS)

B-SASS sistemleri, içerdikleri sıvının hem dalgalanma (sloshing) hem de salınım (oscillatory motion) hareketleri yoluyla enerji sönümlemesi yapabilmektedir. Cihazın tasarımına bağlı olarak, B-SASS sisteminde bulunan sıvı, uyarım yönüne göre aynı anda hem dalgalanma hem salınım hareketi gösterebilir ya da yalnızca biri gerçekleşebilir. Bu sönümleyici, tabanlarına yakın kısımlarında boğaz (orifis) bulunan bir veya birden fazla boru ile birbirine bağlanmış iki sıvı tankından oluşur (Ghosh vd., 2012). B-SASS sisteminin pratik uygulamalarda kullanılmasından önce, özellikle x yönünde uyarım durumunda sıvının ne kadarının dalgalanma hareketine ne kadarının salınım hareketine katıldığının belirlenmesi

amacıyla ayrıntılı deneysel ve analitik incelemelerin yapılması gerekmektedir (Konar ve Ghosh, 2023). Denklem (11)'de B-SASS sistemin tasarımında kullanılan esaslar verilmektedir.

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{L_{eff} + \beta\frac{A_h}{A_v}}} \tag{11}$$

Burada (L_{eff}) etkin sıvı uzunluğunu, (β) düzeltme katsayısını, (A_h) ve (A_v) ise sırasıyla yatay ve düşey kesit alanlarını ifade etmektedir. Yapılan çalışmalarda (Sakai ve Takaeda, 1993) β katsayısının 0.3-0.7 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ortalama değer olarak $(\beta) = 0.5$ alınmıştır. $(f_w) = 0.594$ Hz değerleri Denklem (11)'de yerine konularak etkin sıvı uzunluğu $(L_{eff}) = 0.6$ m olarak hesaplanmıştır. B-SASS'nin yatay koluna iki silindir eklenmiştir. Sıvının etkin uzunluğu $(L_{\text{eff}}) = 0.6$ m olarak korunmuş olup her tankının yarıçapı $(r_c) = 0.10$ m olarak elde edilmiştir. Bu düzenleme yatay koldaki kesit/hacmi artırarak sönümleme kapasitesini yükseltir ve hedeflenen ayar frekansının korunmasına yardımcı olur. Tankın geometrik ölçüleri Şekil 25'te verilmektedir.



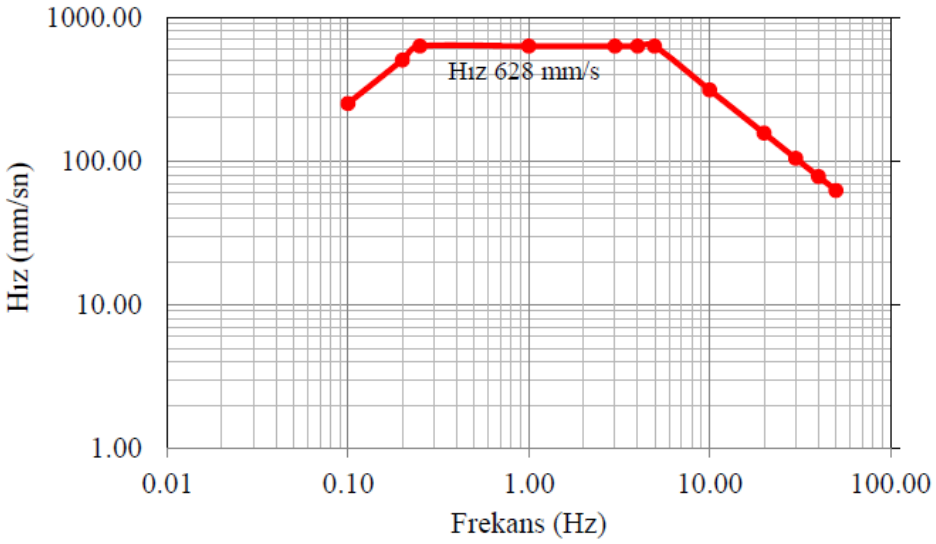
Şekil 25. B-SASS sistemin geometrik özellikleri, su yüksekliği ve üretilen tank

2.4. Sarsma Masası Deneyleri

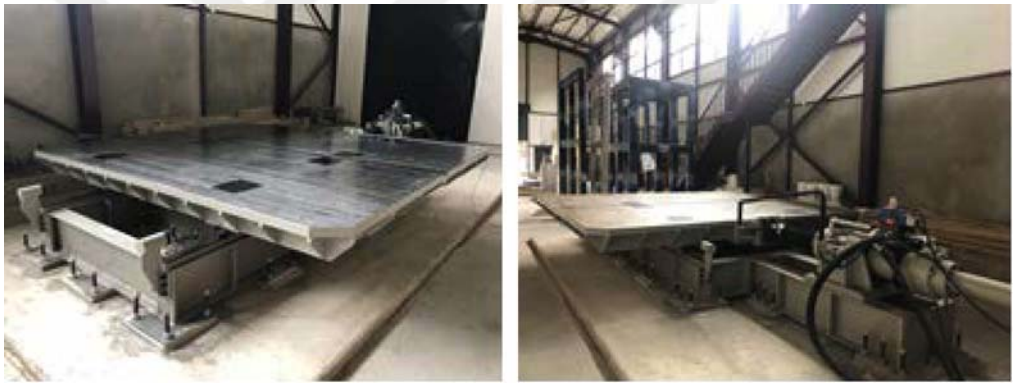
Sarsma masası deneyleri inşaat mühendisliğinde yapıların deprem etkileri altındaki dinamik davranışlarını incelemek amacıyla gerçekleştirilen en önemli deneysel yöntemlerden biridir. Bu deneylerde, gerçek veya ölçekli yapı modelleri, kontrollü bir şekilde yer hareketlerini simüle eden sarsma masasına yerleştirilir. Böylece, farklı büyüklükte ve yönlerdeki deprem kayıtları uygulanarak yapıların titreşim, deplasman, ivme ve enerji sönümleme davranışları doğrudan gözlemlenir.

ASS sistemlerin yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunun etkinliklerinin incelenmesi amacıyla her bir ASS sistemi için bir takım (564 adet) sarsma masası deneyleri farklı dinamik etkiler altında gerçekleştirilmiştir. Sarsma masası deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarında bulunan sarsma masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. 4.00×4.00 m boyutlarındaki sarsma masası, maksimum ±2.00 g ivme, ±400.00 mm yer değiştirme ve 0.10-50.00 Hz frekans aralığında çalışma kapasitesine sahiptir. 628.00 mm/sn hıza ulaşabilmesi, farklı deprem kayıtlarının kullanılmasına olanak tanımaktadır. Tek doğrultuda hareket edebilen masa, 500.00 kN yatay ve 350.00 kN düşey yük kapasitesine sahiptir (Şekil 26). Deney numuneleri, tabla üzerindeki 20 cm aralıklarla yerleştirilmiş 20 mm çapındaki yivli deliklerden bağlanmaktadır (Şekil 27).

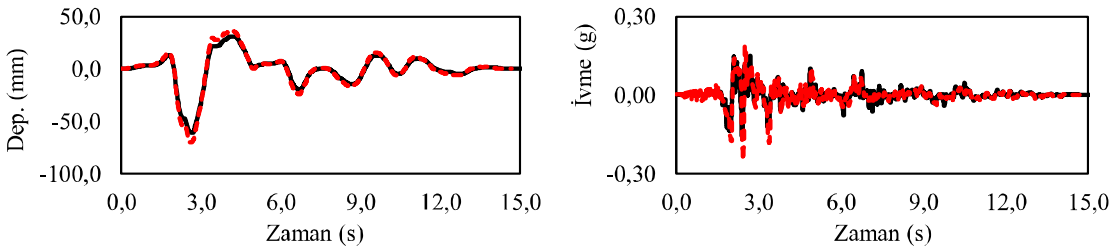
Araştırmacılar, yapıların sismik davranışını değerlendirmek amacıyla sarsma masası deneylerinde yaygın olarak harmonik hareketler (kosinüs veya sinüs dalgaları) ve gerçek deprem verilerini kullanmışlardır. Bilindiği üzere, sarsma masasının kapasitesi, uygulanacak sismik uyarımın seçilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için sarsma masası deneylerinde, uygulanan dinamik hareketler ile ölçülen tepkiler arasında tutarlılığın sağlanması büyük önem taşır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere, deneyler öncesinde PID (Proportional, Integral, Derivative) ayarları yapılmıştır (Şekil 28). Şekil 28'de görüldüğü üzere, ölçülen tepkiler ile verilen tepki sinyalleri arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.



Şekil 26. Tek eksende en az 500 kN dinamik yatay kuvvet için hız-frekans grafiği



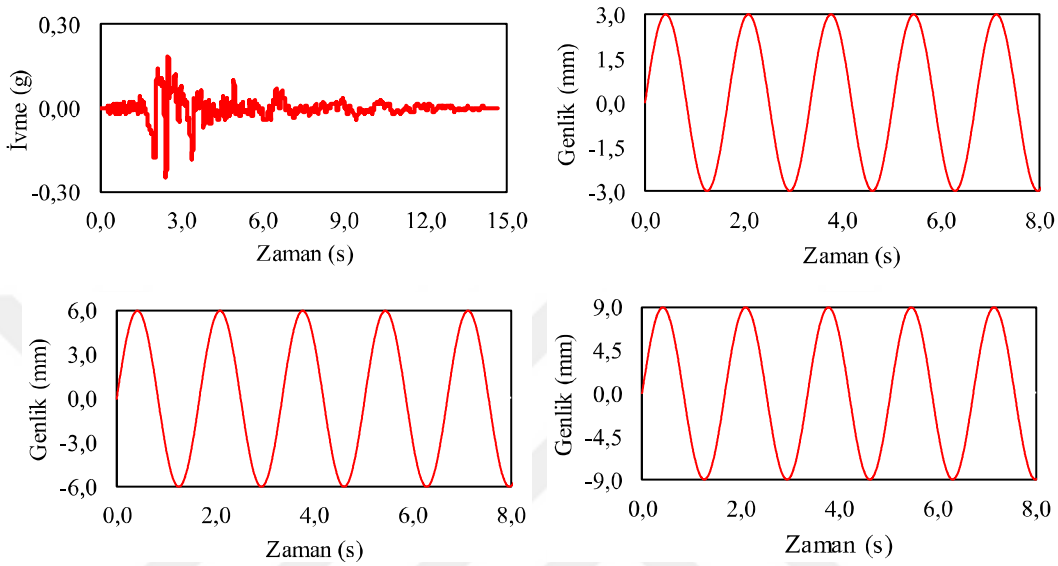
Şekil 27. Sarsma masasına ait bazı görünüşler



Şekil 28. Sarsma masasında uygulanan girdi (1992 Erzincan depremi - %50'si) ve çıktı arasında ölçülen yer değiştirme-zaman ve ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

Sarsma masası deneylerinde dinamik girdi hareketleri olarak üç adet harmonik dalga ve 1992 Erzincan depremi kaydı kullanılmıştır. Yapı modelinin baskın frekansında (0.59 Hz, 5 çevrim) oluşturulan harmonik dalgaların genlikleri sırasıyla 3 mm (PGA = 0.0041 g), 6

mm (PGA = 0.0082 g) ve 9 mm (PGA = 0.123 g)'dir. Ayrıca, 1992 Erzincan depremine ait kayıt %50 büyüklüğünde (ERZ50, PGA = 0.25 g) uygulanmıştır. Model binanın taşıma kapasitesi, en yüksek yer ivmelerinin seçilmesinde temel belirleyici unsur olmuştur. Şekil 29'da uygulanan dinamik girdi hareketleri gösterilmektedir.



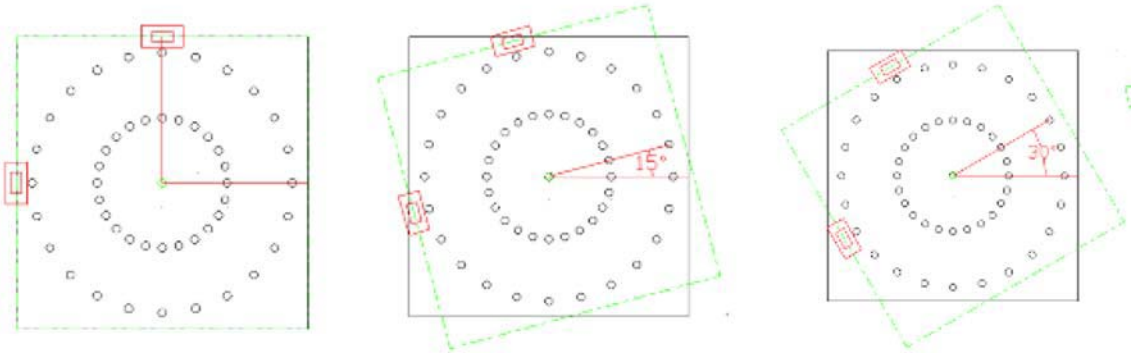
Şekil 29. Sarsma masası deneylerinde kullanılan dinamik girdiler (yer hareketleri)

Sarsma masası deneylerinde model bina üzerine 4 adet tek eksenli ivmeölçer konumlandırılmıştır. (Taban levhasına 2 adet, X ve Y yönünde; tavan levhasına 2 adet, X ve Y yönünde). Her bir tank konfigürasyonu için, ivme tepkileri hem bina tabanında hem de tepe noktasında kaydedilmiştir. Bina modeli sarsma masasına 20 mm çapındaki cıvatalarla sabitlenmiştir.

Sarsma masası üzerindeki model binaya farklı açılarda yer hareketinin etkimesi durumunu temsil edebilmek için model bina, kendi ekseni etrafında 15°'lik artışlarla (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150° ve 165° 180°) taban plakasında bırakılan yivler yardımıyla her bir test durumunda döndürülmüştür (Şekil 30). Her bir açı durumunda sonuçların karşılaştırılabilir olması için model bina üzerinde ölçülen tavan ve taban ivmeleri birbirinden çıkarılmış ve X ve Y yönleri için ivmenin bileşke kuvveti hesaplanmıştır (Şekil 31).



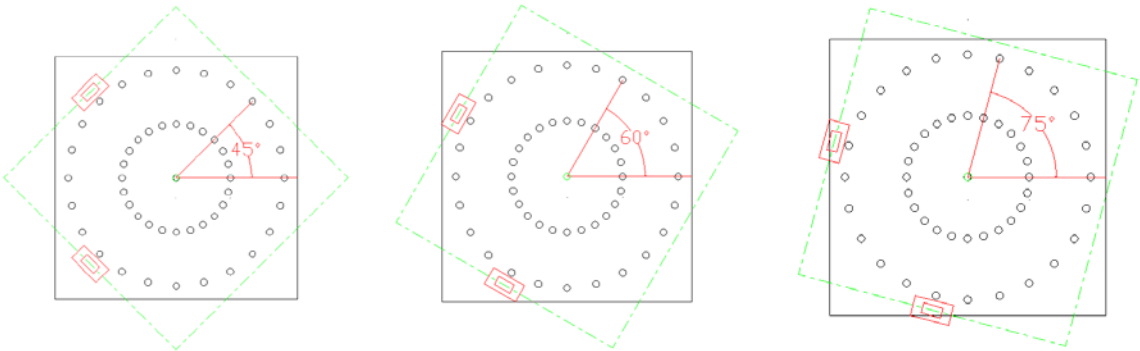
Şekil 30. Model binanın montajı ve kendi ekseni etrafında döndürülmesi



İvme = X cos (0) + Y sin (0)

İvme = X cos (15) - Y sin (15)

İvme = X cos (30) - Y sin (30)



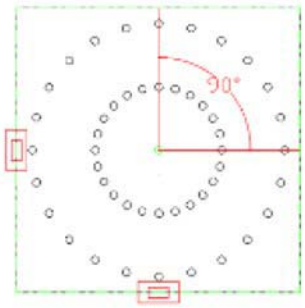
İvme = X cos (45) - Y sin (45)

İvme = X cos (60) - Y sin (60)

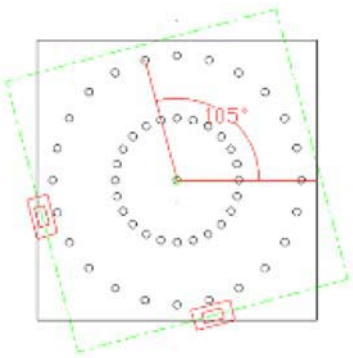
İvme = X cos (75) - Y sin (75)

Şekil 31. Model binada oluşan dinamik kuvvetlerin bileşke kuvvetinin hesaplanması

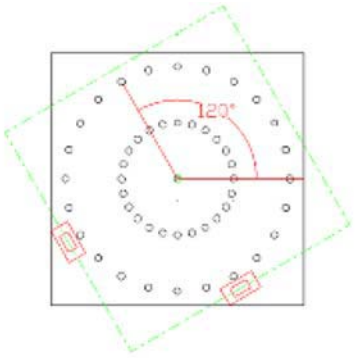
Şekil 31'in devamı



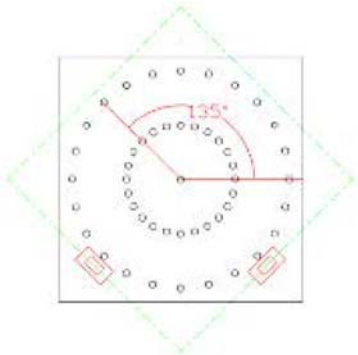
İvme = X cos (90) - Y sin (90)



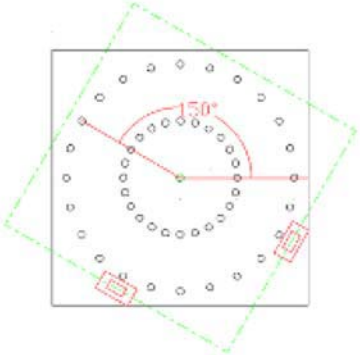
İvme = (-X) cos (105) + (-Y) sin (105)



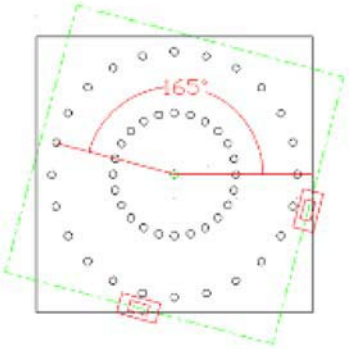
İvme = (-X) cos (120) + (-Y) sin (120)



İvme = (-X) cos (135) + (-Y) sin (135)



İvme = (-X) cos (150) + (-Y) sin (150)



İvme = (-X) cos (165) + (-Y) sin (165)

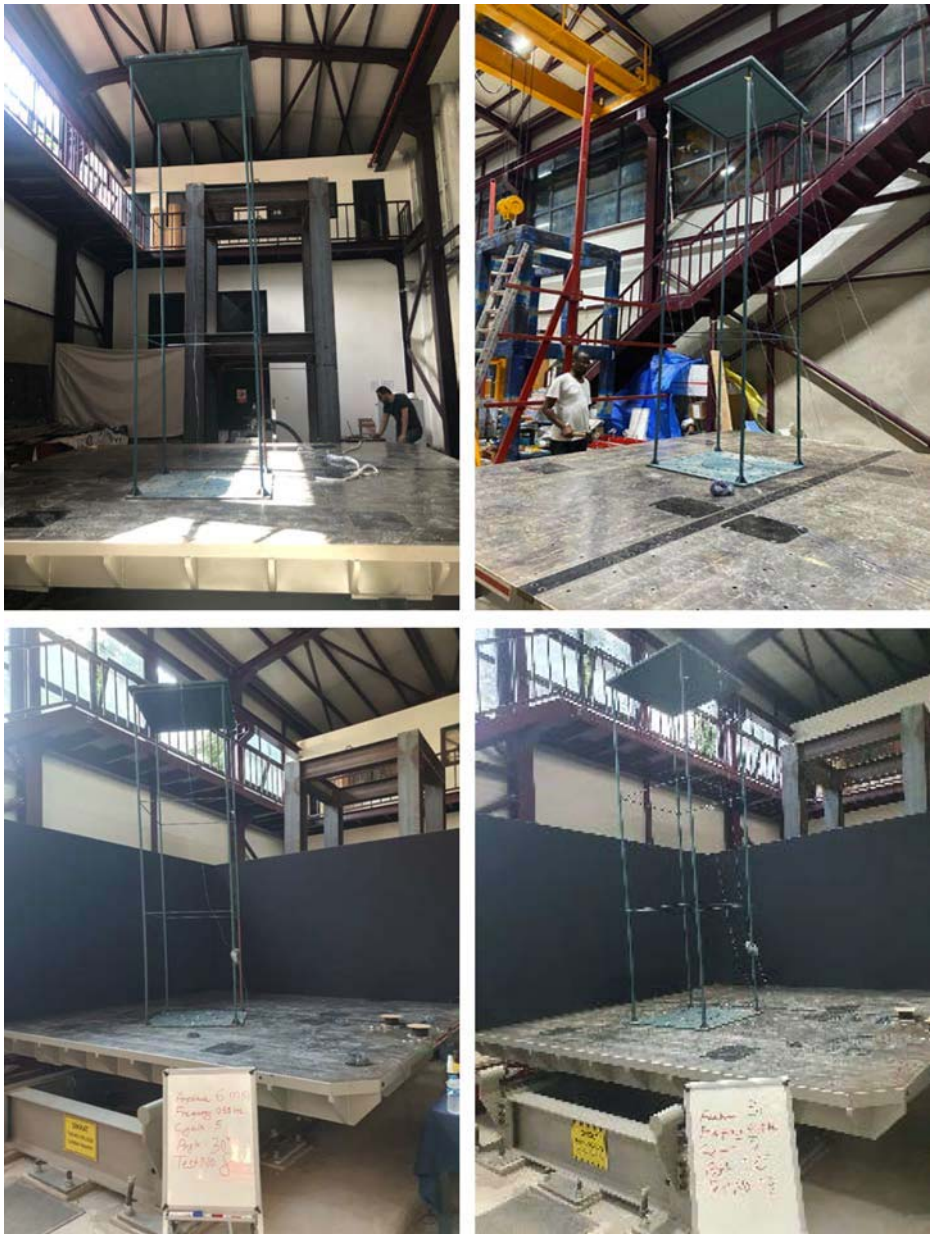
Her durum için elde edilen ivme değerleri sinyal işleme (baseline correction) yöntemiyle düzenlendikten sonra 10 adet ASS sistemden depremin farklı açılarda etkimesi durumu için elde edilen ivme değerleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve açı etkisinin ASS'lerin üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Öncelikle ASS'siz bina için durum için sonuçlar irdelenmiş, akabinde farklı 10 adet ASS için sonuçlar sıralanmıştır.

Harmonik hareketlerin yanında model bina ve ASS sistemlerden; DASS, HASS, HAKSS, GAKS ve 4-AKSS* ve akışkanın makine yağı olması durumu için ise HASS ve 4-AKSS* Erzincan depreminde (sistemler efektiflik durumuna göre seçildi) ayrıca irdelenmiştir.

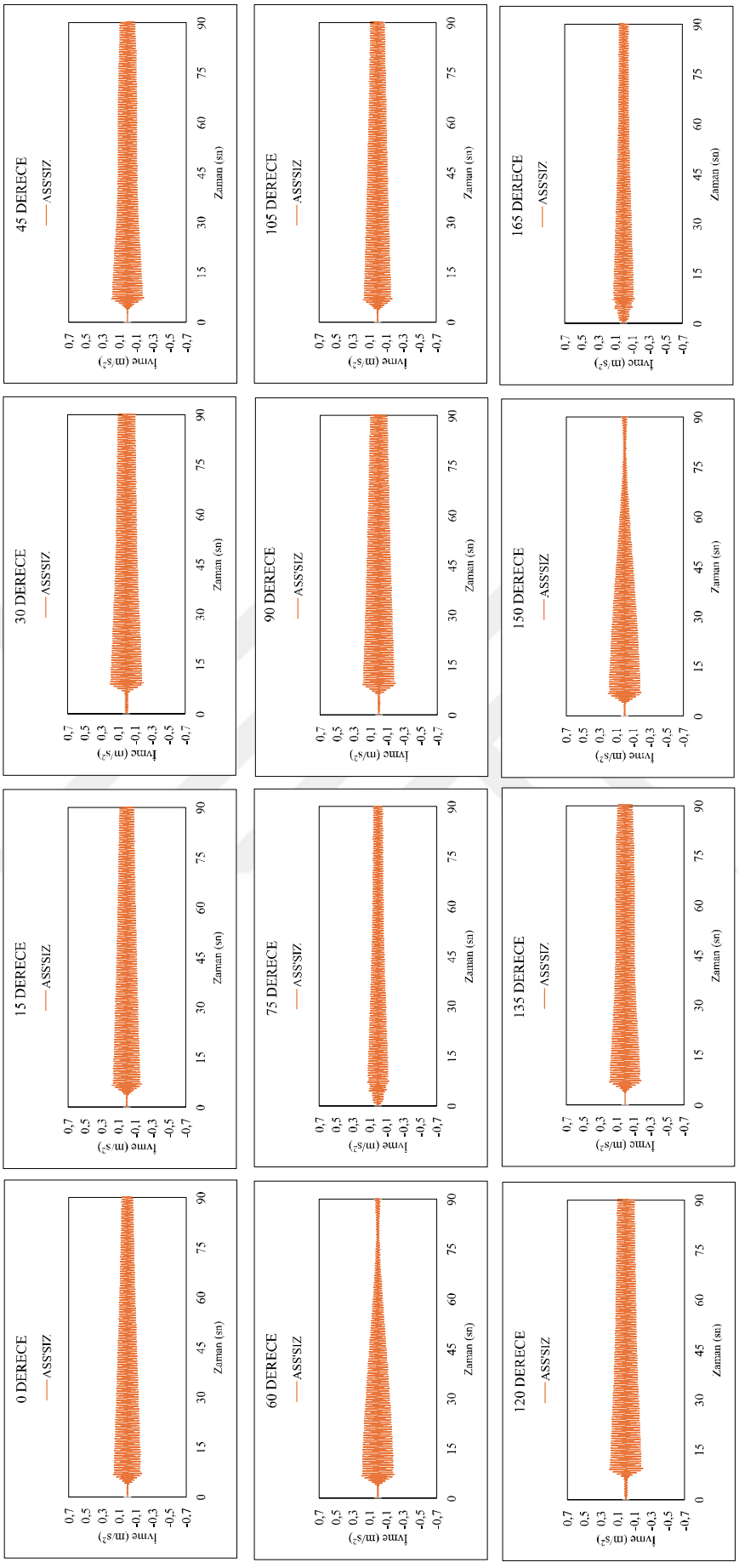
2.4.1. Model Bina İçin Dinamik Sonuçlar

Model binaya farklı genliklerde 3 adet harmonik hareket ve Erzincan depremi, yer hareket olarak her bir durum için uygulanmıştır (Şekil 32). Şekil 33'te, 3 mm, 6 mm, 9 mm

ve Erzincan depremi için model bina üzerinden elde edilen ivme-zaman grafikleri verilmiştir. Harmonik hareketlerde model bina tüm açılarda hemen hemen aynı büyüklükte maksimum ivmelere maruz kalmıştır (Şekil 34). Fakat binaya yer hareketinin 60° ve 150°'de etkimesi durumunda binada çarpılma (ivmeler periyodik olarak büyüyüp küçülmekte) (torsional coupling) etkisinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum yapılarda ek gerilme artışına neden olabilmektedir. Erzincan depreminde ise bu durum 30°, 45°, 60°, 120°, 135° ve 150° açılarda daha belirgindir.



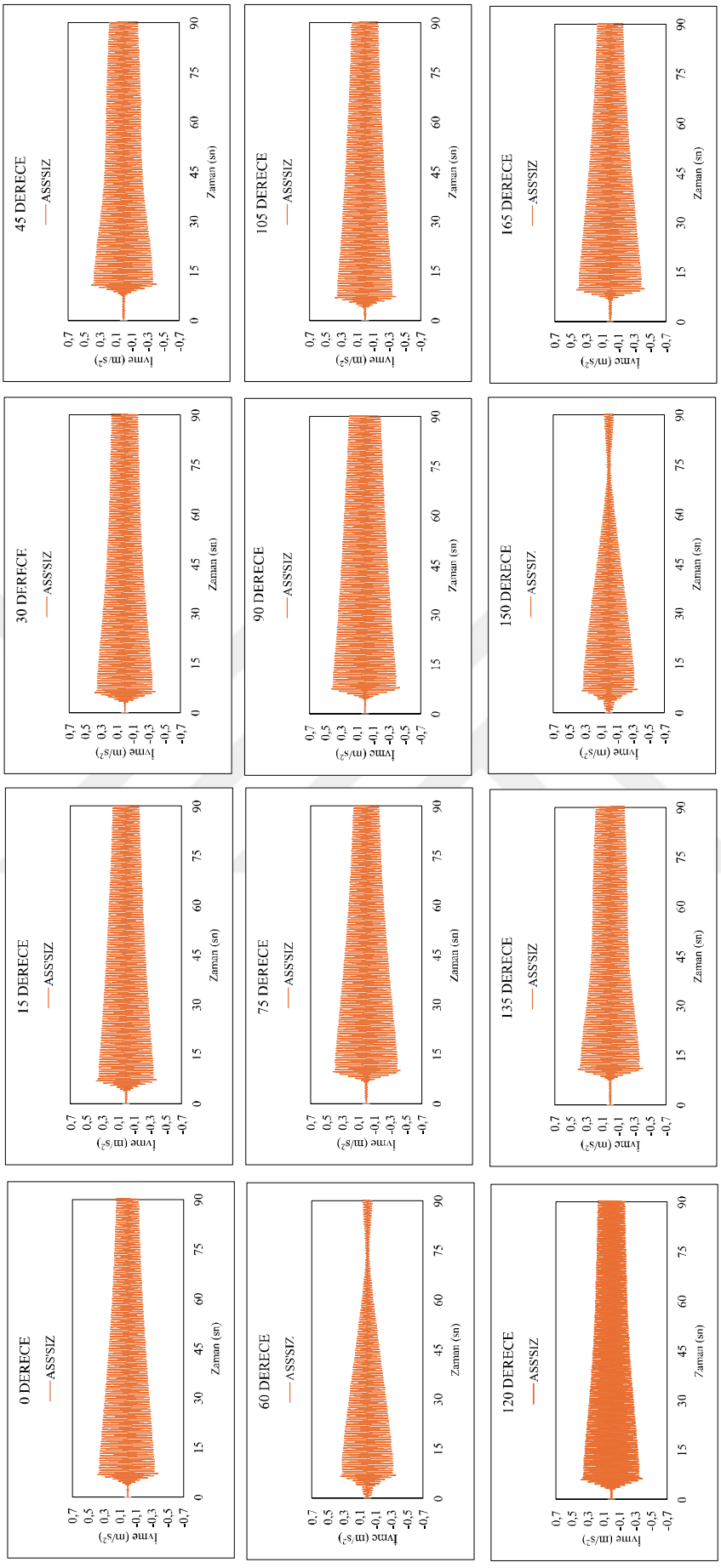
Şekil 32. Model binanın ASS'siz durumu için sarsma masası deneyleri



(a)

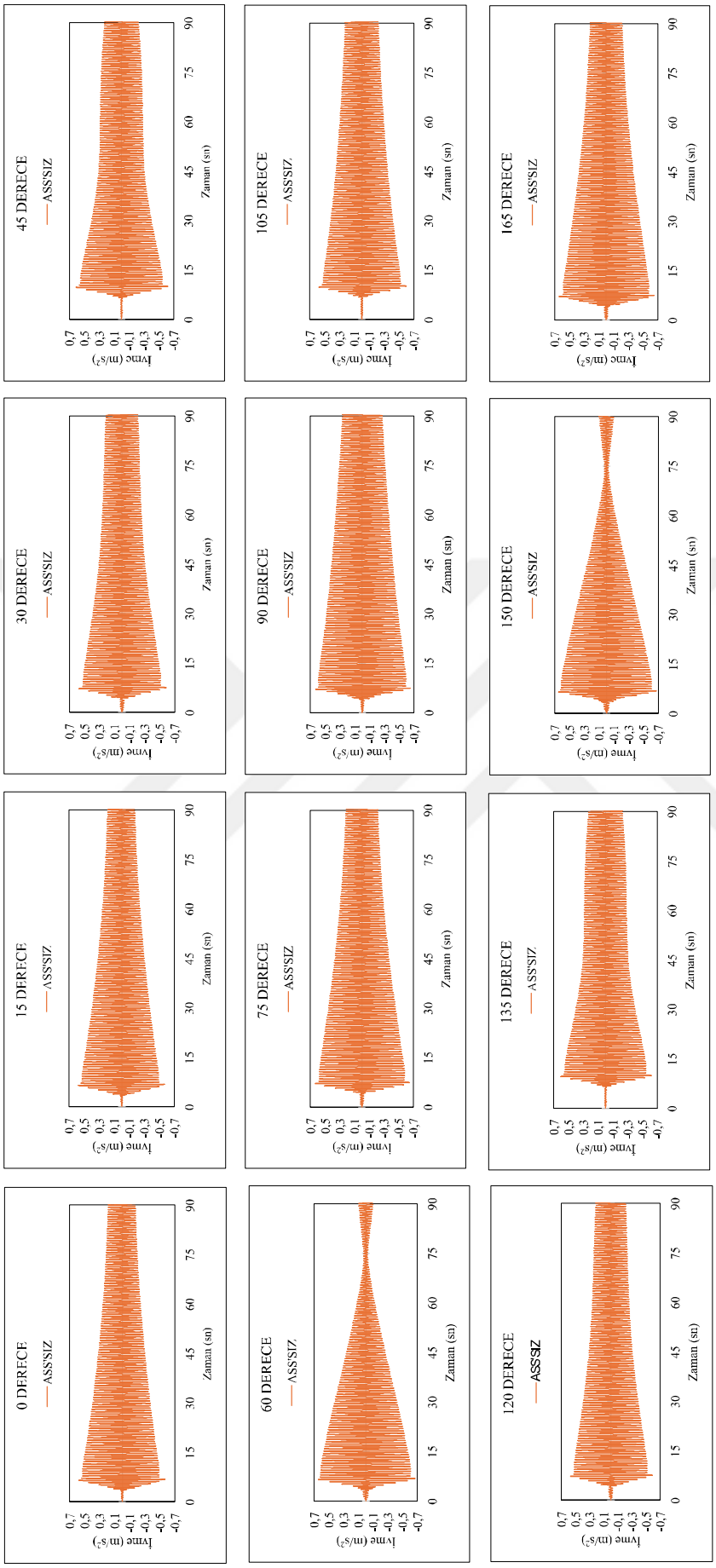
Şekil 33. Model binanın ASS'siz durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi

Şekil 33'ün devamı



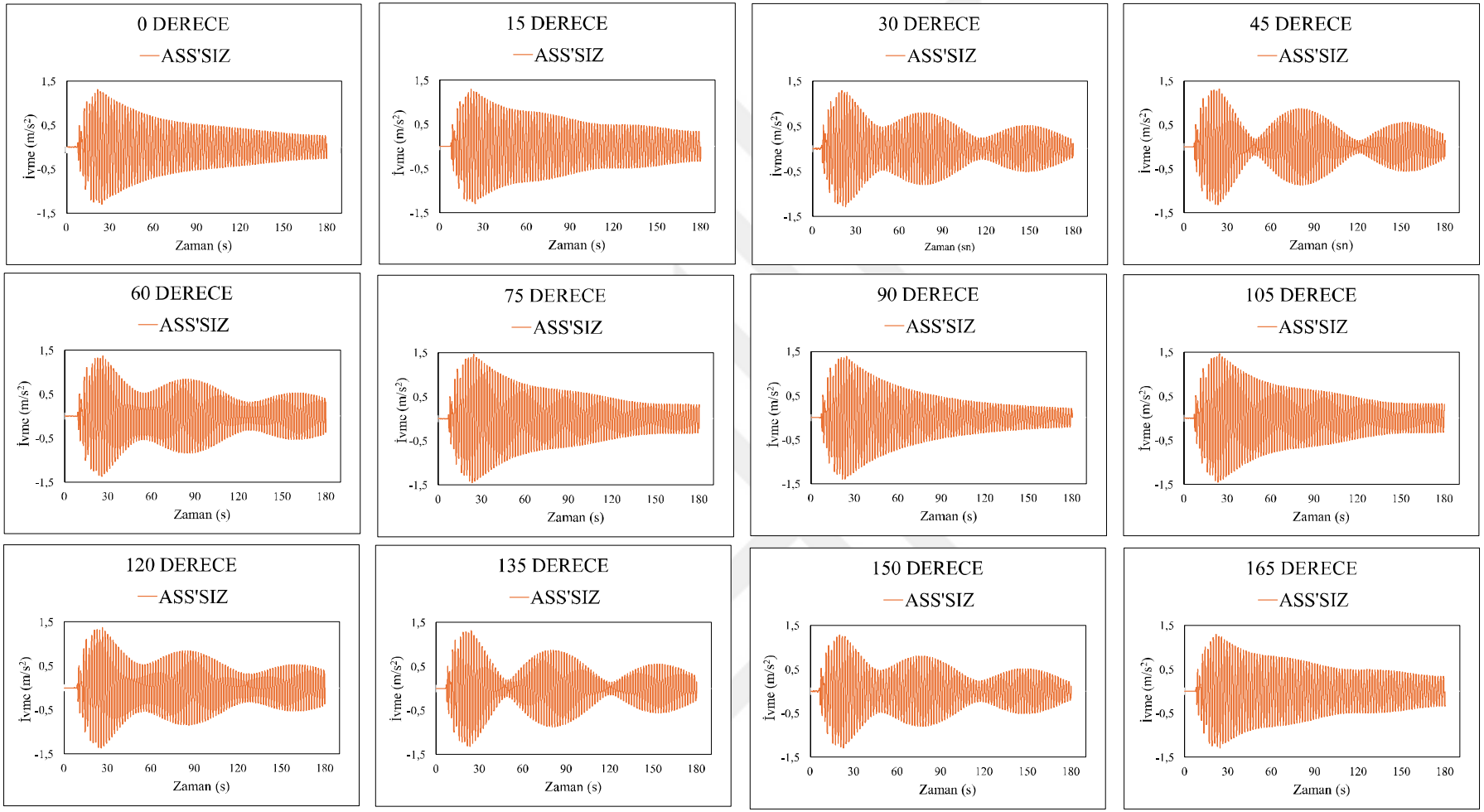
(b)

Şekil 33'ün devamı

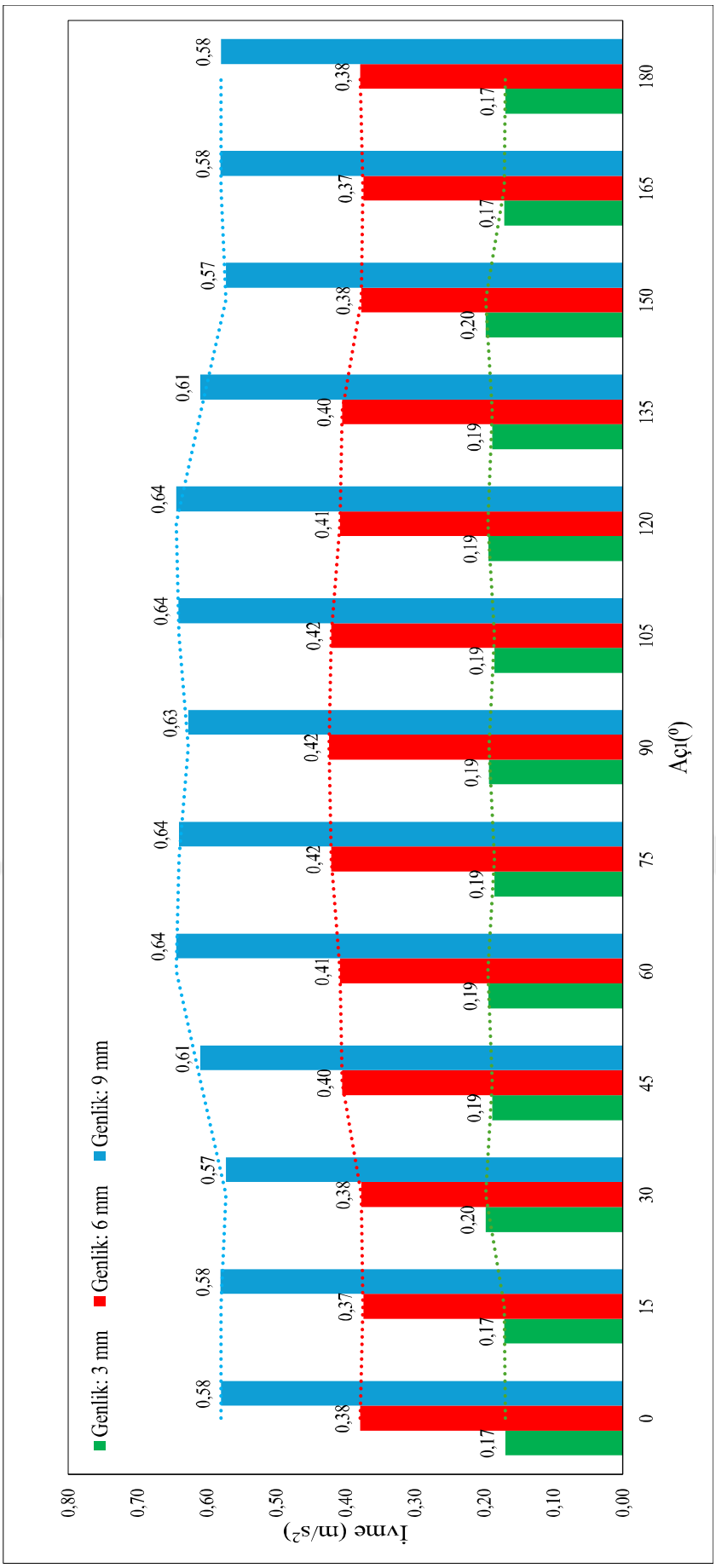


(c)

Şekil 33'ün devamı



(d)



Şekil 34. ASS'siz durum için harmonik hareketler neticesinde maksimum ivmelerin farklı açılarda değişimi

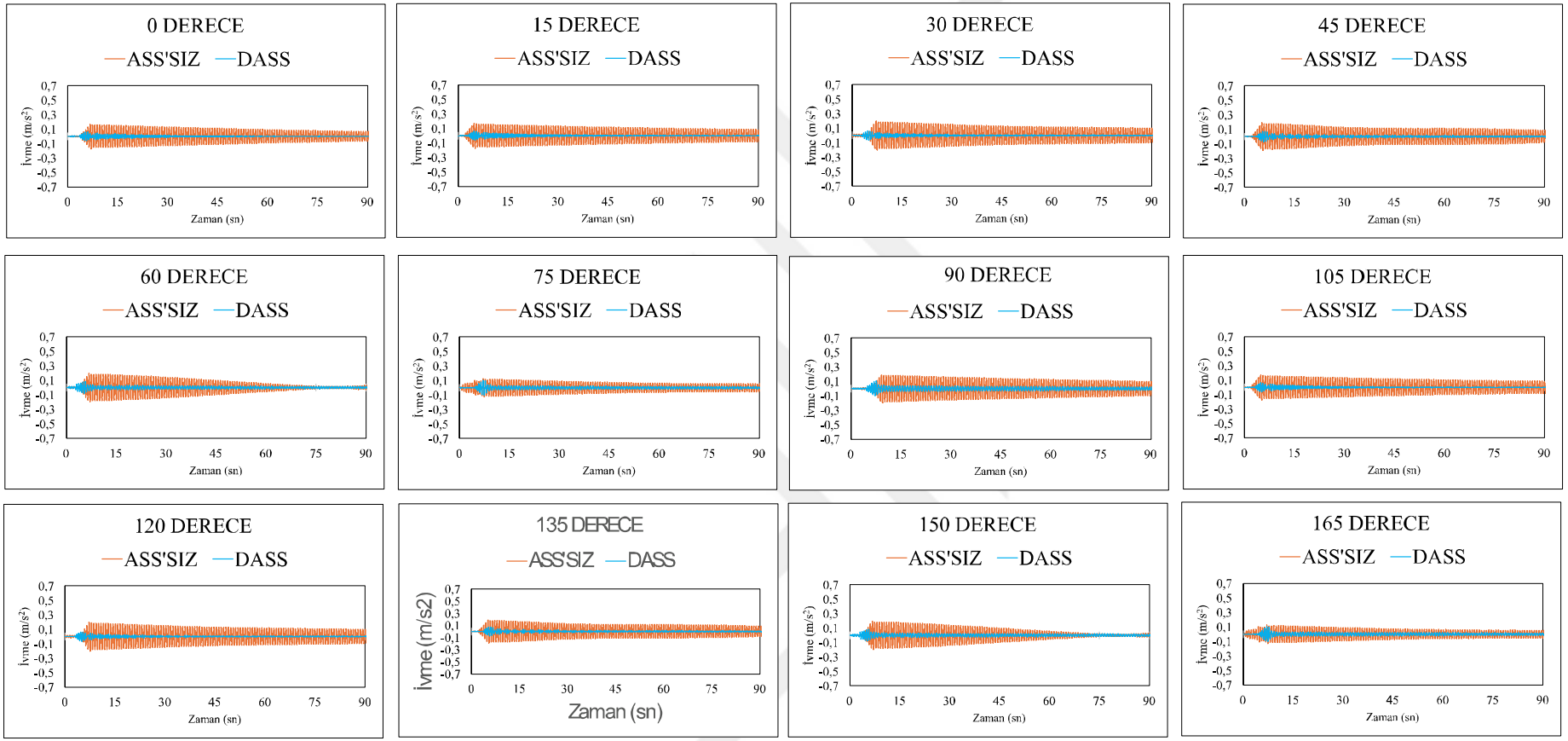
2.4.2. DASS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine DASS sistemi monte edildikten sonra (Şekil 35) harmonik hareketler ve Erzincan depremi için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 36). Şekil 36 incelendiğinde; DASS sistemi ivmeleri ve çarpılmayı belirgin bir şekilde azalttığı, DASS sistemde çakışma meydana geldiği (ek sönümleme sağlamak amacıyla, tanka akış sönümleme cihazları (FDD) yerleştirilebilir), DASS ile titreşimlerin daha hızlı sönümlendiği görülmektedir. Erzincan depremi, yüksek genlikli ve uzun süreli bir yer hareketine sahiptir. Bu nedenle sistemin dinamik tepkisi, harmonik dalgalara kıyasla daha karmaşık karakterdedir. Bu durumda da, ivme genlikleri ve çakışma ve çarpılma etkileri belirgin bir şekilde (özellikle 0°'de, örneğin 9 mm genlikli harmonik hareket etkisinde %62) düşmüştür. Ayrıca yapı titreşim süresi oldukça kısalmıştır. Şekil 37'de maksimum ivme ve sönüm oranı değerlerinin (bu değerler logaritmik azalım yöntemi ile hesaplanmıştır) farklı açı durumları için değişimi sunulmuştur. Şekilden görüleceği üzere DASS sistemin efektifliği, binanın farklı açılarda yer hareketine maruz kalması durumunda, artan açı değerleriyle birlikte azalmaktadır (maksimum ivmeler 0°'den 90°'ye artmakta, sönüm oranı değerleri ise azalmaktadır, 90°'den 180°'ye ise tersi durum söz konusudur). Erzincan depreminde ASS'siz sistemde maksimum ivme 0°'de 1.47 m/s^2 iken DASS'de 0.78 m/s^2'dir. ASS'siz sistemde sönüm oranı yaklaşık %1 civarında iken bu oran DASS sistemde %11 (Erzincan depreminde %8) mertebelerinde hesaplanmıştır.



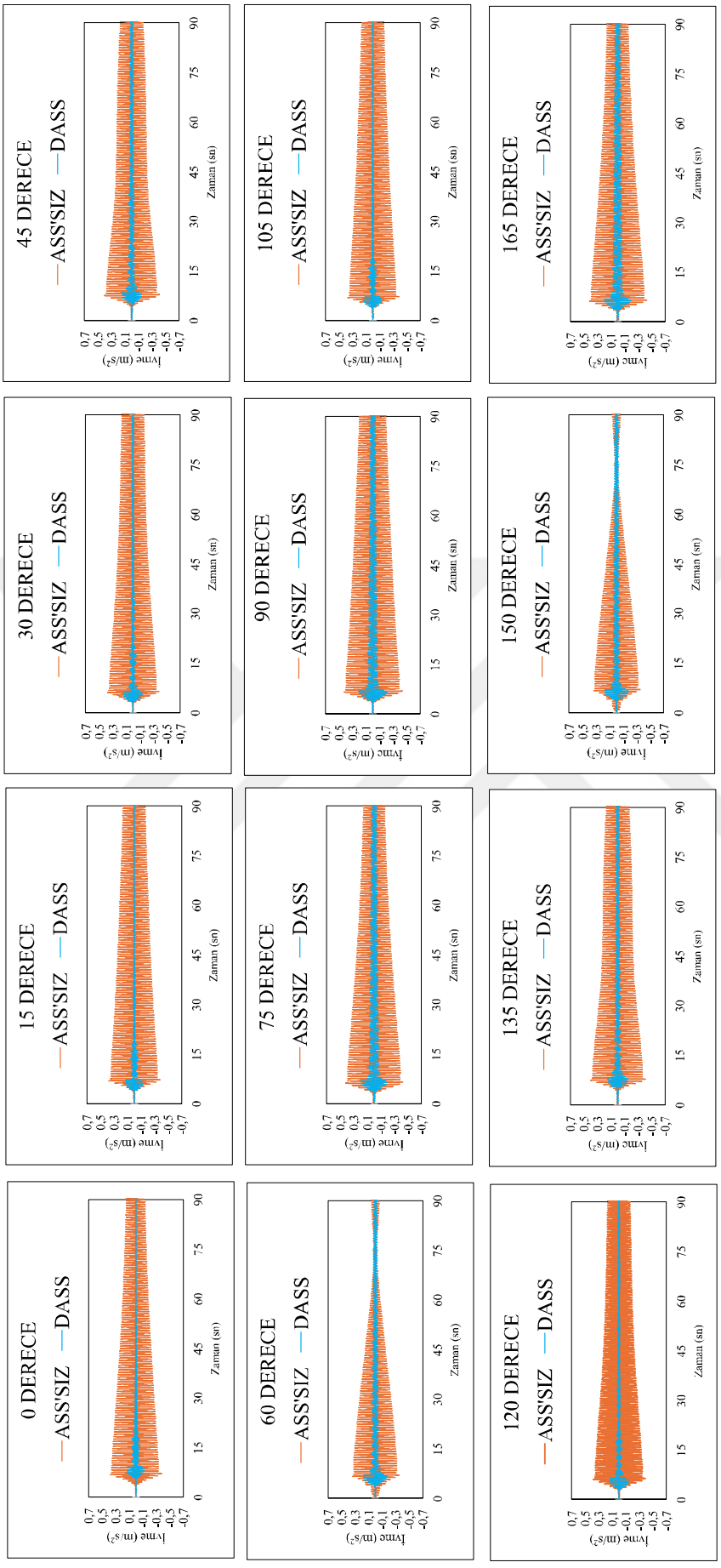
Şekil 35. Model binanın DASS durumu için sarsma masası deneyleri

Şekil 36. Model binanın DASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi

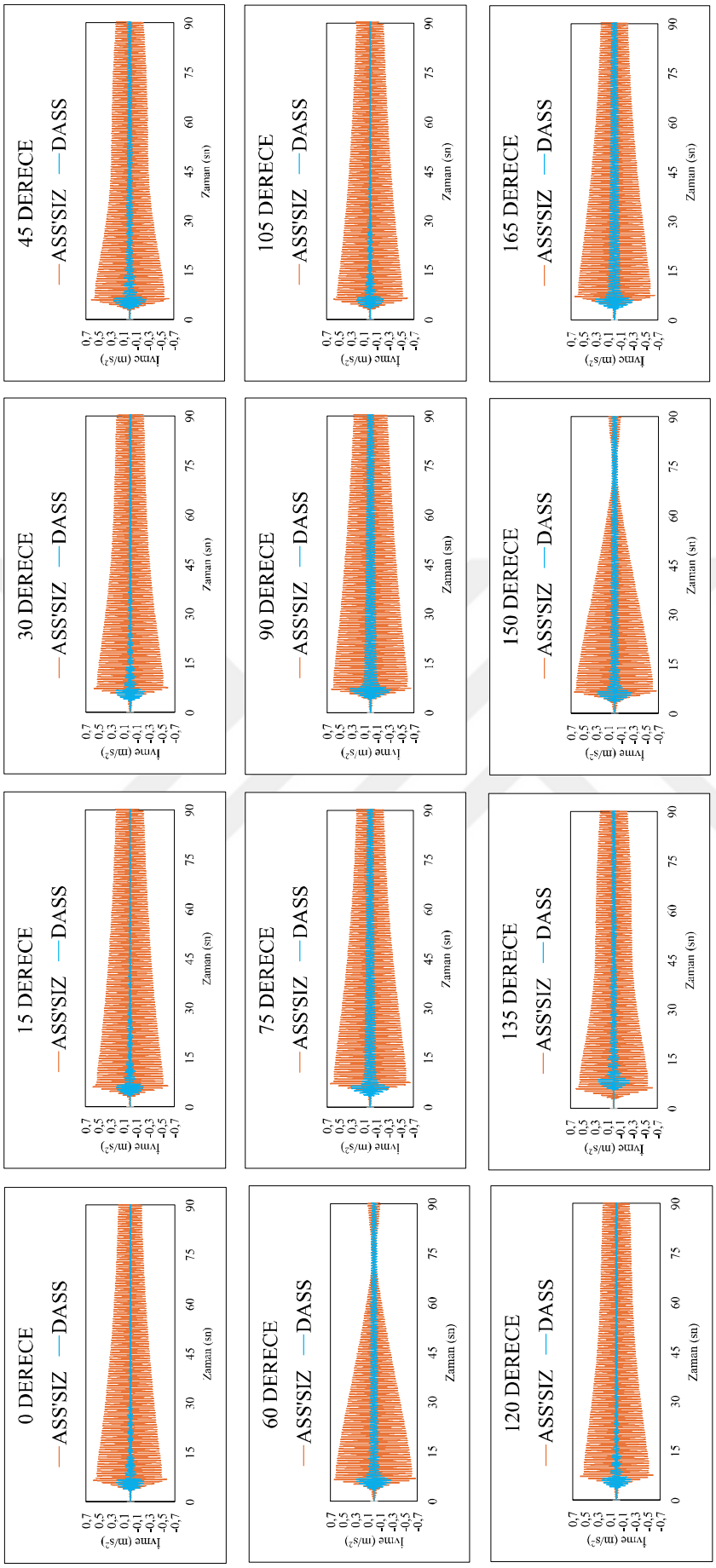


(a)

Şekil 36'nın devamı



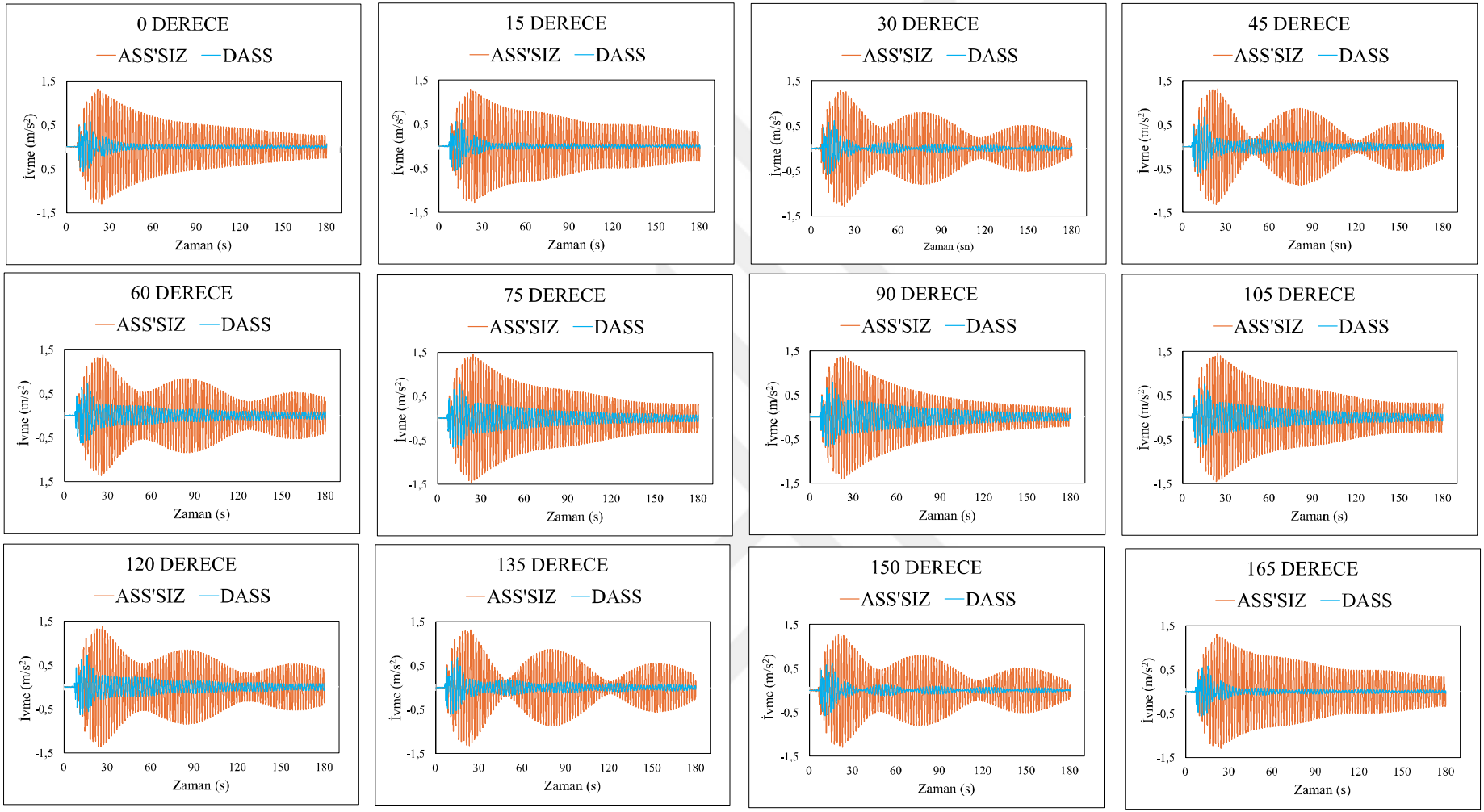
(b)



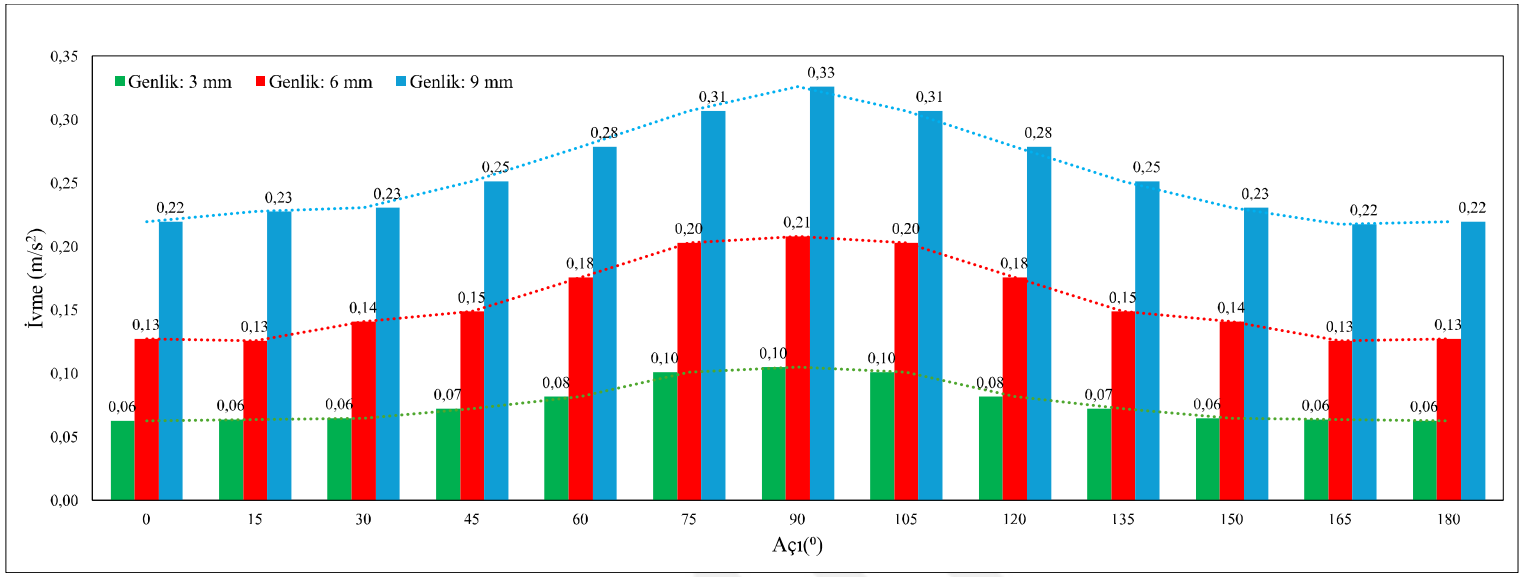
Şekil 36'nın devamı

(c)

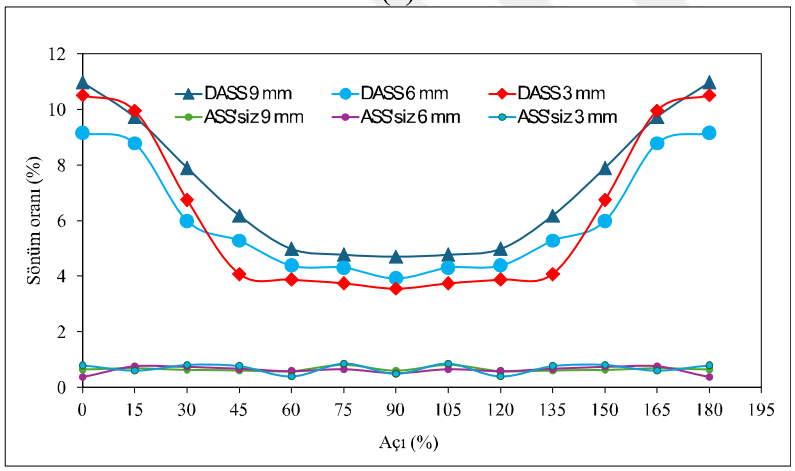
Şekil 36'nın devamı



(d)



(a)



(b)

Şekil 37. DASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi

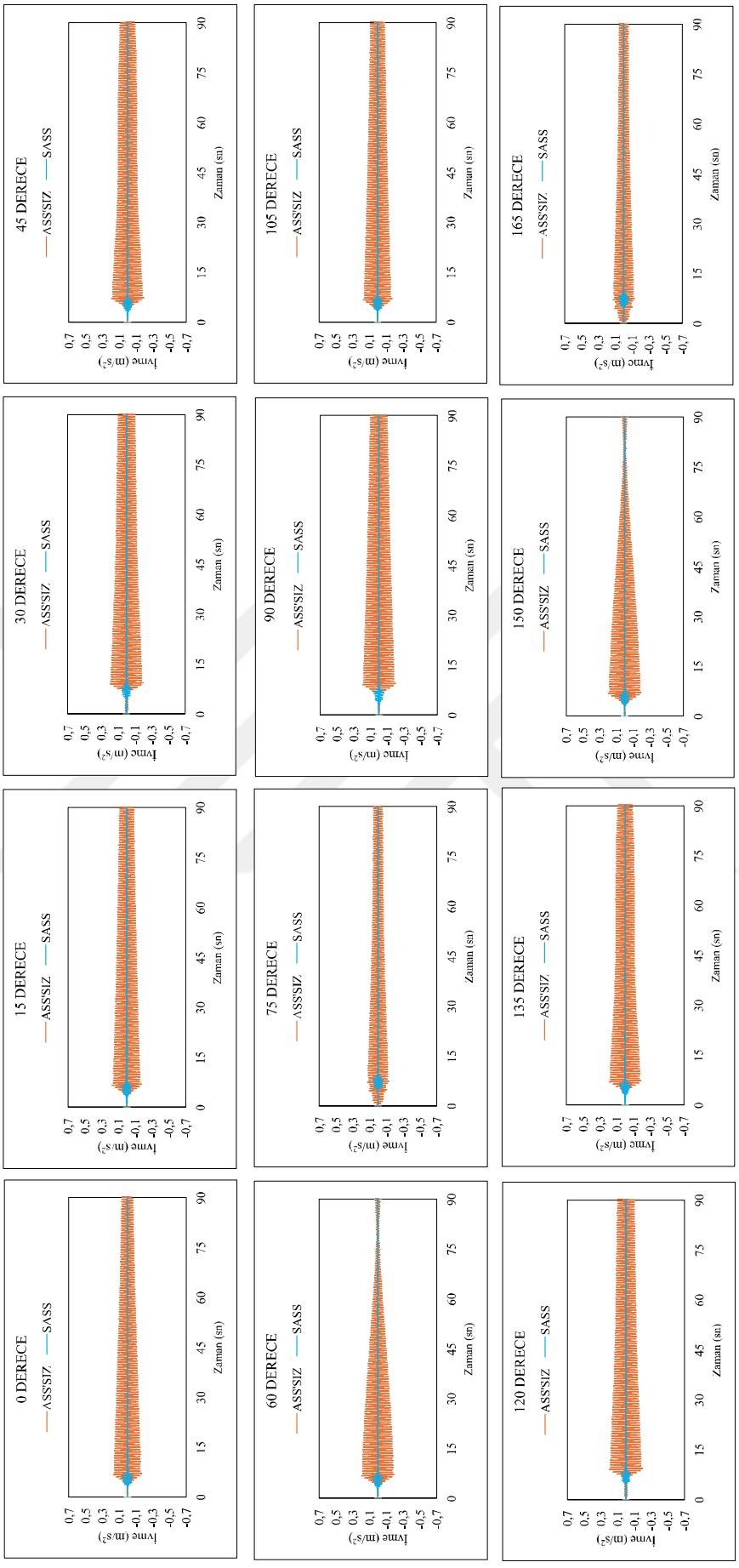
2.4.3. SASS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine SASS sistemi monte edildikten sonra (Şekil 38) harmonik hareketler için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 39). Şekil 39'dan görüleceği üzere ivmeler SASS ile belirgin azalmıştır. Örneğin: 0°'de maksimum ivmeler 9 mm genlik durumunda 0.58 m/s^2 ivme, 0.20 m/s^2'e; 6 mm genlik durumunda 0.38 m/s^2 ivme, 0.13 m/s^2'e; 3 mm genlik durumunda 0.17 m/s^2 ivme, 0.016 m/s^2'e düşmüştür. Maksimum ivmeler yaklaşık %65 azalmıştır. Bu durum tüm açı durumları için benzerdir (Şekil 40). Şekil 40'dan SASS sistemin yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunda efektifliğinin değişmediği tespit edilmiştir. SASS sistemde belirgin olmasa da çakışma meydana geldiği, SASS ile titreşimlerin hızlıca sönümlendiği ve çarpma etkisinin minimize edildiği görülmektedir. Şekil 39'da maksimum ivme ve sönüm oranı değerlerinin (bu değerler logaritmik azalım yöntemi ile hesaplanmıştır) farklı açı durumları için değişimi sunulmuştur. Şekilden görüleceği üzere SASS sistemin efektifliği, binanın farklı açılarda yer hareketine maruz kalması durumunda, artan açı değerleriyle birlikte değişmemektedir. Sönüm oranı maksimum 9 mm genlikte yaklaşık % 9 mertebelerinde hesaplanmıştır.



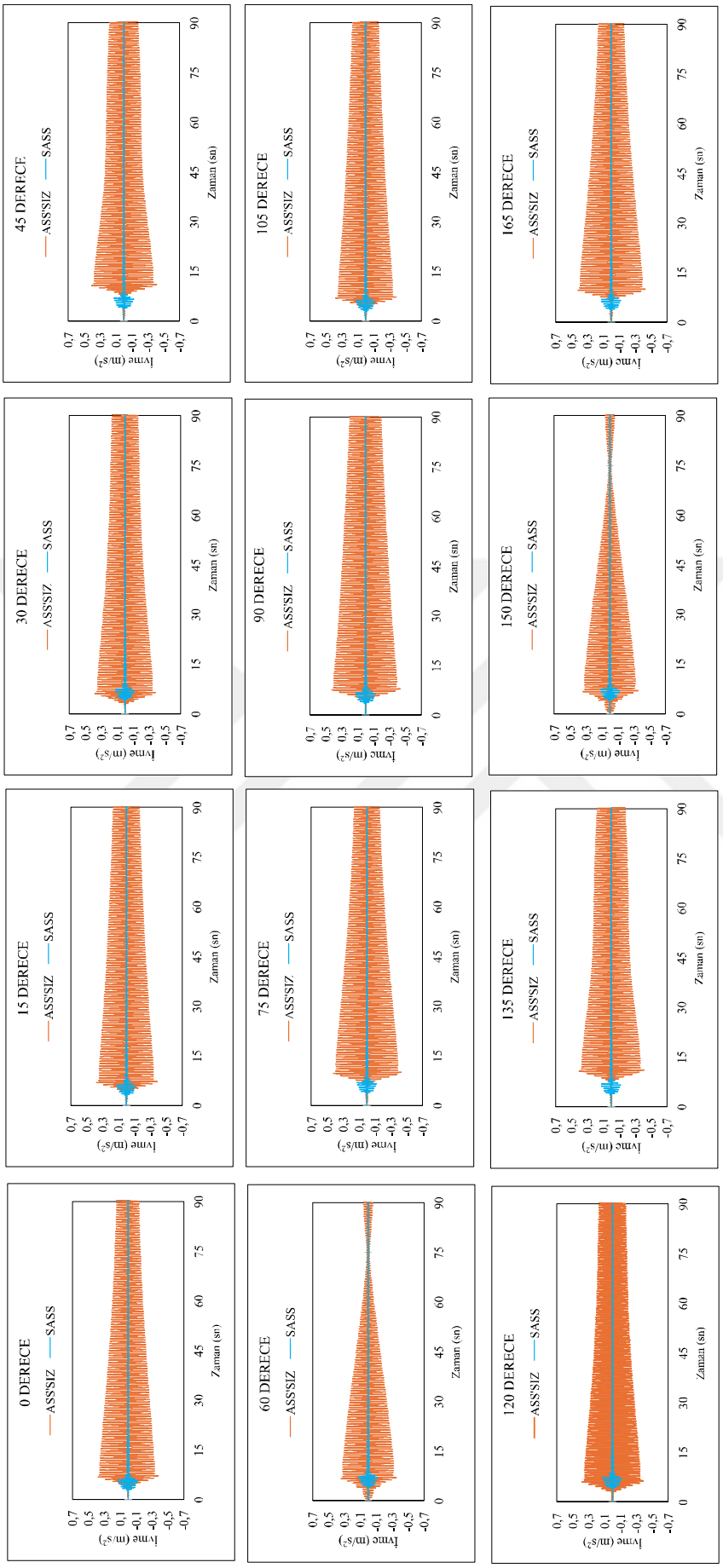
Şekil 38. Model binanın DASS durumu için sarsma masası deneyleri

Şekil 39. Model binanın SASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri:
(a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik



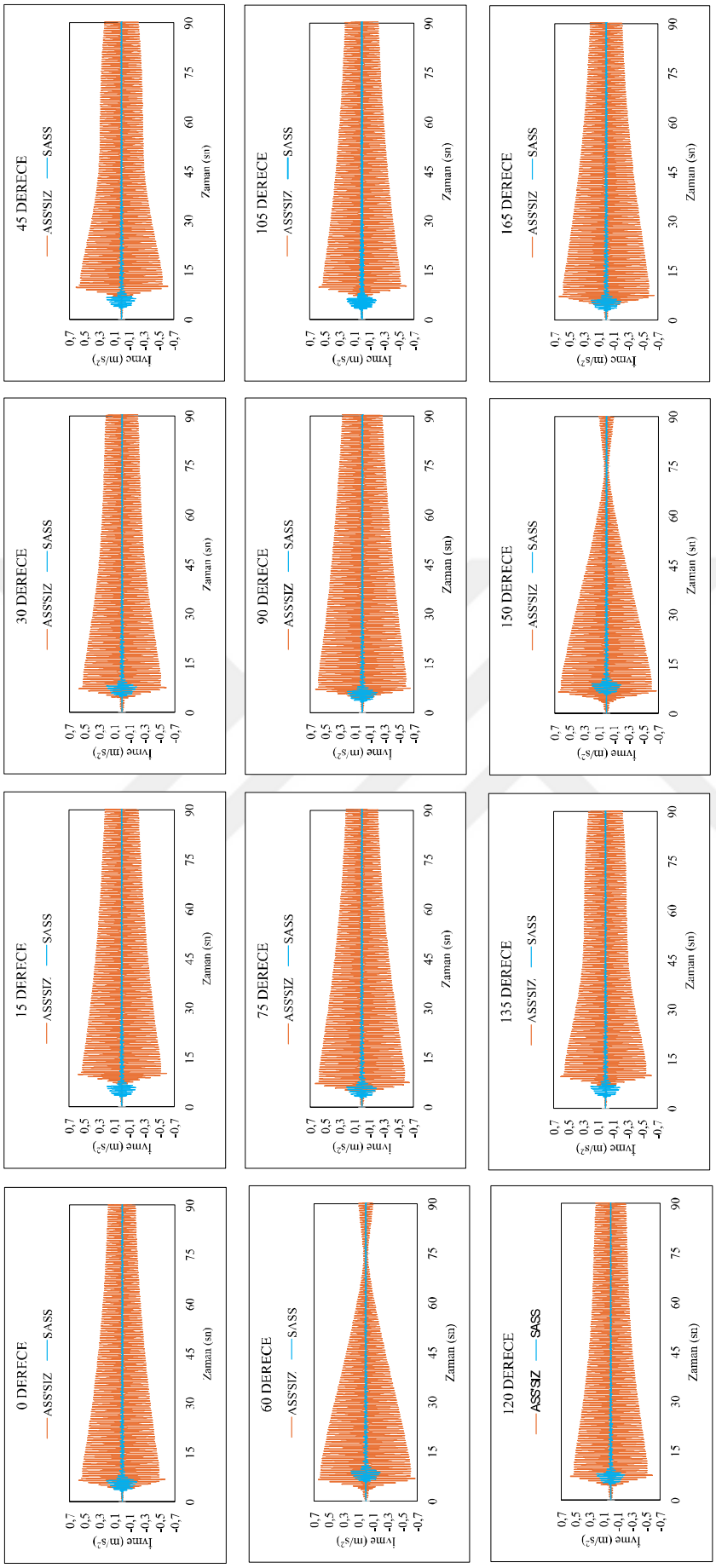
(a)

Şekil 39'un devamı

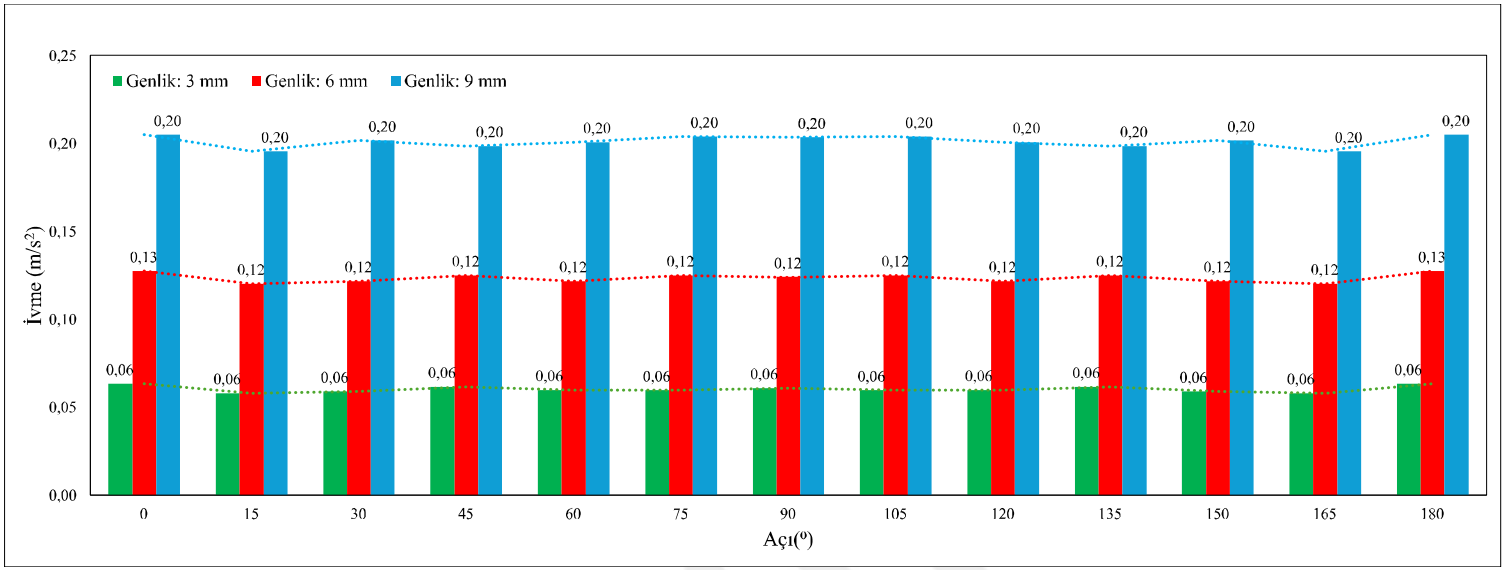


(b)

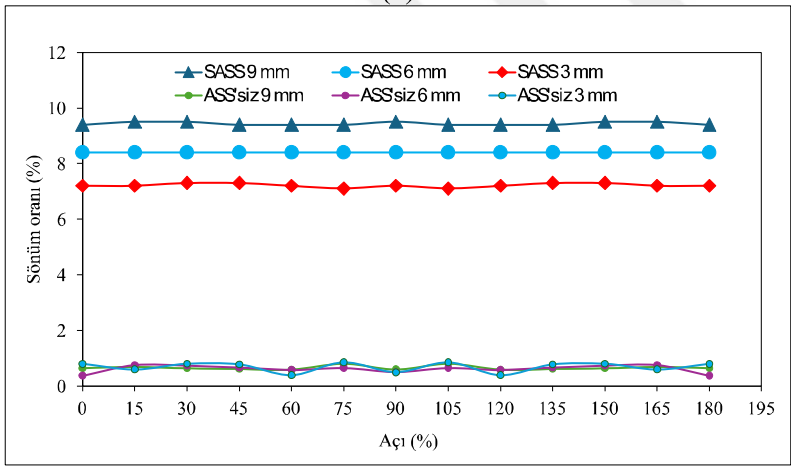
Şekil 39'un devamı



(c)



(a)



(b)

Şekil 40. SASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi

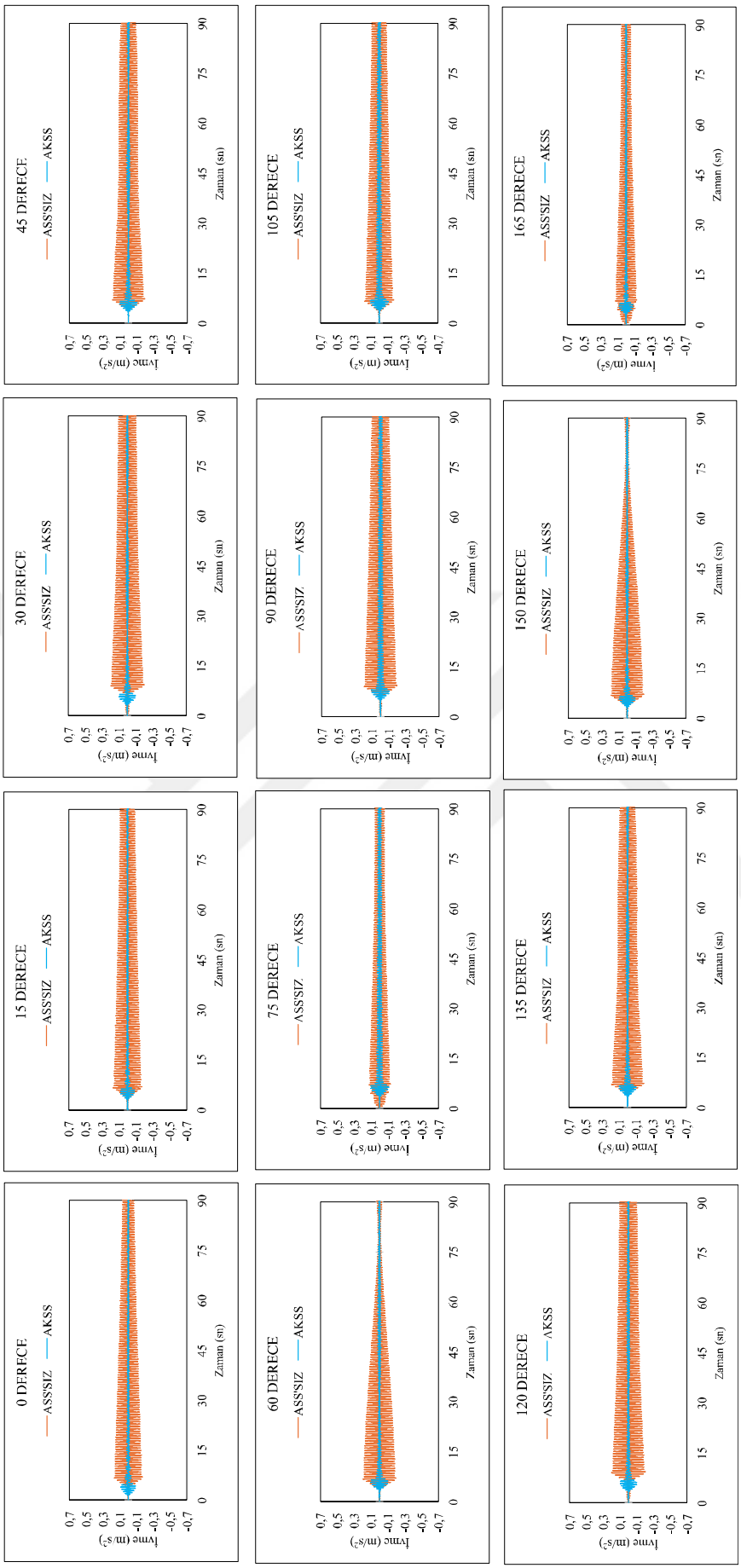
2.4.4. AKSS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine AKSS sistemi monte edildikten sonra (Şekil 41) harmonik hareketler için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 42). Şekil 42 incelendiğinde; AKSS sistemi ivmeleri 0°'de (180°) ve titreşim süresi belirgin azalmıitır. Farklı açılarda da ivmelerde nispeten azalma meydana gelmesine rağmen AKSS sistemin efektifliği, binanın farklı açılarda yer hareketine maruz kalması durumunda, artan açı değerleriyle birlikte azalmaktadır (Şekil 43). AKSS'nin etkinliği genliğe bağlı olarak değişmemiş, yani sistem lineer ve kararlı sönüm davranışı sergilemiştir. Bu AKSS sisteminin tasarımının rezonans frekansına uygun şekilde optimize edildiğini göstermektedir. 9 mm genlikli harmonik hareket etkisinde 30°, 45°, 120°, 135°, 150° açı durumunda sistemde çakışma olayı gözlemlenmiştir. Maksimum ivmeler, yer hareketinin 0° etkimesi durumunda 3 mm genlikli harmonik hareket etkisinde %53, 6 mm genlikli harmonik hareket etkisinde %51 ve 9 mm genlikli harmonik hareket etkisinde % 50 azalmıştır. Sönüm oranı değerleri ise açı artışı ile birlikte belirgin azalmaktadır (0°'den 90°) (Şekil 43). Makismım sönüm oranı her bir yer hareketi etkisinde depremin 0° etkimesi durumunda yaklaşık %10 mertebelerinde elde edilmiştir.



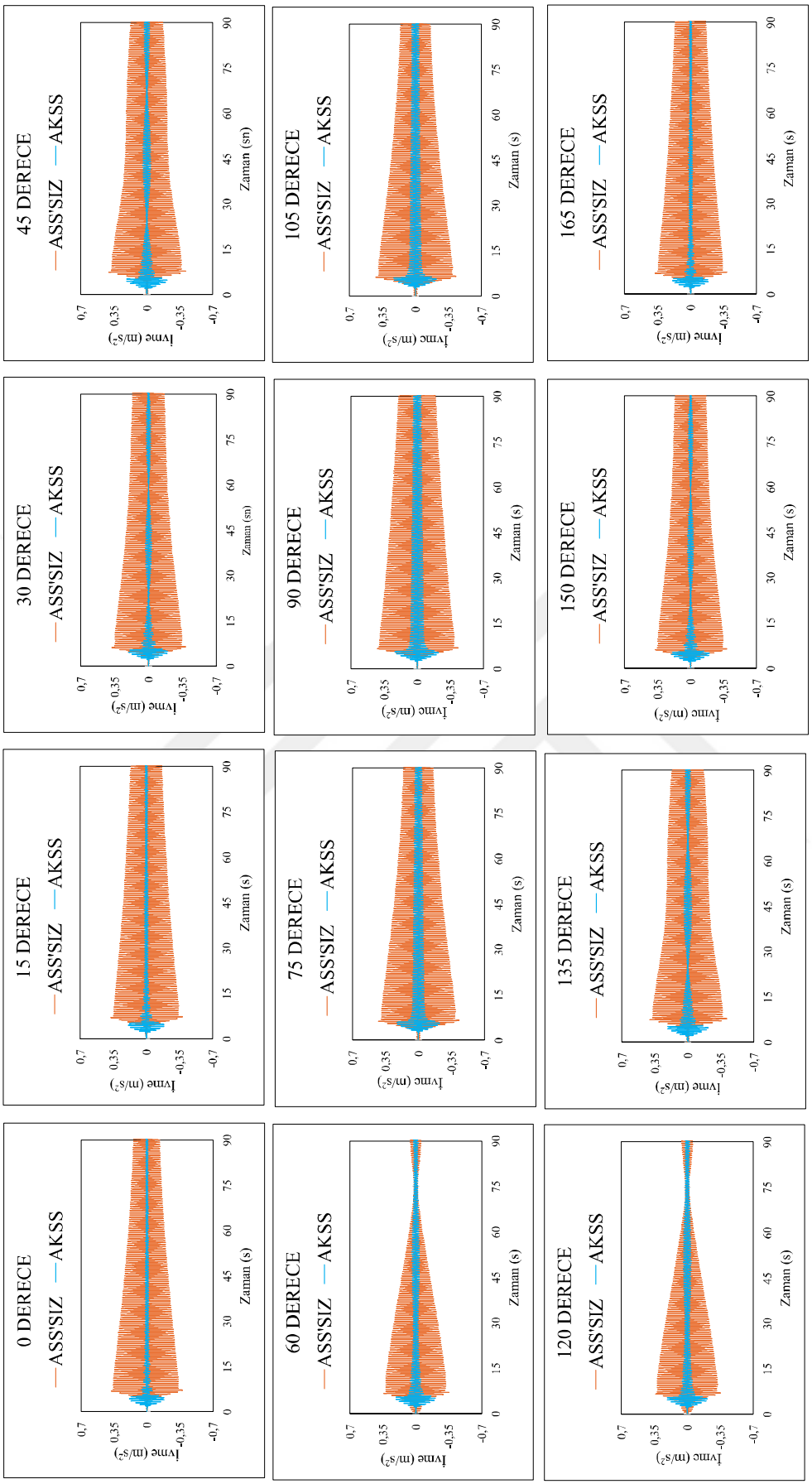
Şekil 41. Model binanın AKSS durumu için sarsma masası deneyleri

Şekil 42. Model binanın AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri:
(a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik



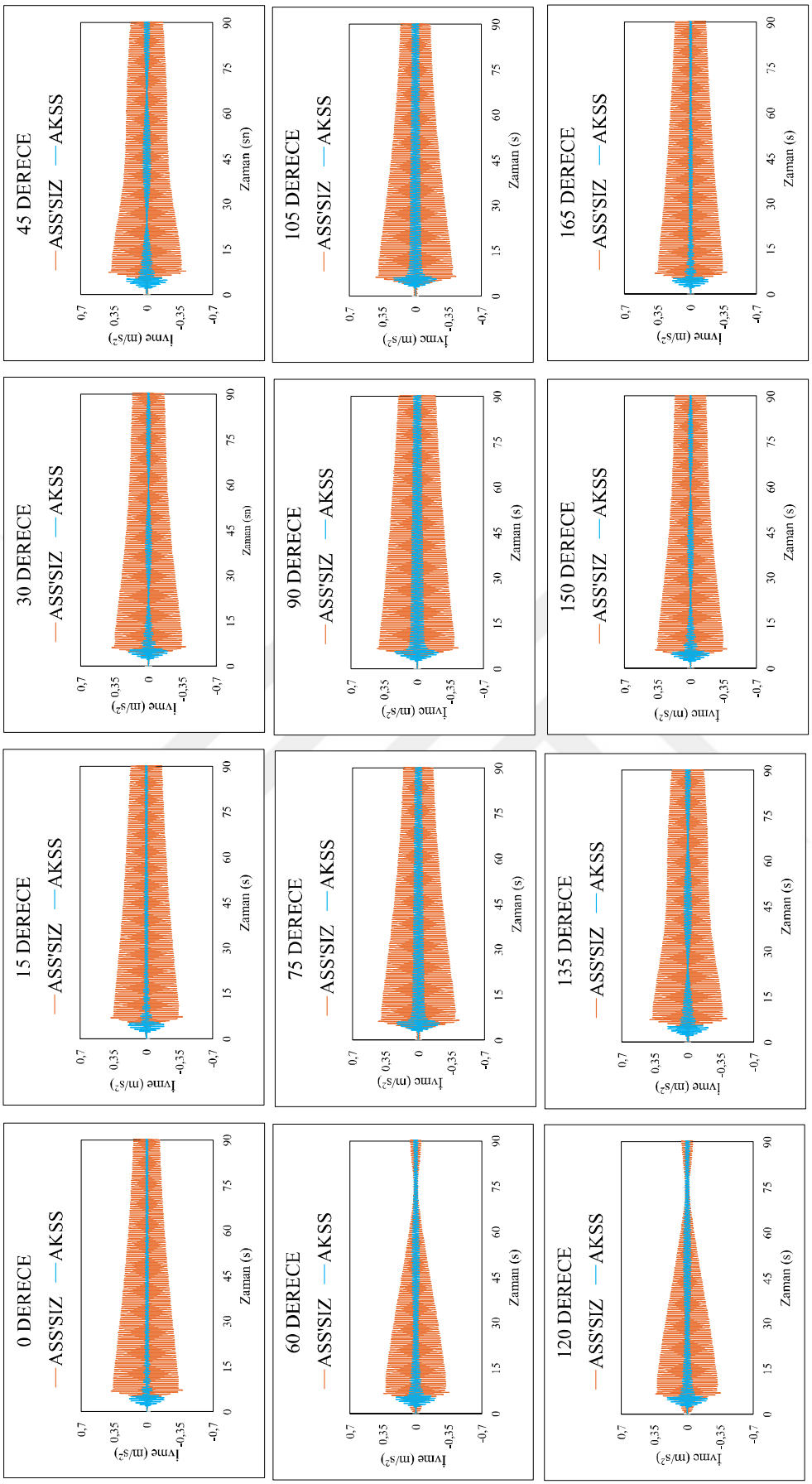
(a)

Şekil 42'nin devamı

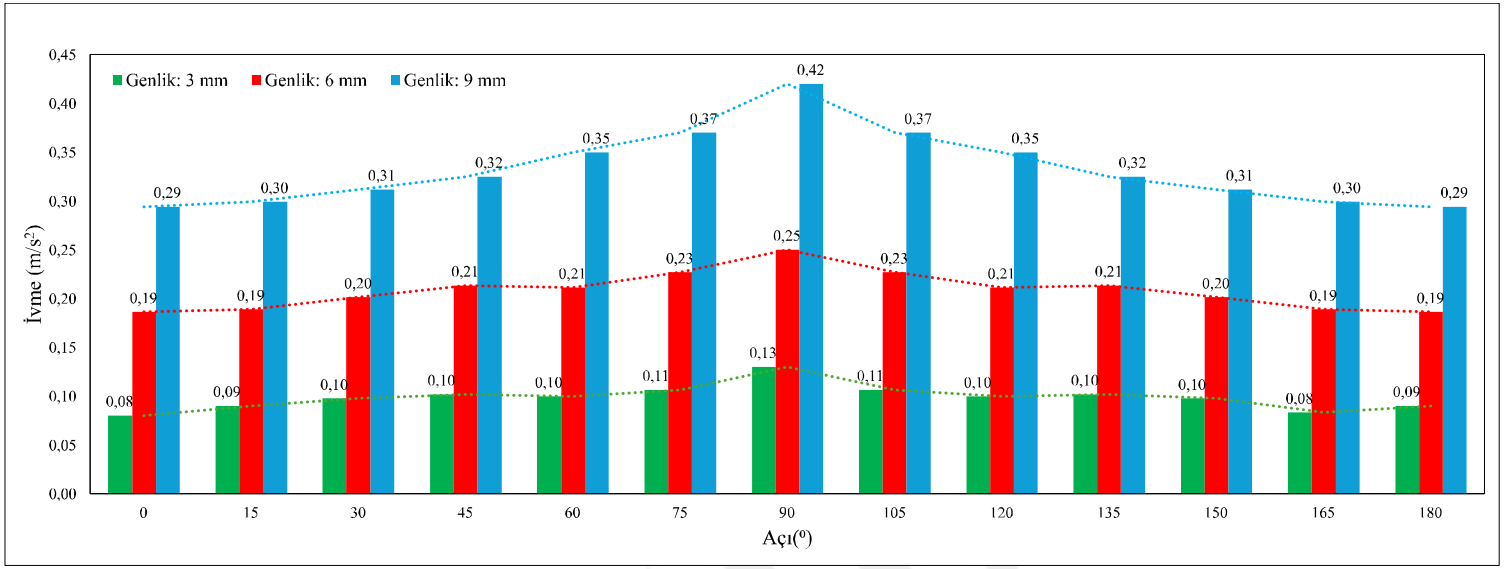


(b)

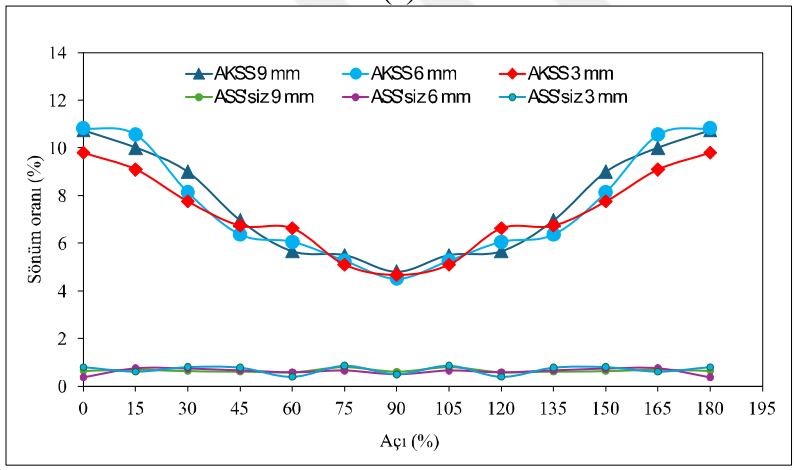
Şekil 42'nin devamı



(c)



(a)



(b)

Şekil 43. AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi

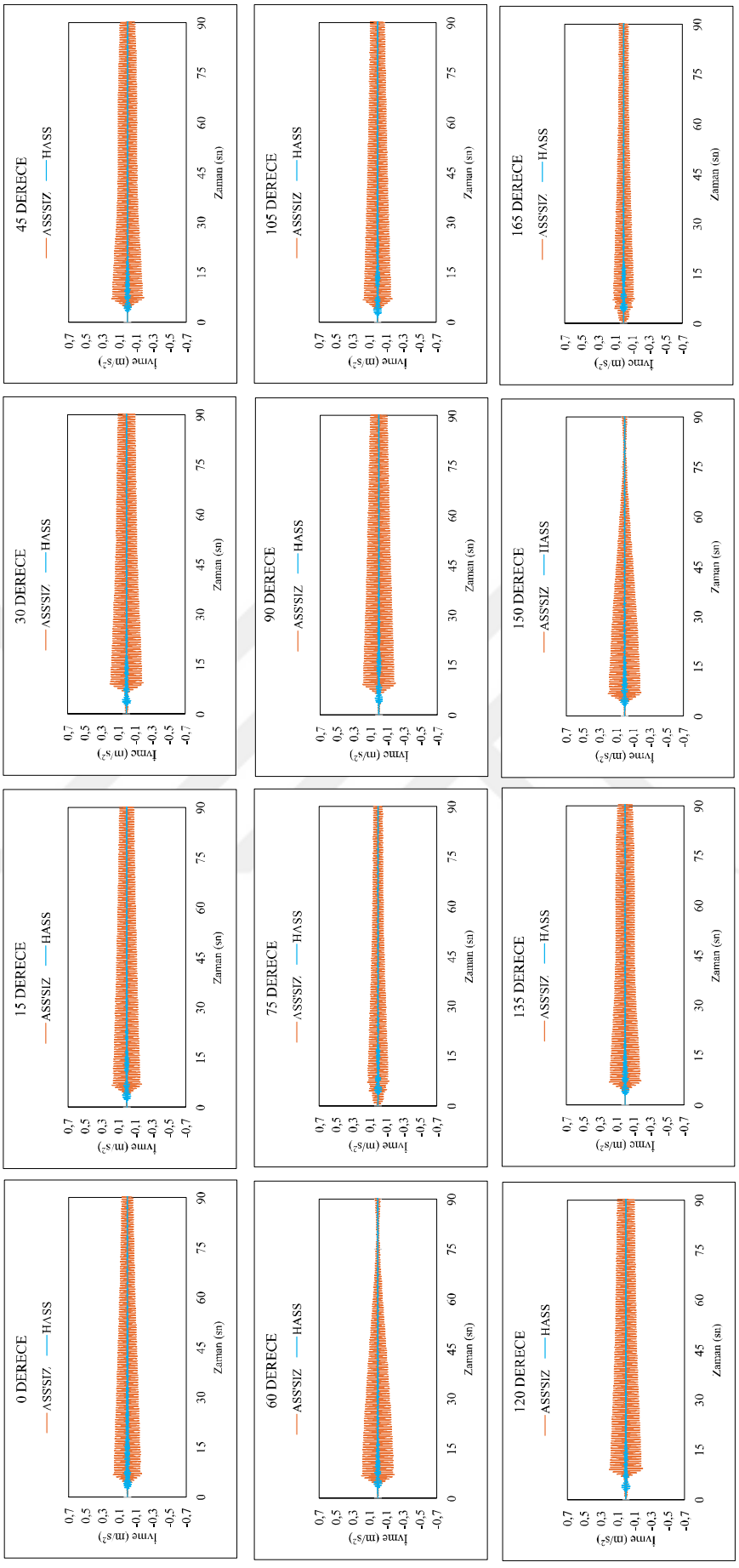
2.4.5. HASS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine HASS sistemi monte edildikten sonra (Şekil 44) harmonik hareketler ve Erzincan depremi için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 45). Şekil 45 incelendiğinde; HASS sisteminin 3 farklı harmonik hareket ve Erzincan depremi için her bir açı durumunda ivmeleri çok belirgin bir şekilde azalttığı, özellikle Erzincan depreminde ASS'siz sistemde 30° 45°, 60°, 120°, 135° ve 150° açılarda meydana gelen çarpılma etkisini neredeyse ortadan kaldırdığı, herhangi bir açı durumunda çakışma durumunun meydana gelmediği görülmektedir. Ayrıca HASS'nin, yönden bağımsız ve kararlı dinamik davranışları sayesinde, gerçek farklı tip yer hareketleri altında yüksek verimle enerji sönümleme kapasitesine sahip olduklarını tespit edilmiştir (Şekil 46). Maksimum ivmeler HASS sistem ile birlikte; harmonik hareketler etkisinde yaklaşık %72 (0.58 m/s^2'den 0.16 m/s^2'ye) azalmıştır. Erzincan depreminde ASS'siz sistemde maksimum ivme 0°'de 1.47 m/s^2 iken HASS'de 0.42 m/s^2'dir. ASS'siz sistemde sönüm oranı yaklaşık %1 civarında iken bu oran HASS sistemde %7 (Erzincan depreminde %25) mertebelerinde hesaplanmıştır. HASS sistemi küçük genliklerde lineer, büyük genliklerde ise doğrusal olmayan sönüm etkisiyle yüksek verimli bir titreşim kontrol mekanizması oluşturduğu belirlenmiştir.



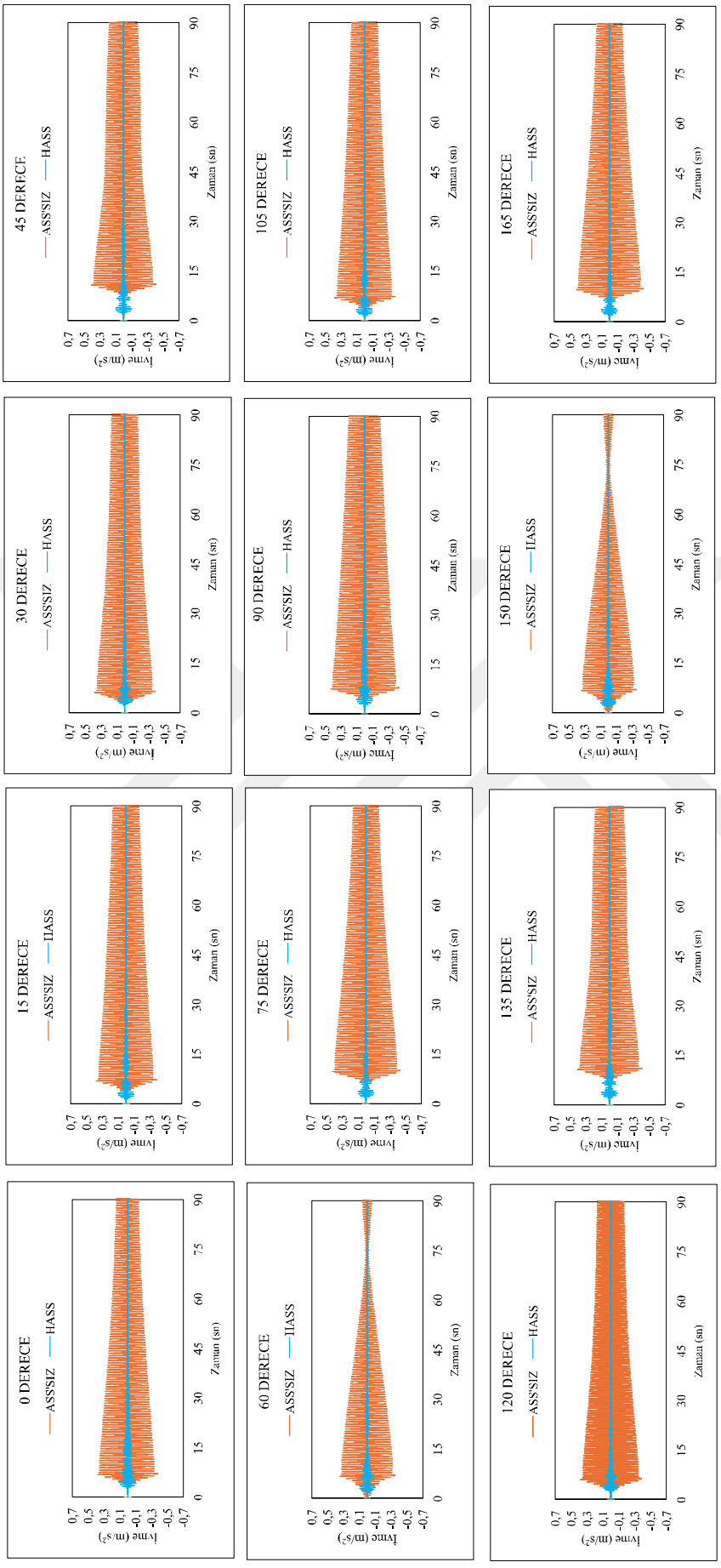
Şekil 44. Model binanın HASS durumu için sarsma masası deneyleri

Şekil 45. Model binanın HASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri:
(a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi



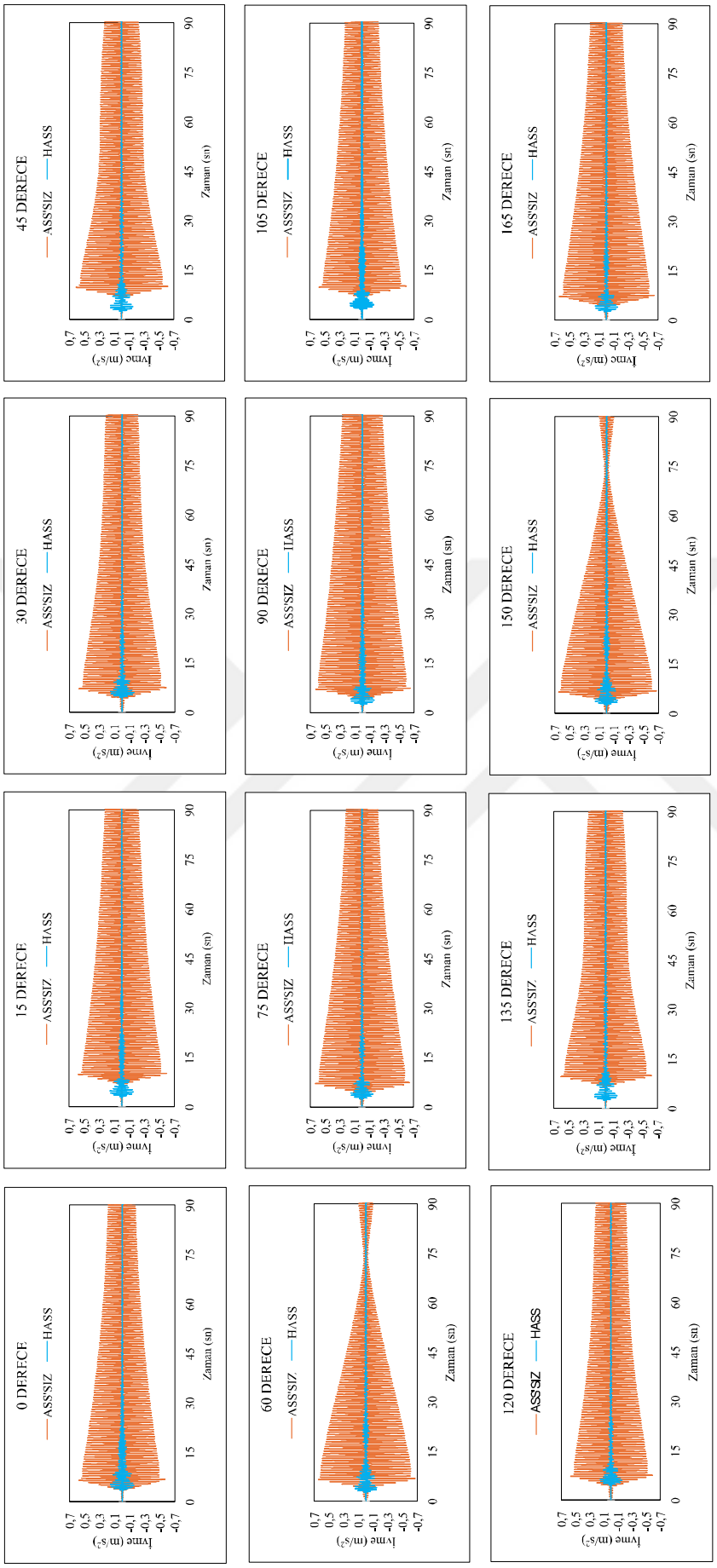
(a)

Şekil 45'in devamı

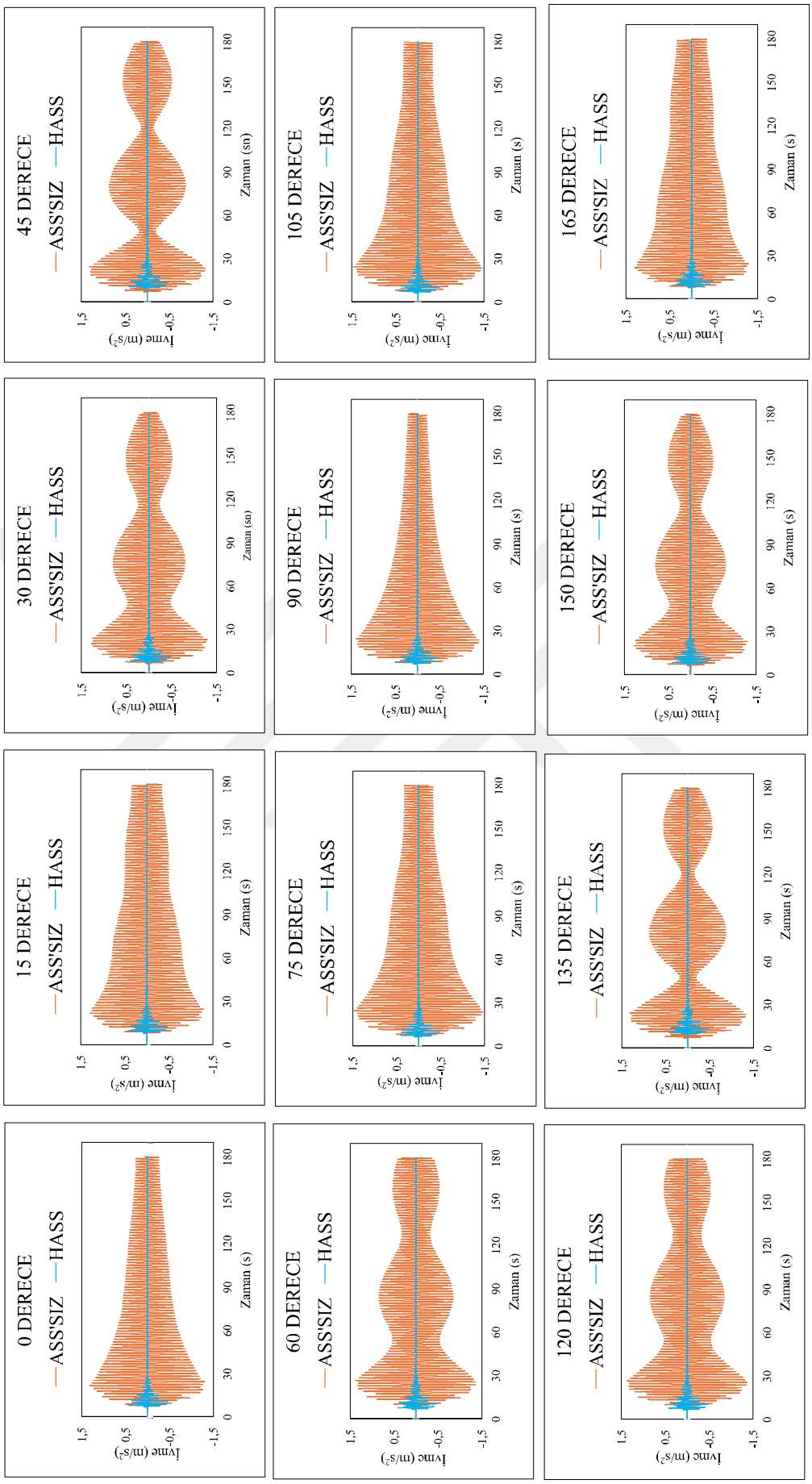


(b)

Şekil 45'in devamı

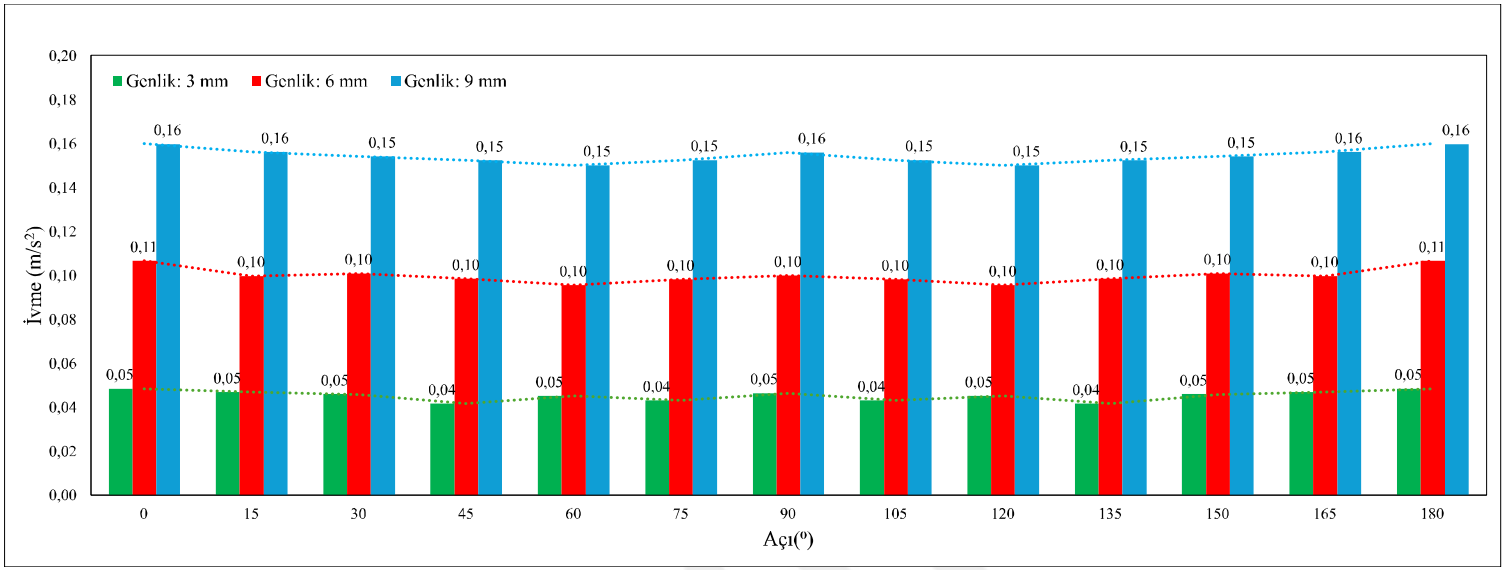


(c)

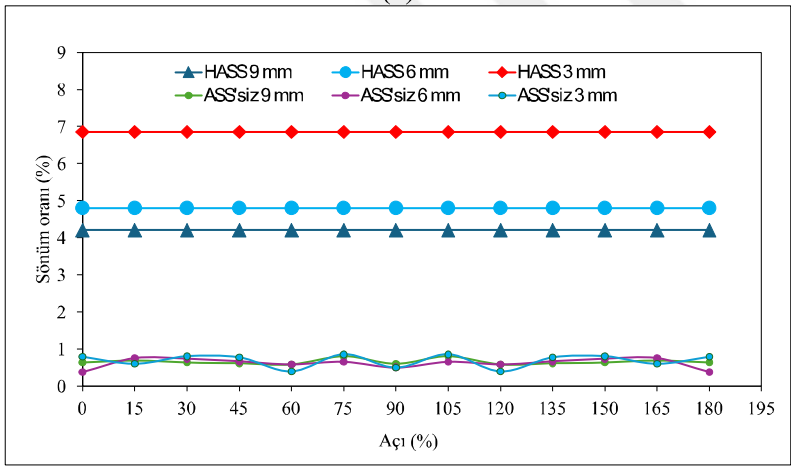


Şekil 45'in devamı

(d)



(a)



(b)

Şekil 46. HASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranlarının farklı açılarda değişimi

2.4.6. 4-AKSS ve 4-AKSS* İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine 4-AKSS ve 4-AKSS* (Şekil 47) sistemleri monte edildikten sonra harmonik hareketler ve Erzincan depremi (4-AKSS*) için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 48-49). Şekil 48 ve Şekil 49'da görüleceği üzere her iki sistem ivmeleri depremin farklı açılarda etkimesi durumunda açıdan bağımsız olarak belirgin şekilde azaltmıştır (Şekil 50-51). 4-AKSS sistemi maksimum ivmeleri 3 mm harmonik hareket etkisinde %61, 6 mm harmonik hareket etkisinde % 61 ve 9 mm harmonik hareket etkisinde %60 mertebesinde azaltmıştır. Bu durum 4-AKSS* sisteminde sırasıyla %64, %67 ve %67 olarak elde edilmiştir. Her iki sistemde de (4-AKSS ve 4-AKSS*) sönüm oranı (Şekil 50-51), sönümleyicisiz duruma göre oldukça yüksek çıkmıştır. ASS'siz durumda sönüm oranı %0.5-1.5 aralığında, yani yapı doğal sönümü seviyesindedir. 4-AKSS ve 4-AKSS* sistemlerinde sönüm oranı yaklaşık %4-11 aralığında değişmekte olup, sistemin yapı titreşimlerini önemli ölçüde bastırdığı açıkça görülmektedir. Ayrıca sönüm oranı değerleri (4-AKSS'de yaklaşık %9, 4-AKSS*'da %11 mertebelerinde) yüksek genliklerde daha büyük elde edilmiştir. Erzincan depremi etkisinde ASS'siz durumda elde edilen maksimum ivme 1.46 m/s^2 iken 4-AKSS* sistemde 0.48 m/s^2 olarak elde edilmiştir. Her iki sistemde de çarpılma ve çakışma durumları belirgin bir şekilde bastırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, 4-AKSS* sisteminin yapı titreşimlerinin sönümlenmesinde 4-AKSS sistemine kıyasla daha fazla etkinlik sağladığı görülmüştür. Her iki sistemde çarpma etkisi baskılansa da 4-AKSS* sisteminde bu etki daha belirgin baskılanmıştır. 4-AKSS daha yumuşak ve yayvan bir sönüm sunarken, 4-AKSS* daha agresif ve hızlı sönümleme yapar; bu da onu yüksek frekans bileşenlerinde ve yüksek enerji seviyelerinde daha avantajlı kılar.

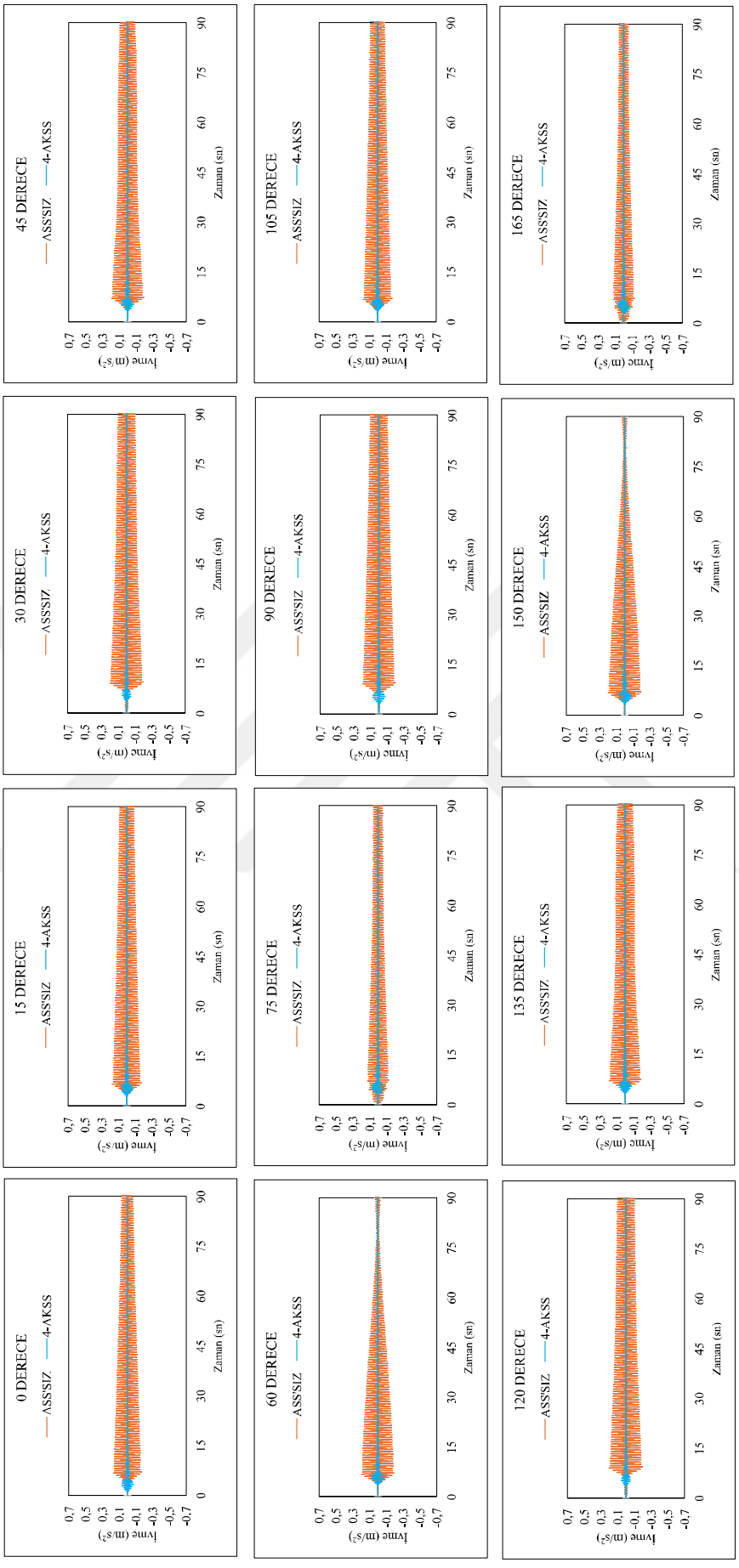


(a)



(b)

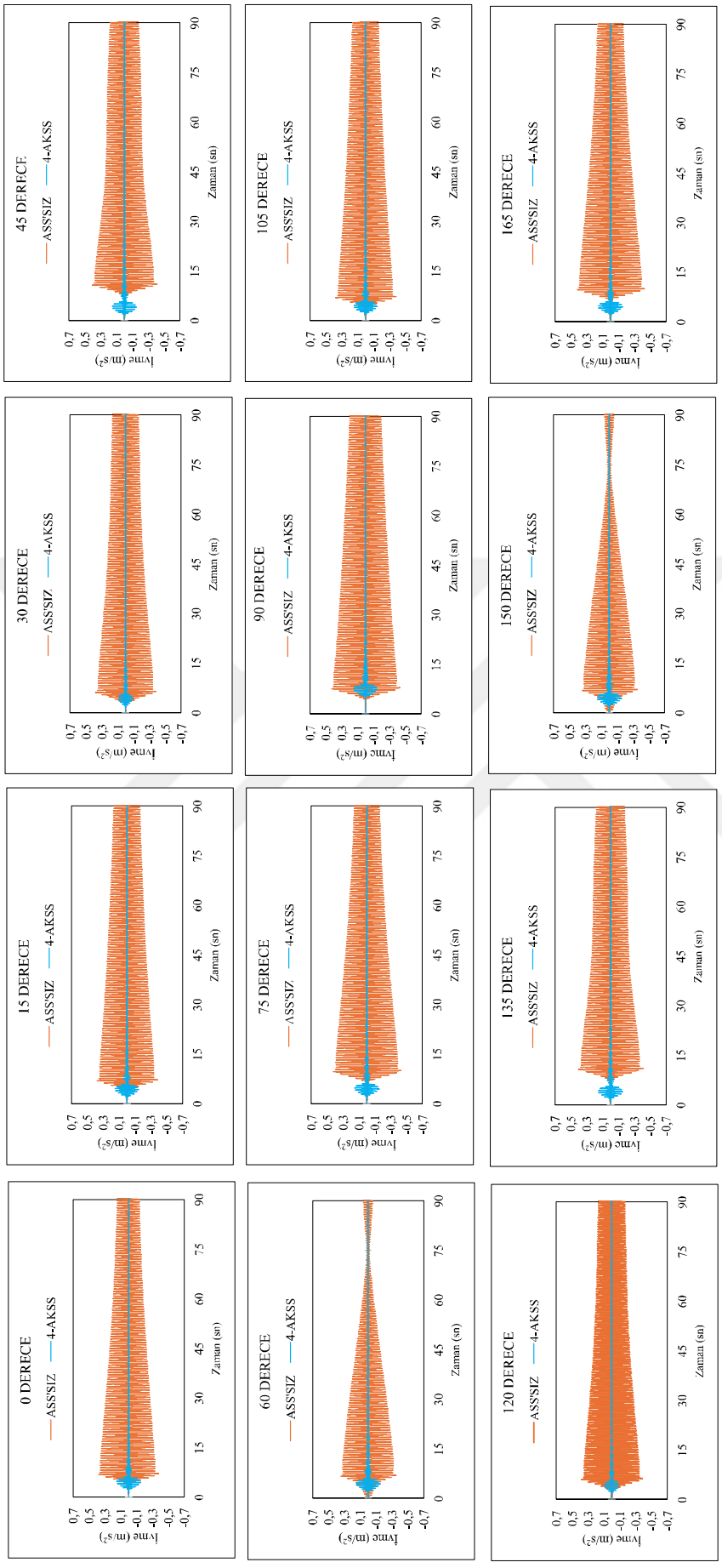
Şekil 47. Model binanın (a) 4-AKSS ve (b) 4-AKSS* durumları için sarsma masası deneyleri



(a)

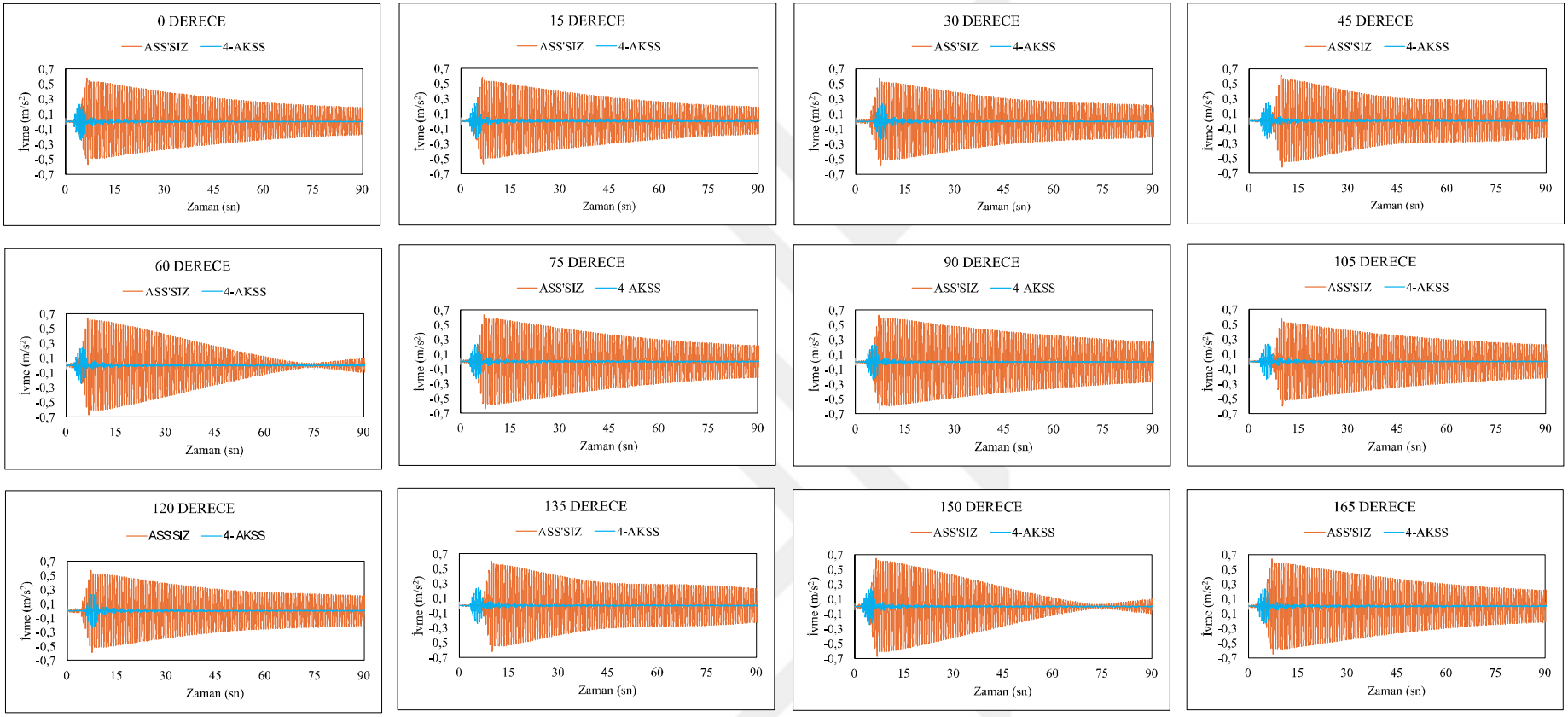
Şekil 48. Model binanın 4-AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri:
(a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik

Şekil 48'in devamı



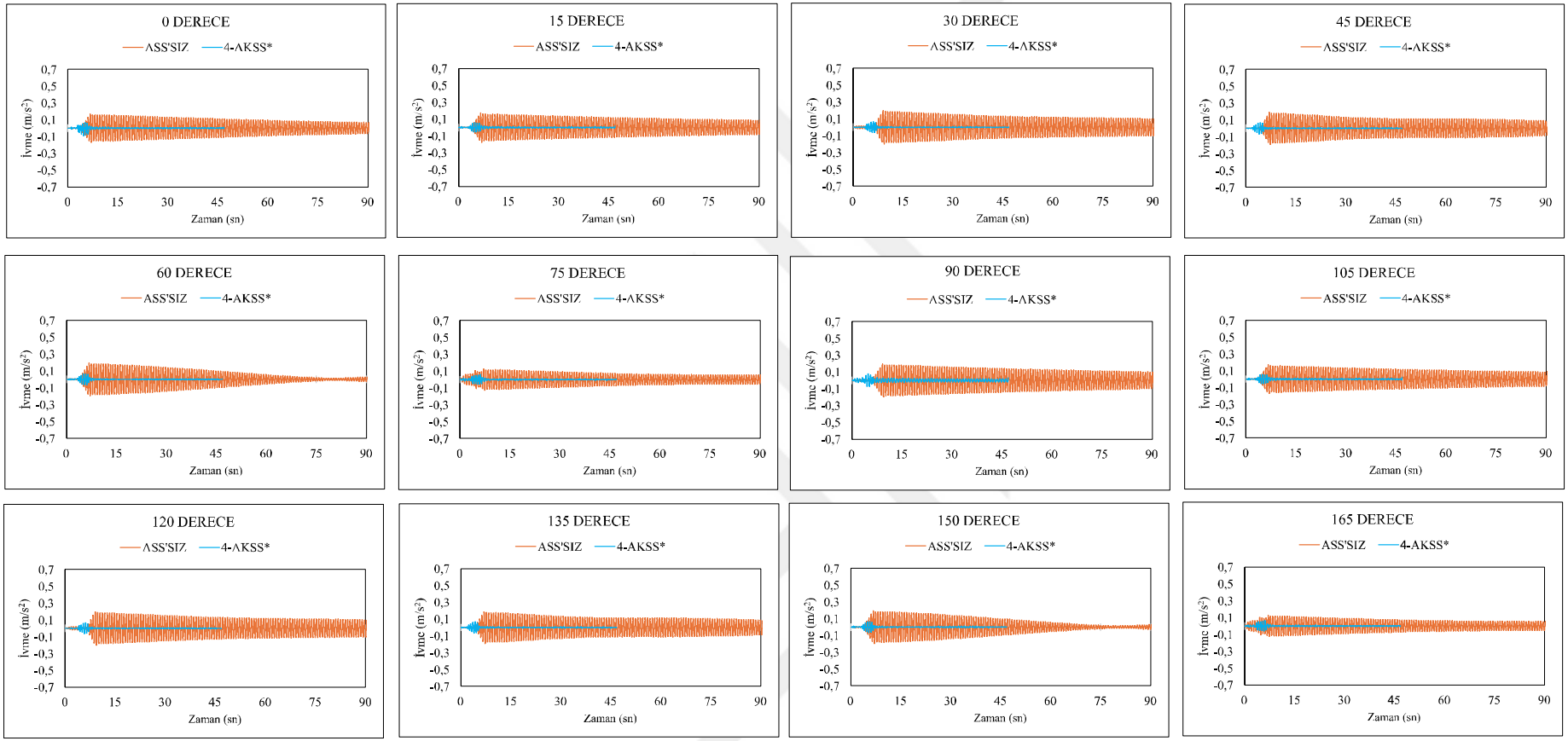
(b)

Şekil 48'in devamı



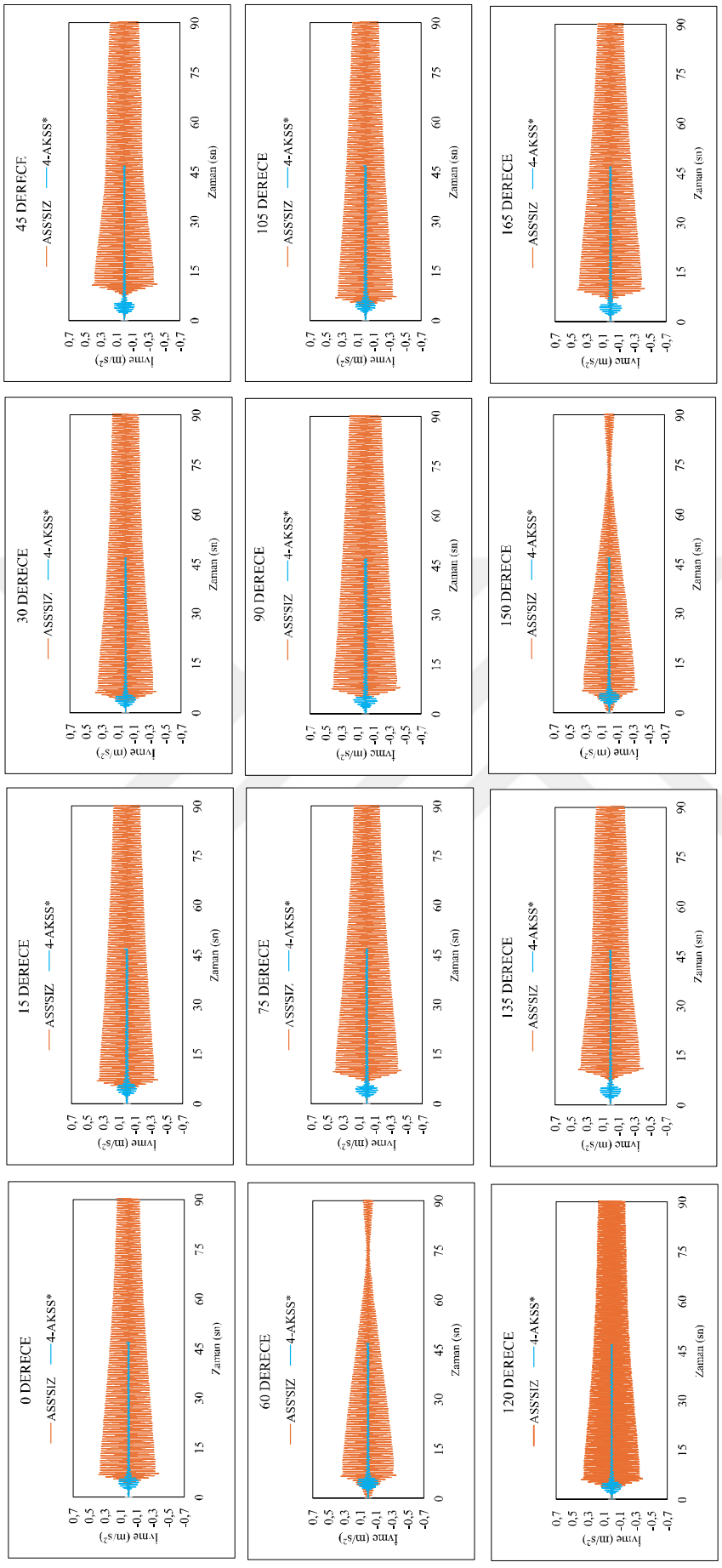
(c)

Şekil 49. Model binanın 4-AKSS* durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi



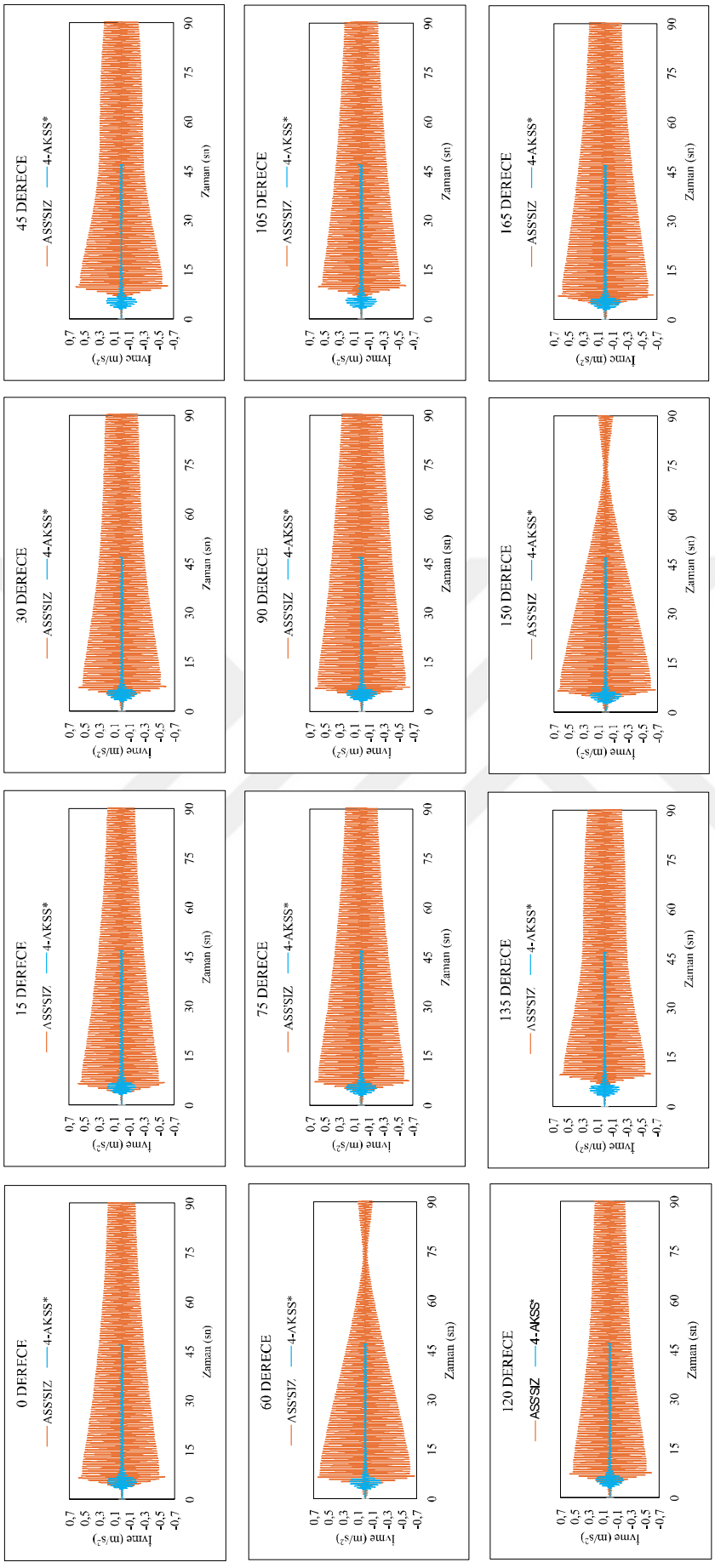
(a)

Şekil 49'un devamı



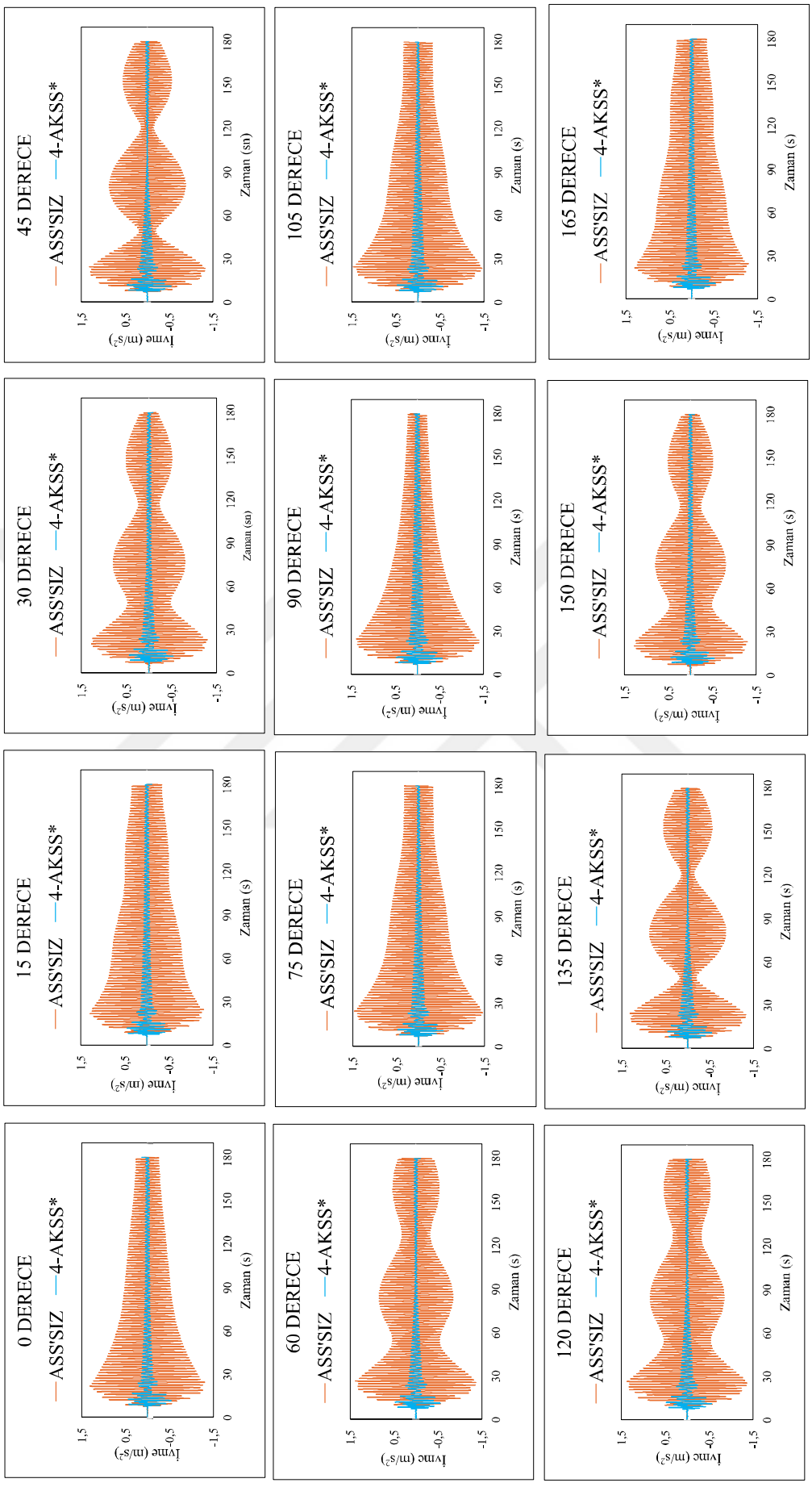
(b)

Şekil 49'un devamı

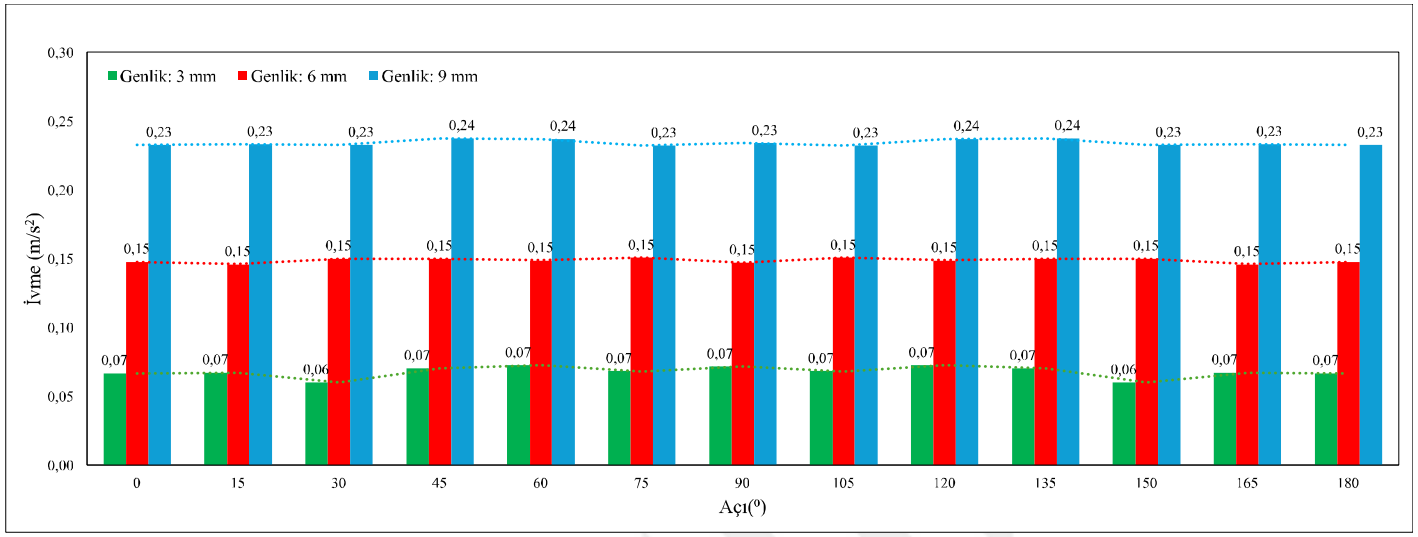


(c)

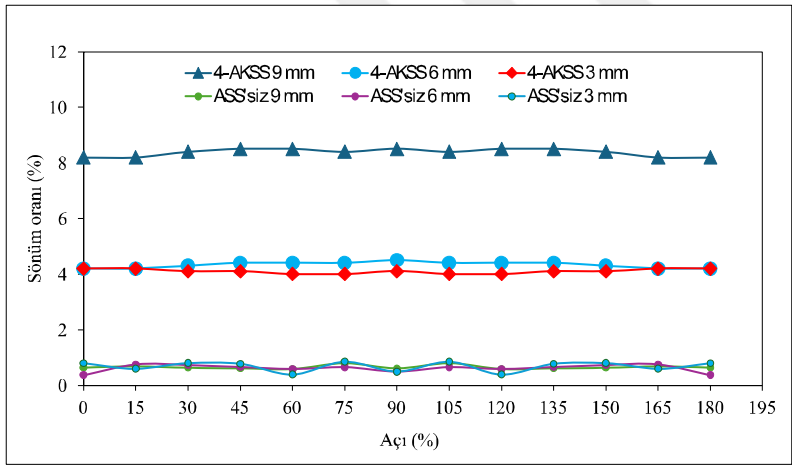
Şekil 49'un devamı



(d)

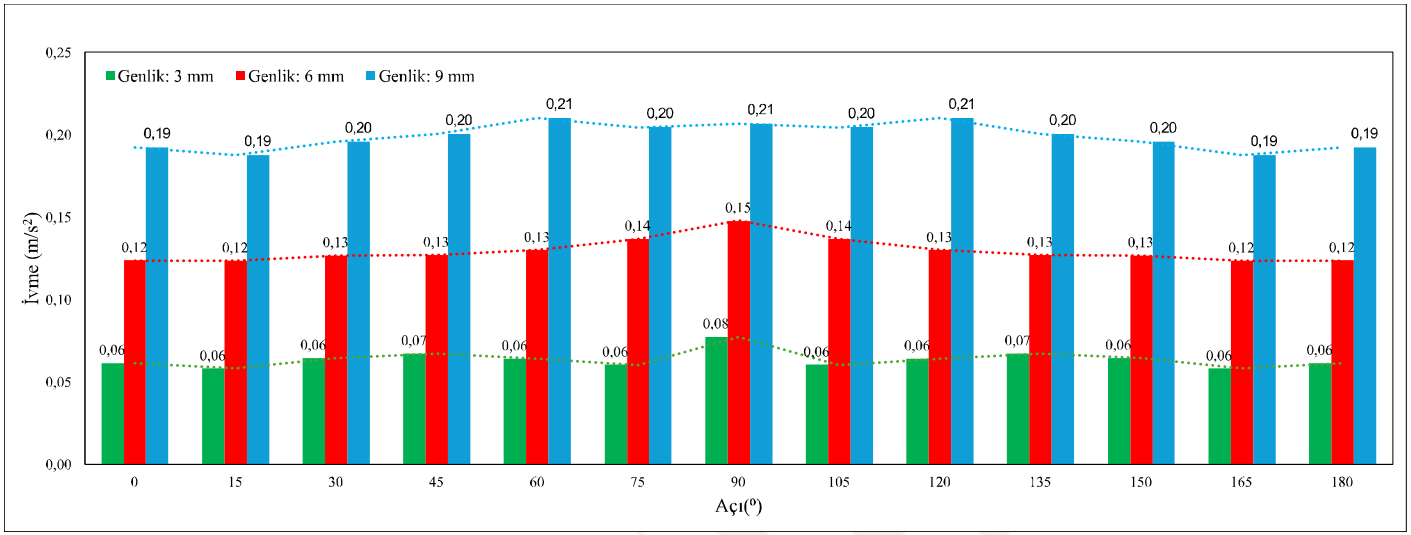


(a)

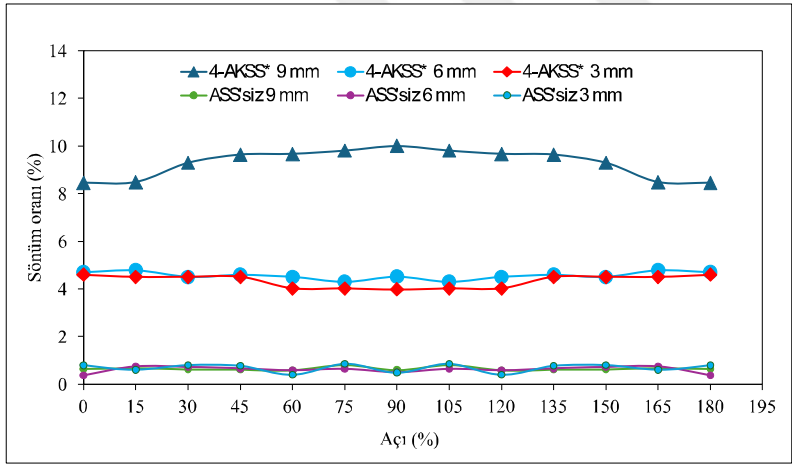


(b)

Şekil 50. 4-AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi



(a)



(b)

Şekil 51. 4-AKSS* durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi

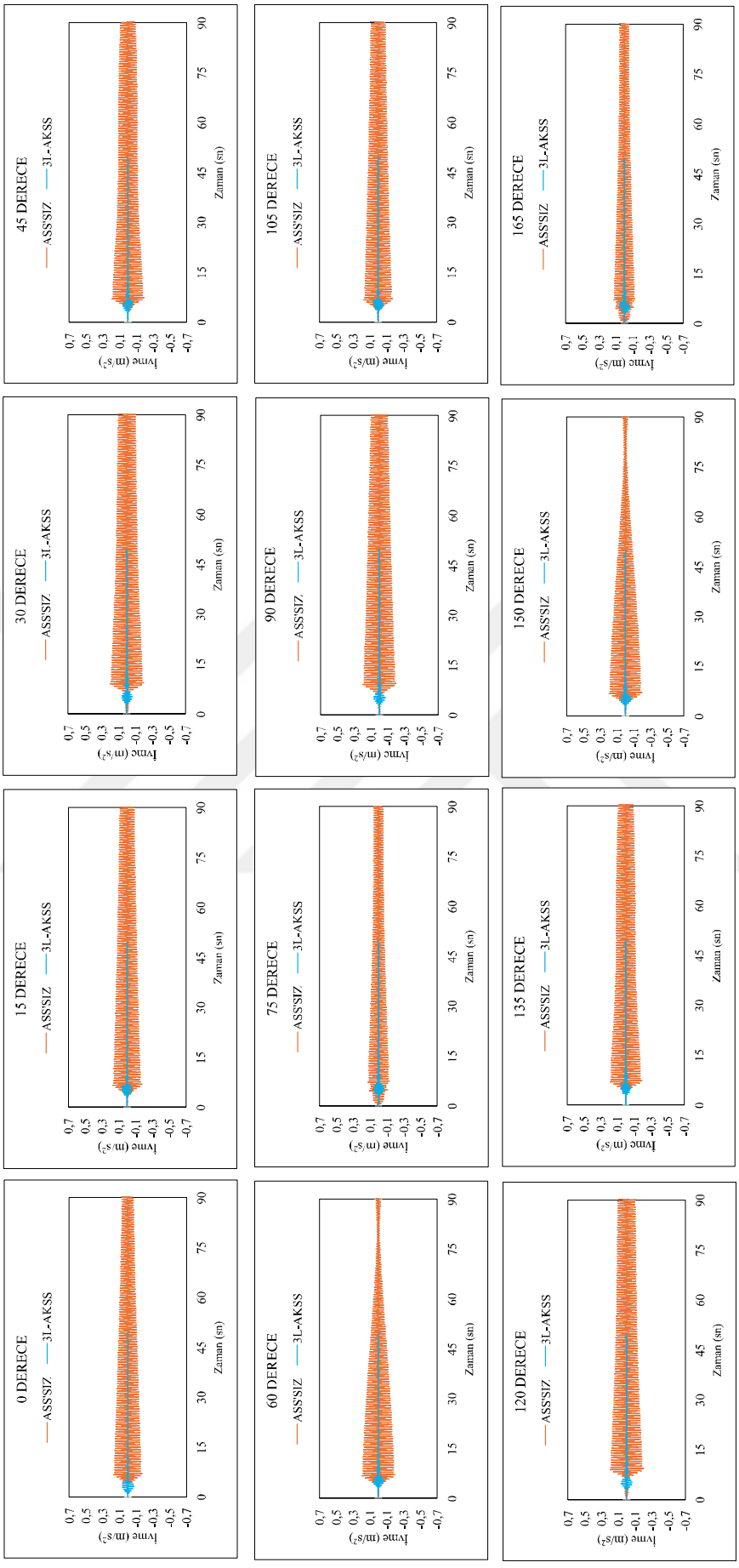
2.4.7. 3L-AKSS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın tavan seviyesine 3L-AKSS sistemi monte edildikten sonra (Şekil 52) harmonik hareketler için dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda elde edilmiştir (Şekil 53). Şekil 53'ten görüleceği üzere ivmeler 3L-AKSS sistemi ile belirgin azalmıştır. Örneğin: 75°'de maksimum ivmeler 9 mm genlik durumunda 0.58 m/s^2 ivme, 0.22 m/s^2'e; 6 mm genlik durumunda 0.42 m/s^2 ivme, 0.14 m/s^2'e; 3 mm genlik durumunda 0.19 m/s^2 ivme, 0.07 m/s^2'e düşmüştür. Maksimum ivmeler yaklaşık %65 azalmıştır. Bu durum tüm açı durumları için yaklaşık aynıdır. Etkinin genlikle birlikte arttığı ve yönel açıdan büyük değişim göstermediği gözlenmiştir. Bu, sistemin omnidirectional (her yönde aynı tepki) karakterini doğrular (Şekil 54). Harmonik hareketlerin farklı genlik durumları için sönüm oranı değerleri yaklaşık %4-8 arasında değişmektedir. 3L-AKSS sistemi, üç kollu yapısı sayesinde sıvı kütlesini dairesel yönde eşit dağıtarak çok eksenli yüklemelerde kararlı bir hidrodinamik tepki üretmiştir. Her yönde (0°-180°) benzer ivme zarfı eğrileri elde edilmesi, sistemin simetrik akış yolları sayesinde iki eksenli uyum sağladığını göstermektedir. Ayrıca sönüm oranının genlik artışıyla yükselmesi, sistemin enerjiye duyarlı sönüm karakteristiğini ortaya koymaktadır.



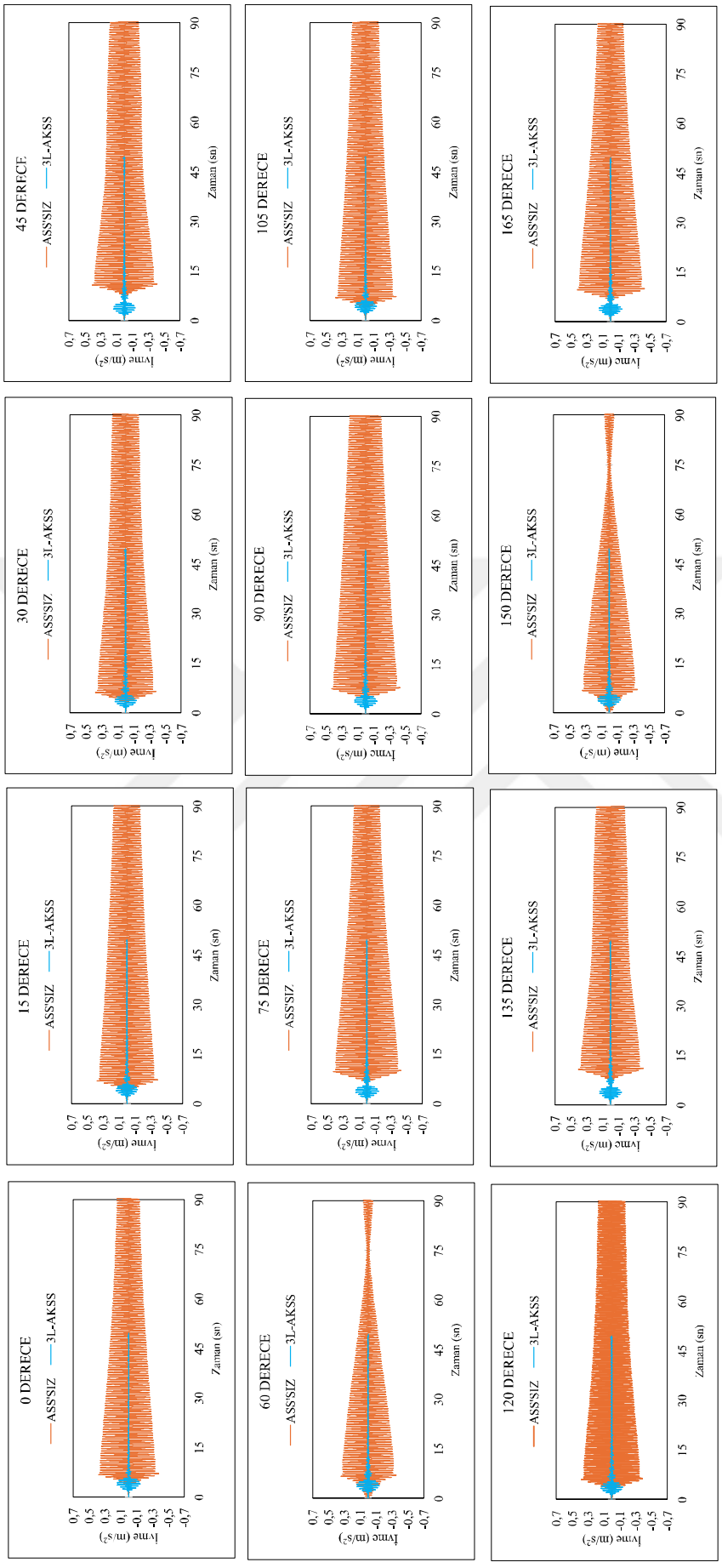
Şekil 52. Model binanın 3L-AKSS durumu için sarsma masası deneyleri

Şekil 53. Model binanın 3L-AKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri:
(a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik



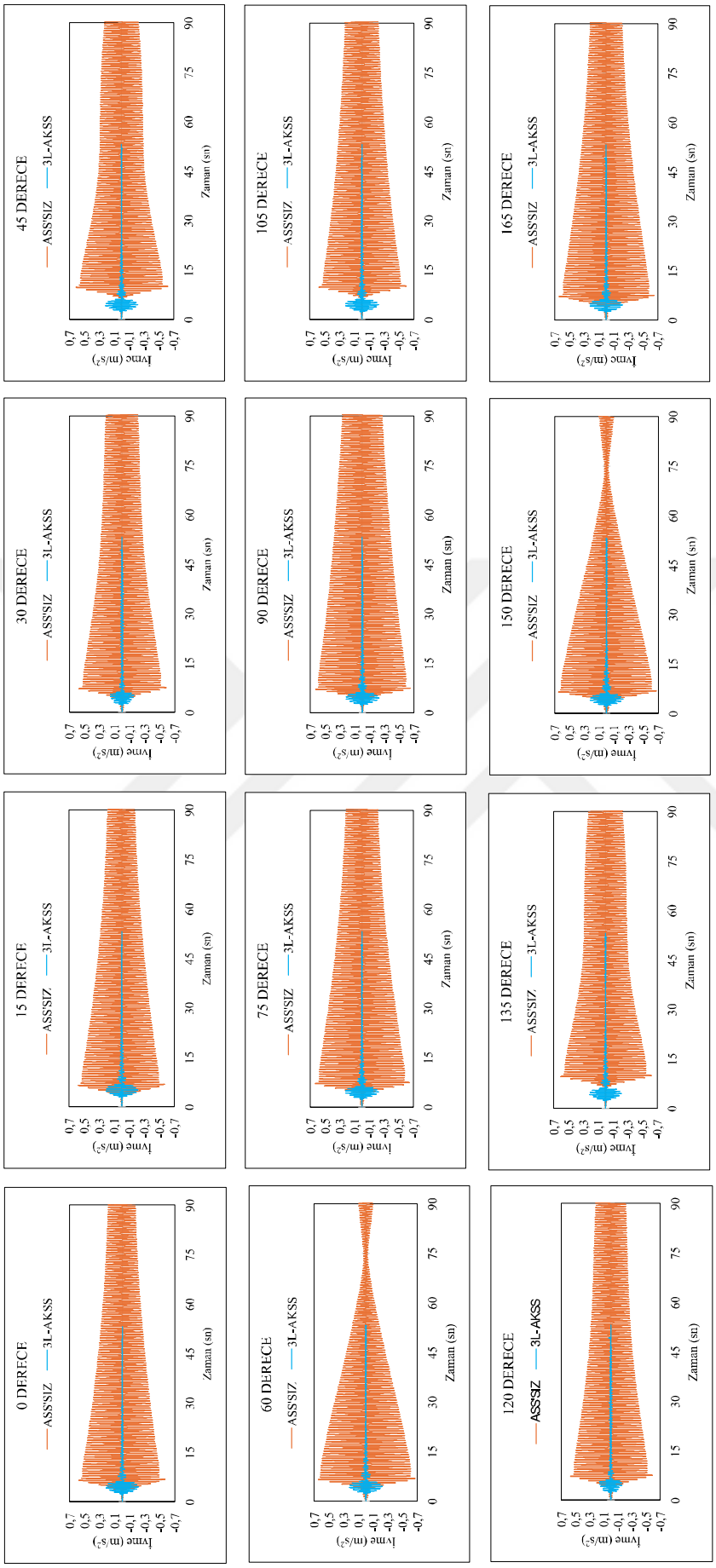
(a)

Şekil 53'ün devamı

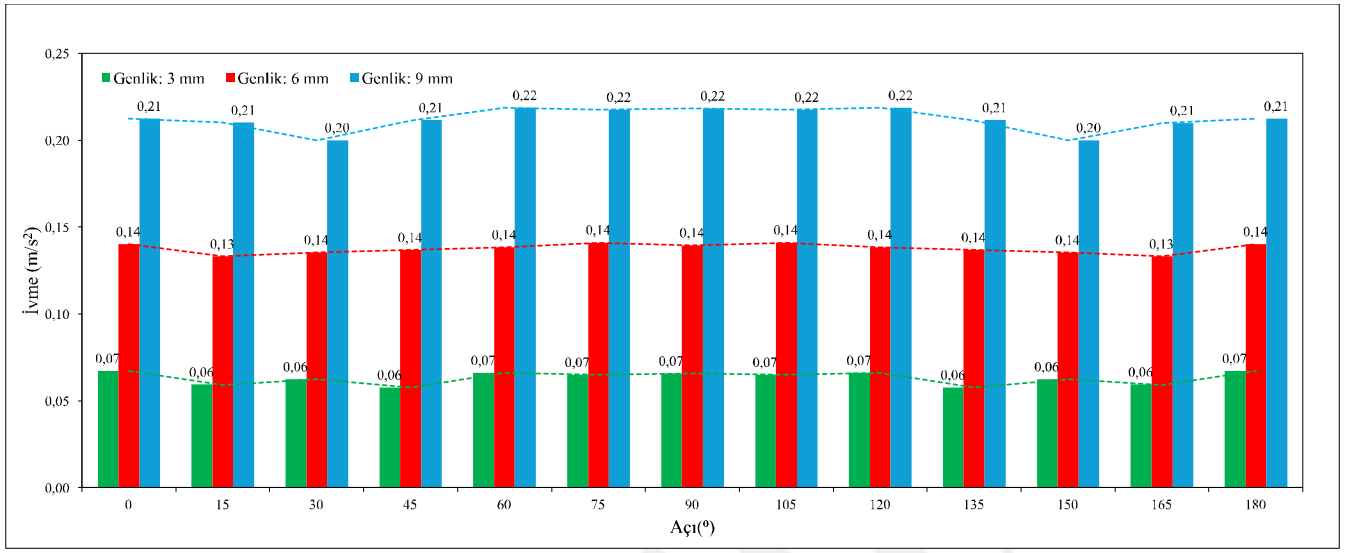


(b)

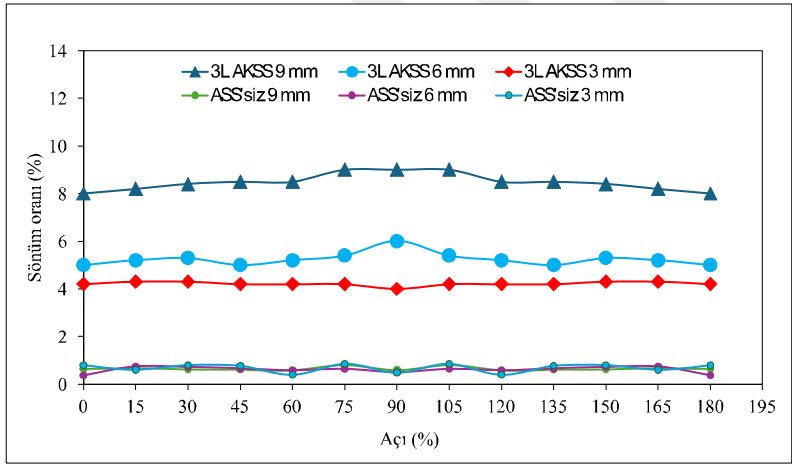
Şekil 53'ün devamı



(c)



(a)



(b)

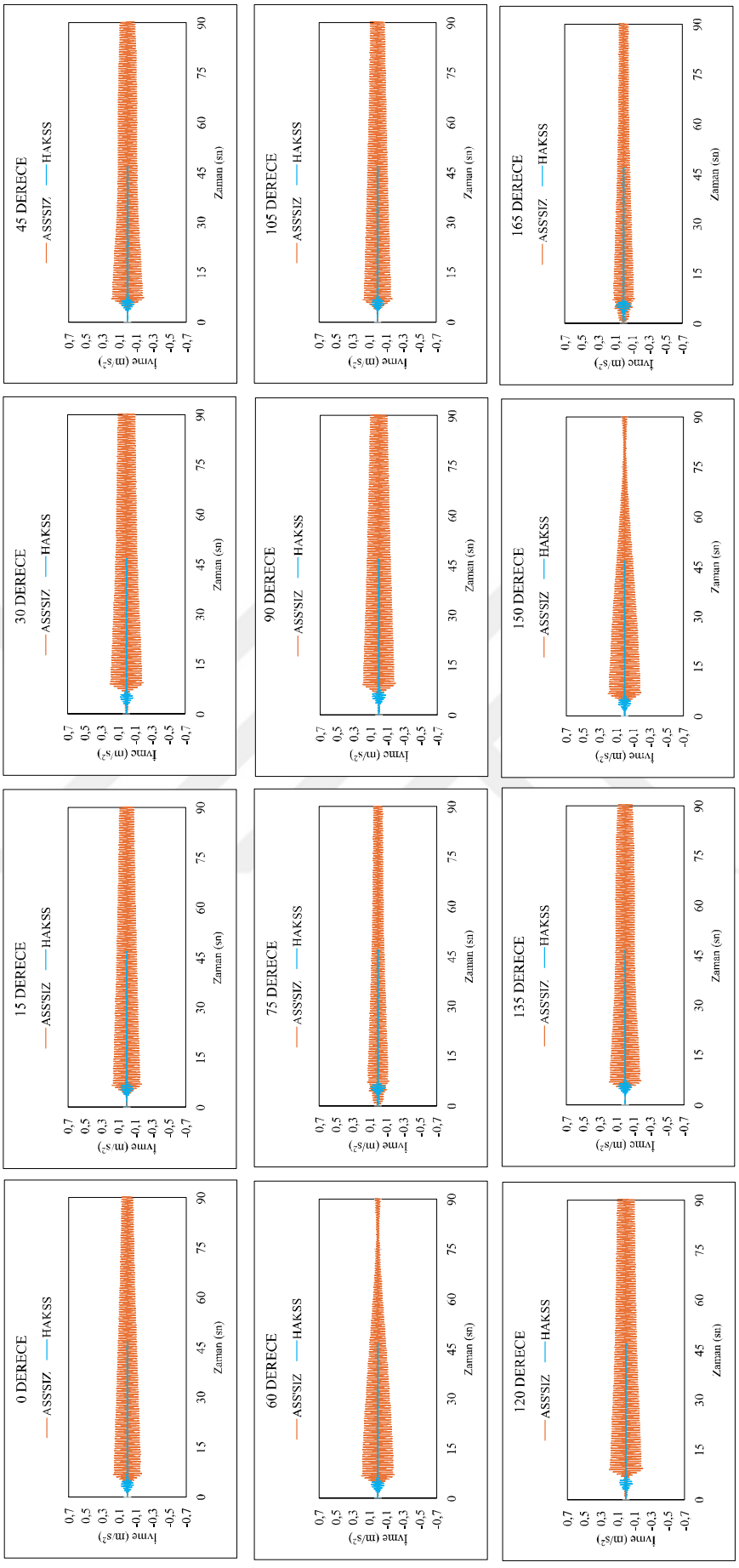
Şekil 54. 3L-AKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi

2.4.8. HAKSS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın HAKSS sistem ile sarsma masası deneyleri (Şekil 55) harmonik hareketler ve Erzincan depremi için gerçekleştirilmiş ve elde edilen dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumu için irdelenmiştir (Şekil 56). Şekil 54 incelendiğinde; HAKSS sisteminin 3 farklı harmonik hareket ve Erzincan depremi için her bir açı durumunda ivmeleri azalttığı, özellikle Erzincan depreminde ASS'siz sistemde 30° 45°, 60°, 120°, 135° ve 150° açılarda meydana gelen çarpılma etkisini neredeyse ortadan kaldırdığı, herhangi bir açı durumunda çakışma durumunun meydana gelmediği görülmektedir. Yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivmeler belirgin değişmemektedir. Maksimum ivmeler HAKSS sistem ile birlikte: harmonik hareketler etkisinde örneğin; 3 mm genlikli harmonik harekette 30°'de 0.2 m/s^2'den 0.07 m/s^2'ye (%63), 6 mm genlikli harmonik harekette 90°'de 0.42 m/s^2'den 0.17 m/s^2'ye (%61) ve 9 mm genlikli harmonik harekette 15°'de 0.58 m/s^2'den 0.23 m/s^2'ye (%58) azalmıştır. Erzincan depreminde ASS'siz sistemde maksimum ivme 0°'de 1.47 m/s^2 iken HASS'de 0.53 m/s^2'dir. Sönüm oranı değerleri ise 9 mm genlikli harmonik harekette yaklaşık %11, 6 mm ve 3 mm genlikli harmonik hareket etkisinde %5 civarında hesaplanmıştır (Şekil 57). Erzincan depreminde ise sönüm yaklaşık 0°'de %7 civarındadır.



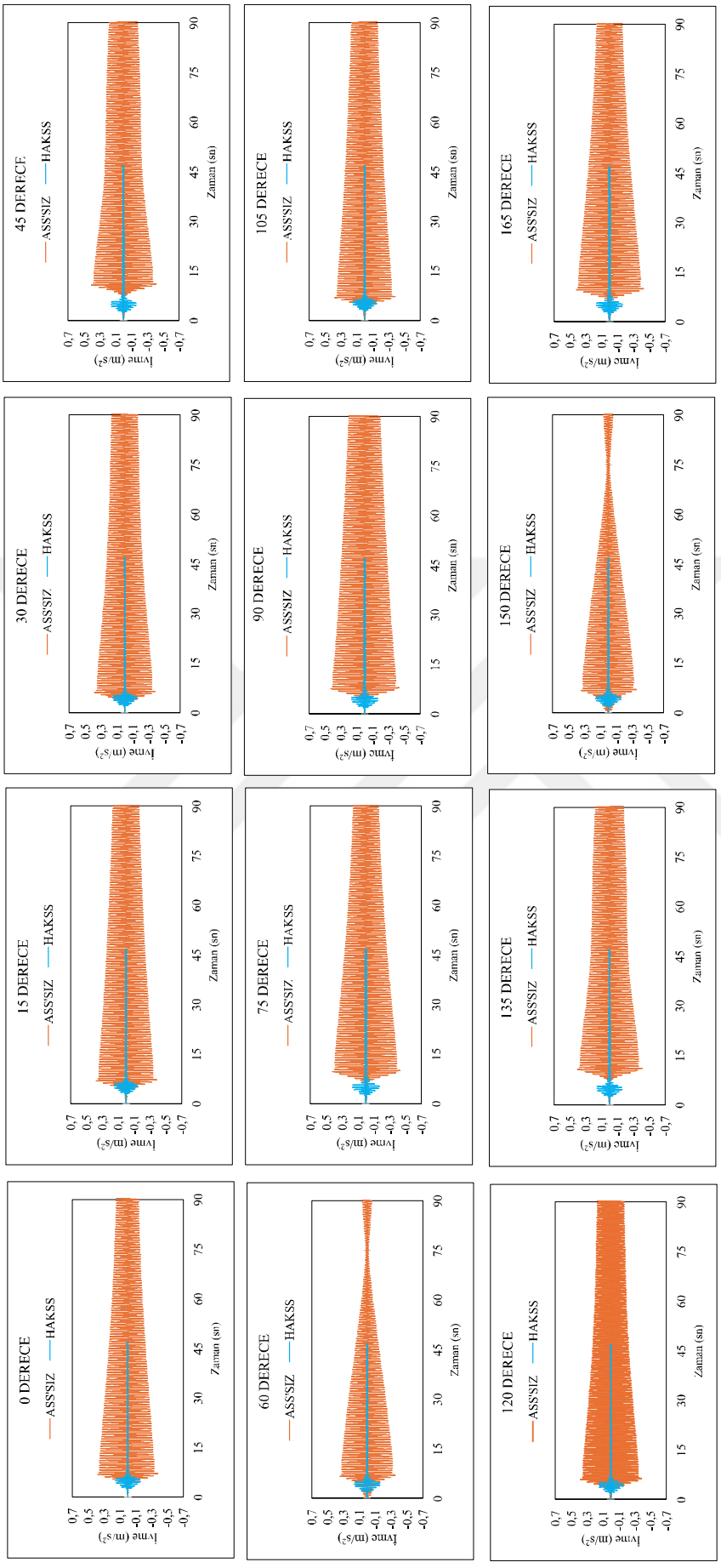
Şekil 55. Model binanın HAKSS durumu için sarsma masası deneyler



(a)

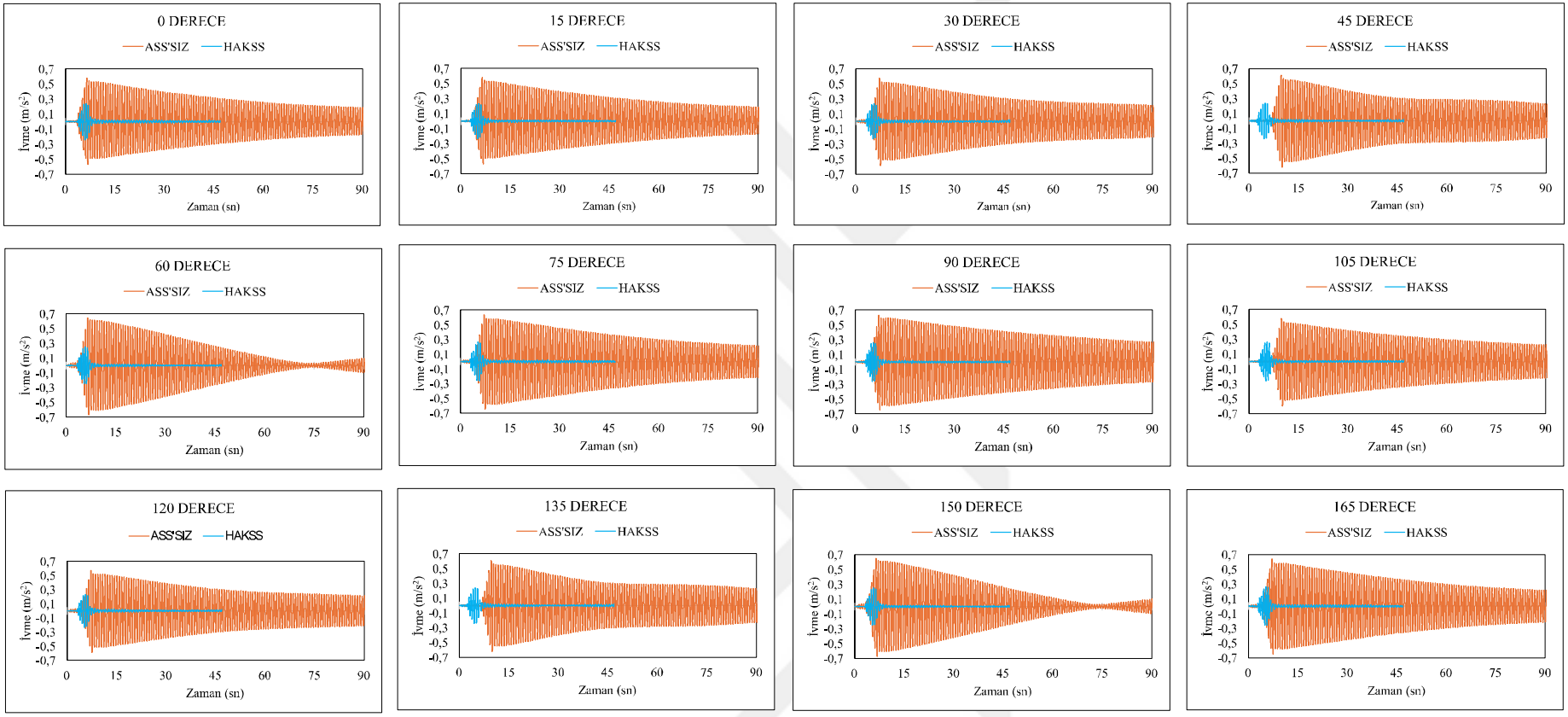
Şekil 56. Model binanın HAKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi

Şekil 56'nın devamı



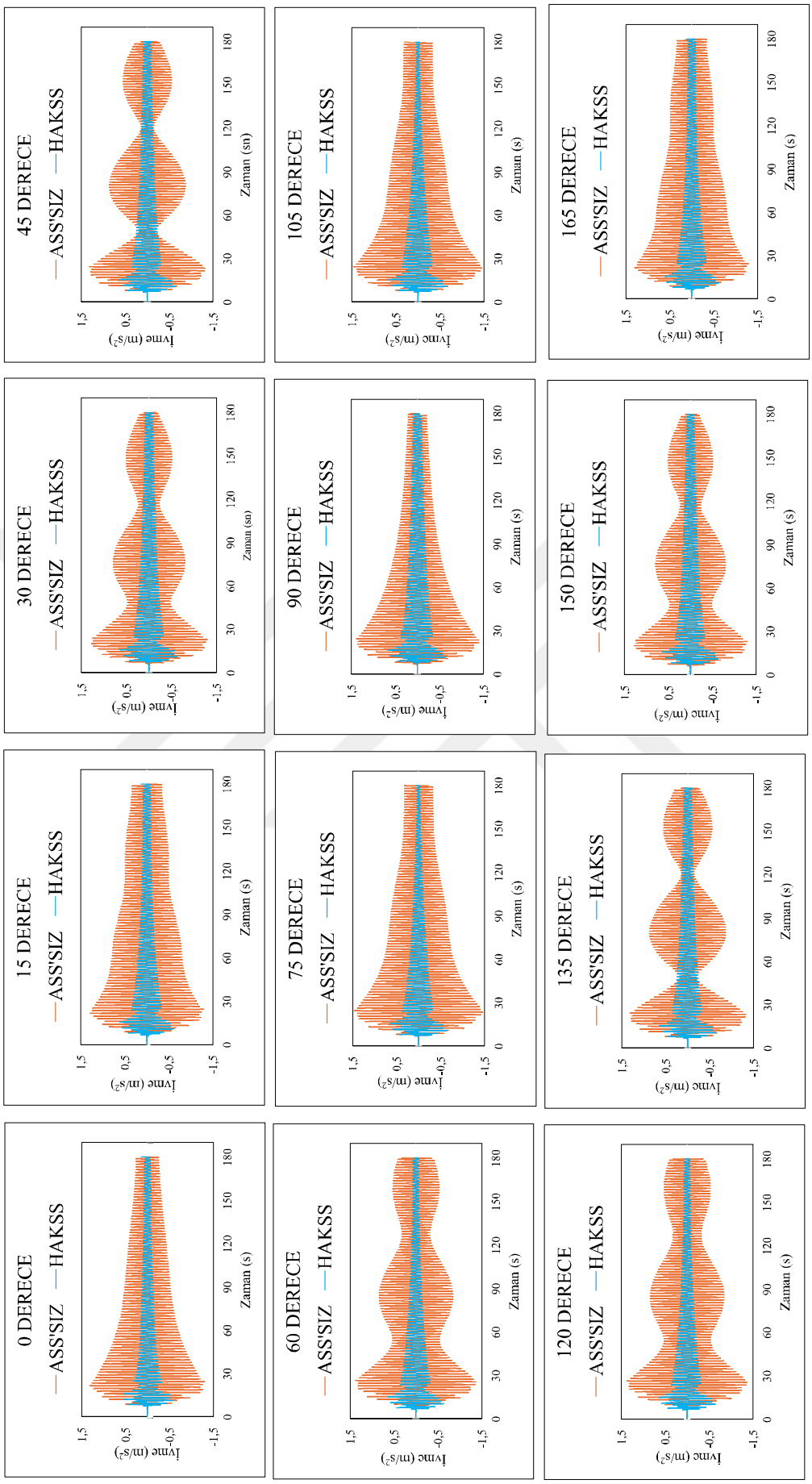
(b)

Şekil 56'nın devamı

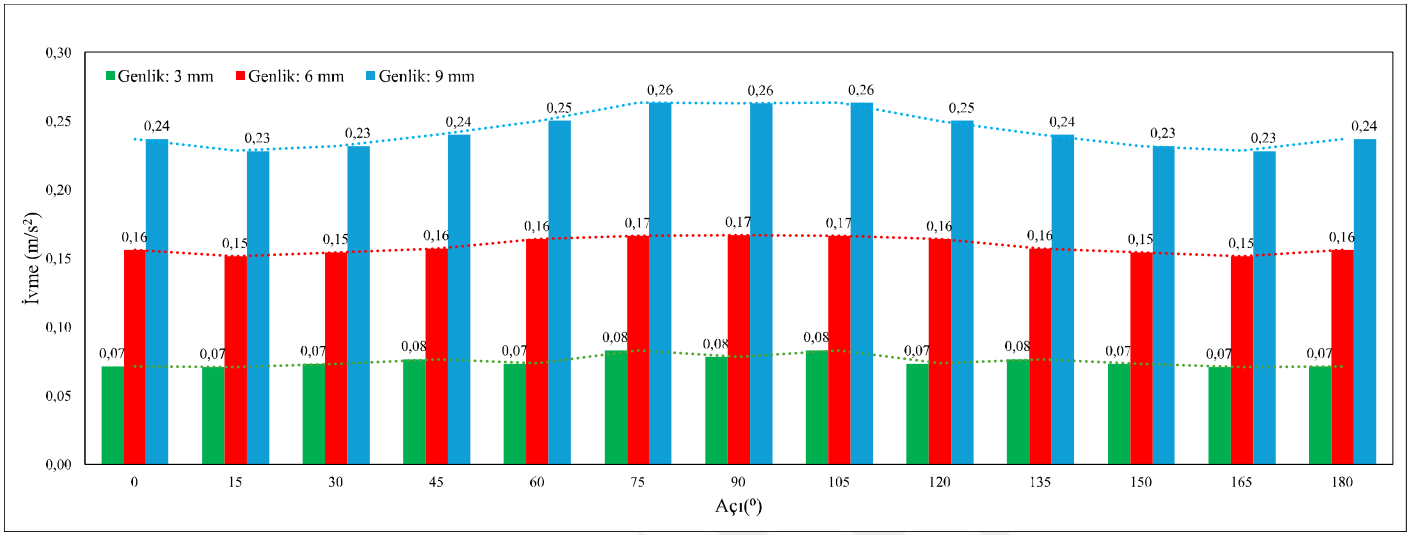


(c)

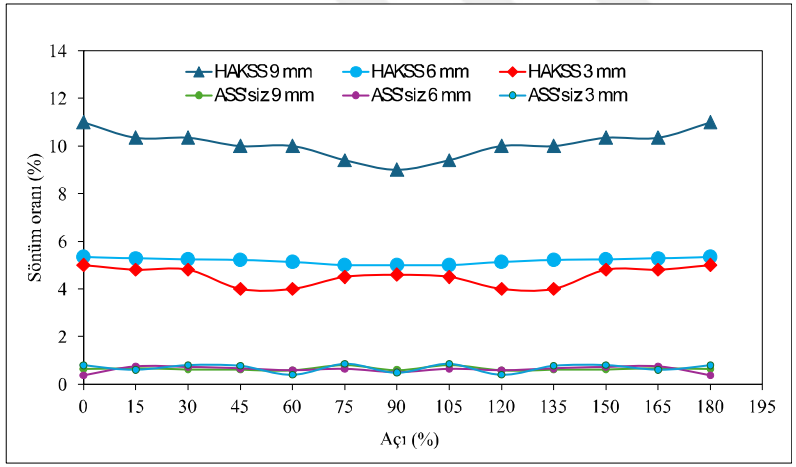
Şekil 56'nın devamı



(d)



(a)



(b)

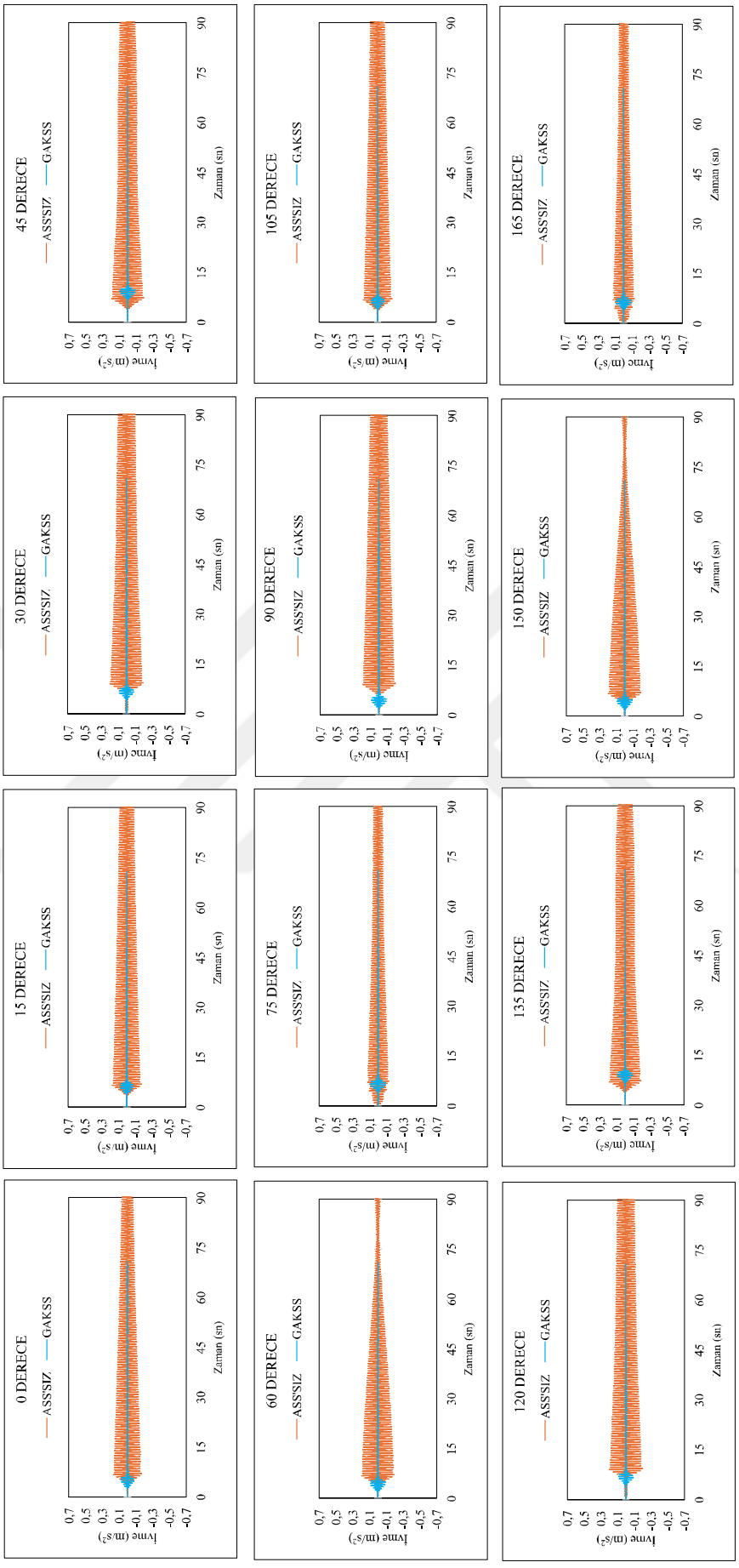
Şekil 57. HAKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi

2.4.9. GAKSS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın GAKSS sistem ile sarsma masası deneyleri (Şekil 58) harmonik hareketler ve Erzincan depremi için gerçekleştirilmiş ve elde edilen dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumu için irdelenmiştir (Şekil 59). Şekil 59 incelendiğinde; GAKSS sisteminin 3 farklı harmonik hareket ve Erzincan depremi için her bir açı durumunda ivmeleri azalttığı, fakat artan açılarla (0°-90° arasında) etkinliğinin nispeten azaldığı görülmektedir. Ayrıca özellikle Erzincan depreminde ASS'siz sistemde 30° 45°, 60°, 120°, 135° ve 150° açılarda meydana gelen çarpılma etkisini sınırlı ortadan kaldırdığı ve çarpışma olayının meydana gelemediği belirlenmiştir. Maksimum ivmeler GAKSS sistem ile birlikte: harmonik hareketler etkisinde örneğin; 3 mm genlikli harmonik harekette 15°'de 0.17 m/s^2'den 0.08 m/s^2'ye (%55), 6 mm genlikli harmonik harekette 45°'de 0.40 m/s^2'den 0.18 m/s^2'ye (%55) ve 9 mm genlikli harmonik harekette 90°'de 0.63 m/s^2'den 0.31 m/s^2'ye (%50) azalmıştır. Erzincan depreminde ASS'siz sistemde maksimum ivme 0°'de 1.47 m/s^2 iken GAKSS'de 0.47 m/s^2'dir. Sönüm oranı değerleri ise 9 mm genlikli harmonik harekette yaklaşık %12, 6 mm ve 3 mm genlikli harmonik hareket etkisinde ise sırasıyla %9 ve %6 civarında hesaplanmıştır. Erzincan depremi için maksimum sönüm 0°'de %12 olarak hesaplanmıştır. Sönüm oranı değerleri artan açılarla birlikte azalmaktadır (Şekil 60). GAKSS sıvının çalkalanmasından ziyade osilasyon – salınım ile sönümle yaptığı tespit edilmiştir. Bu durum tankın ölçülerinden kaynaklıdır.



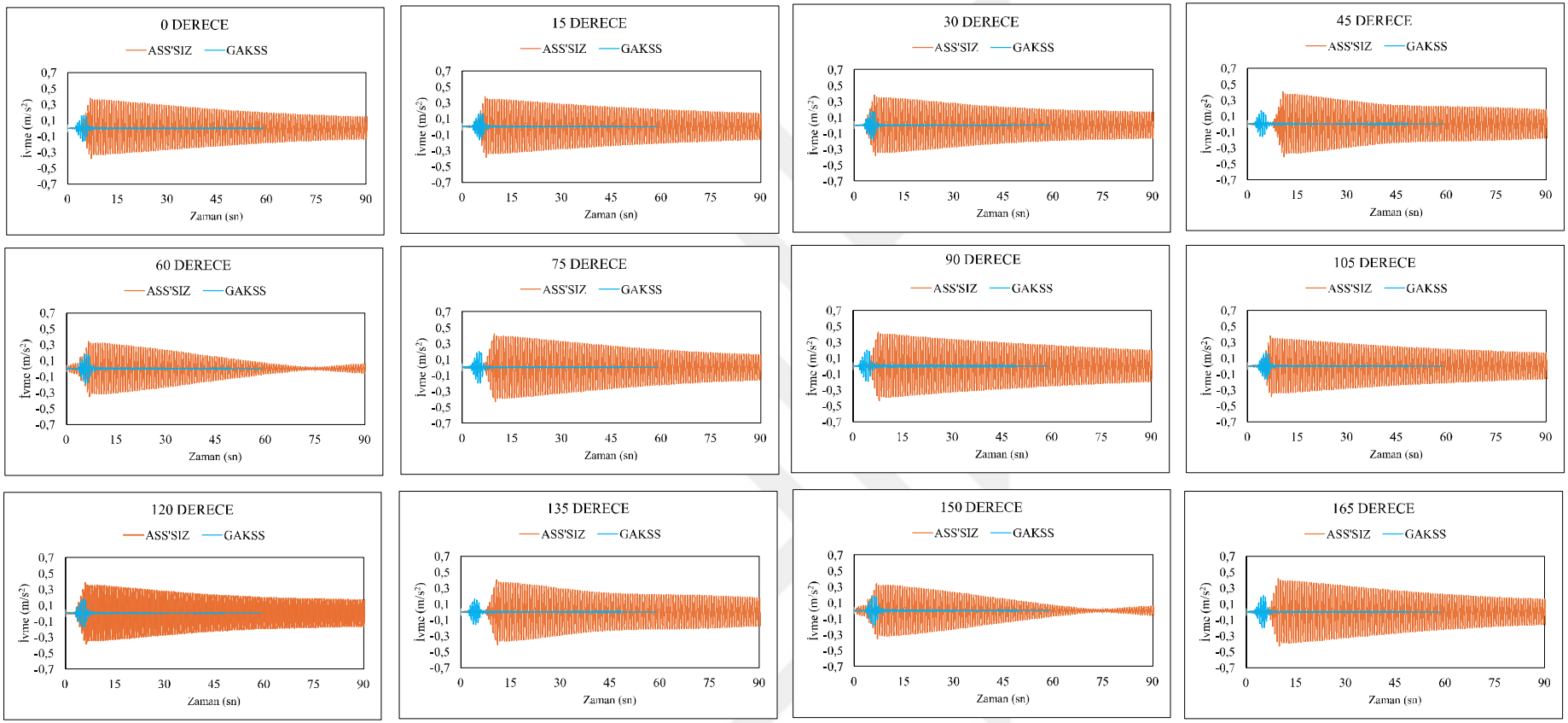
Şekil 58. Model binanın GAKSS durumu için sarsma masası deneyler



(a)

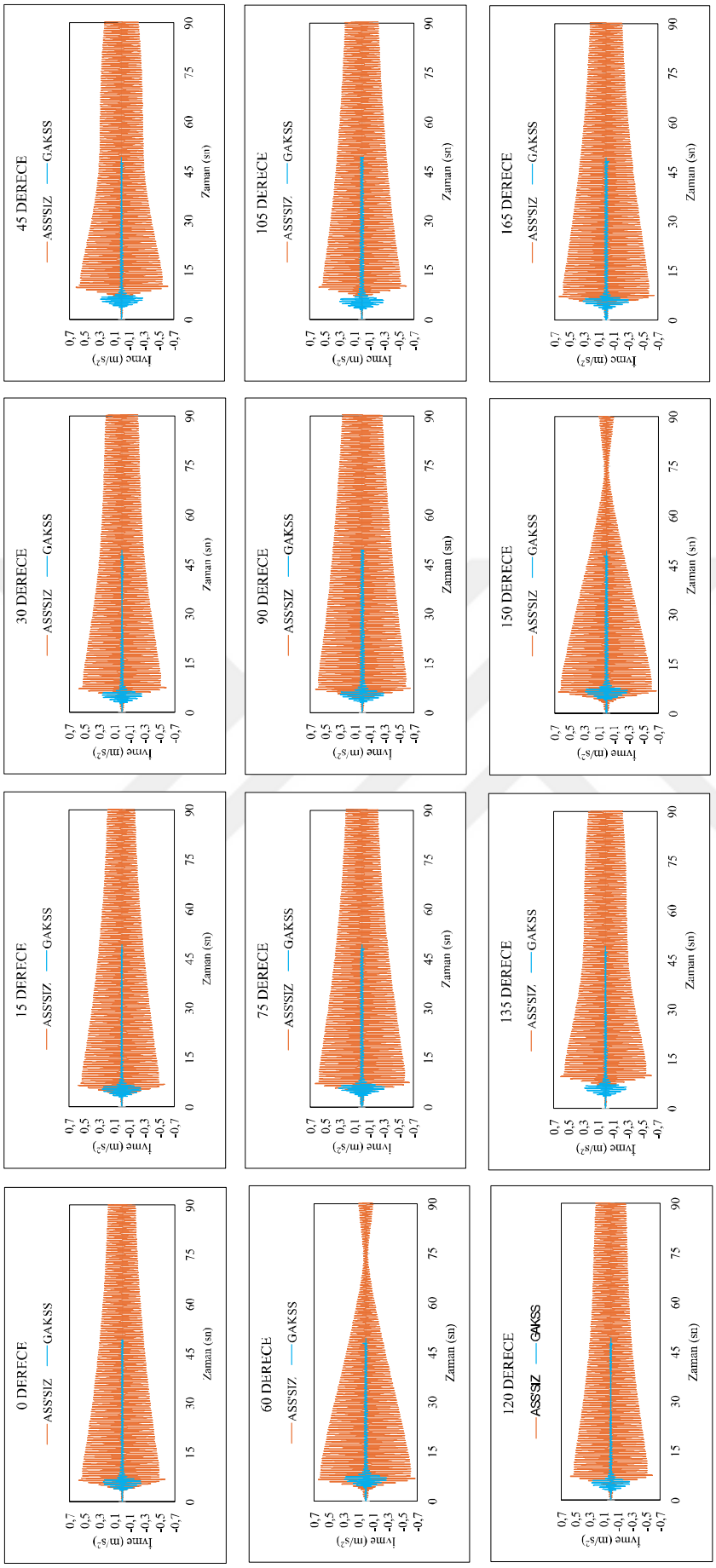
Şekil 59. Model binanın GAKSS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik, (c) 9 mm genlik ve (d) Erzincan depremi

Şekil 59'un devamı

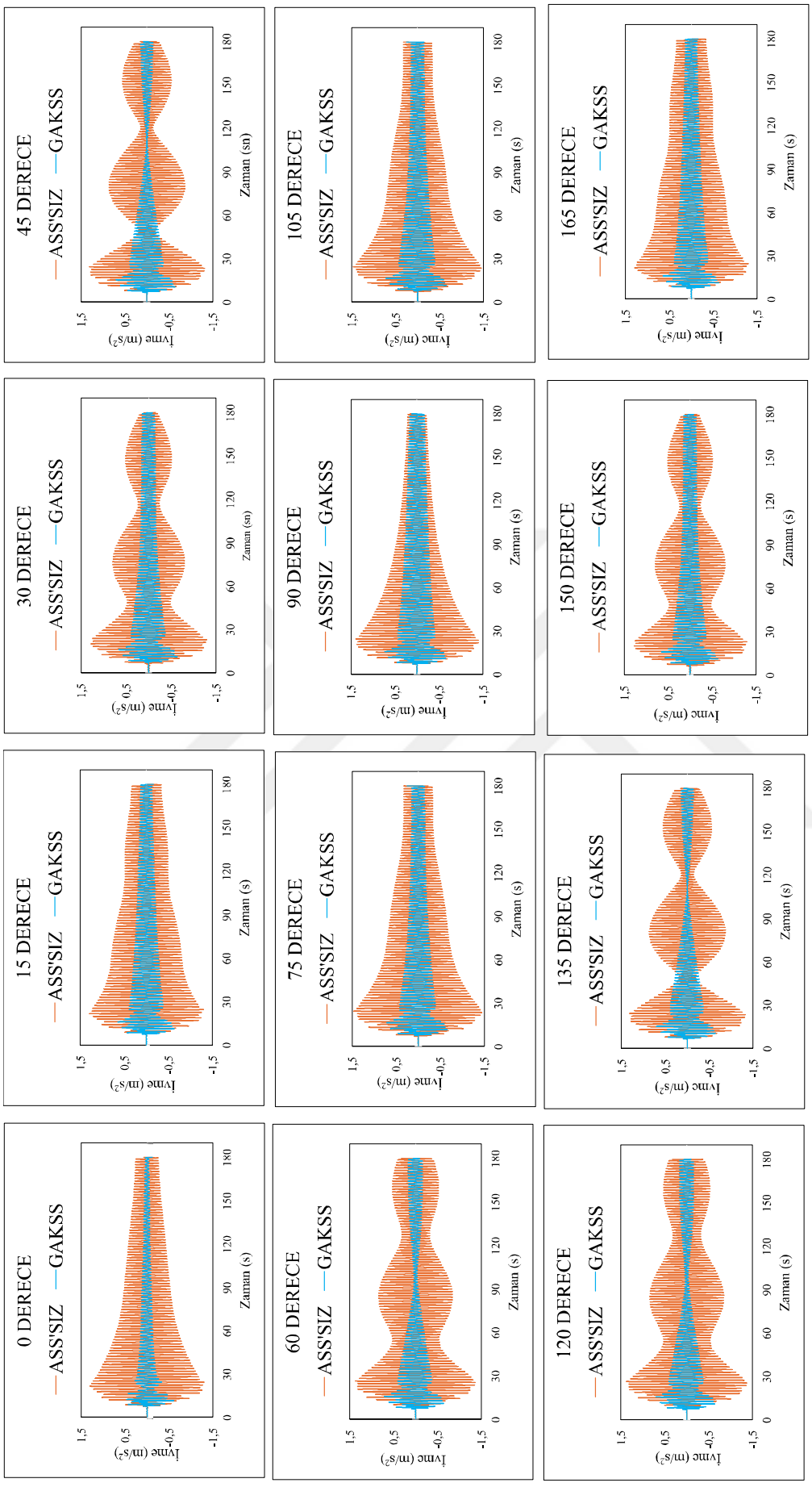


(b)

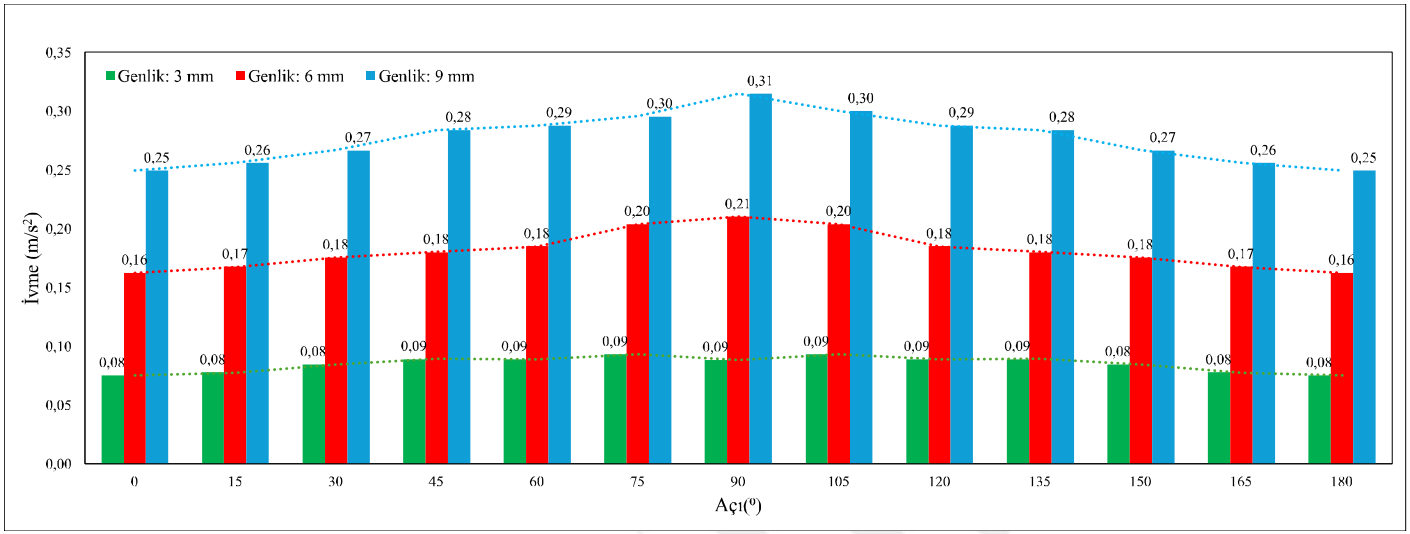
Şekil 59'un devamı



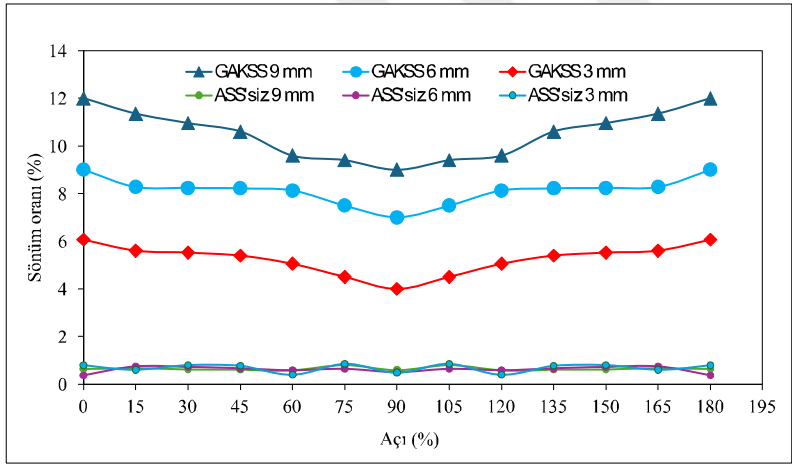
(c)


0 DERECE
15 DERECE
30 DERECE
45 DERECE
60 DERECE
75 DERECE
90 DERECE
105 DERECE
120 DERECE
135 DERECE
150 DERECE
165 DERECE
ASS'SIZ
GAKSS
İvme (m/s²)
Zaman (s)
Zaman (sn)

(d)



(a)



(b)

Şekil 60. GAKSS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi

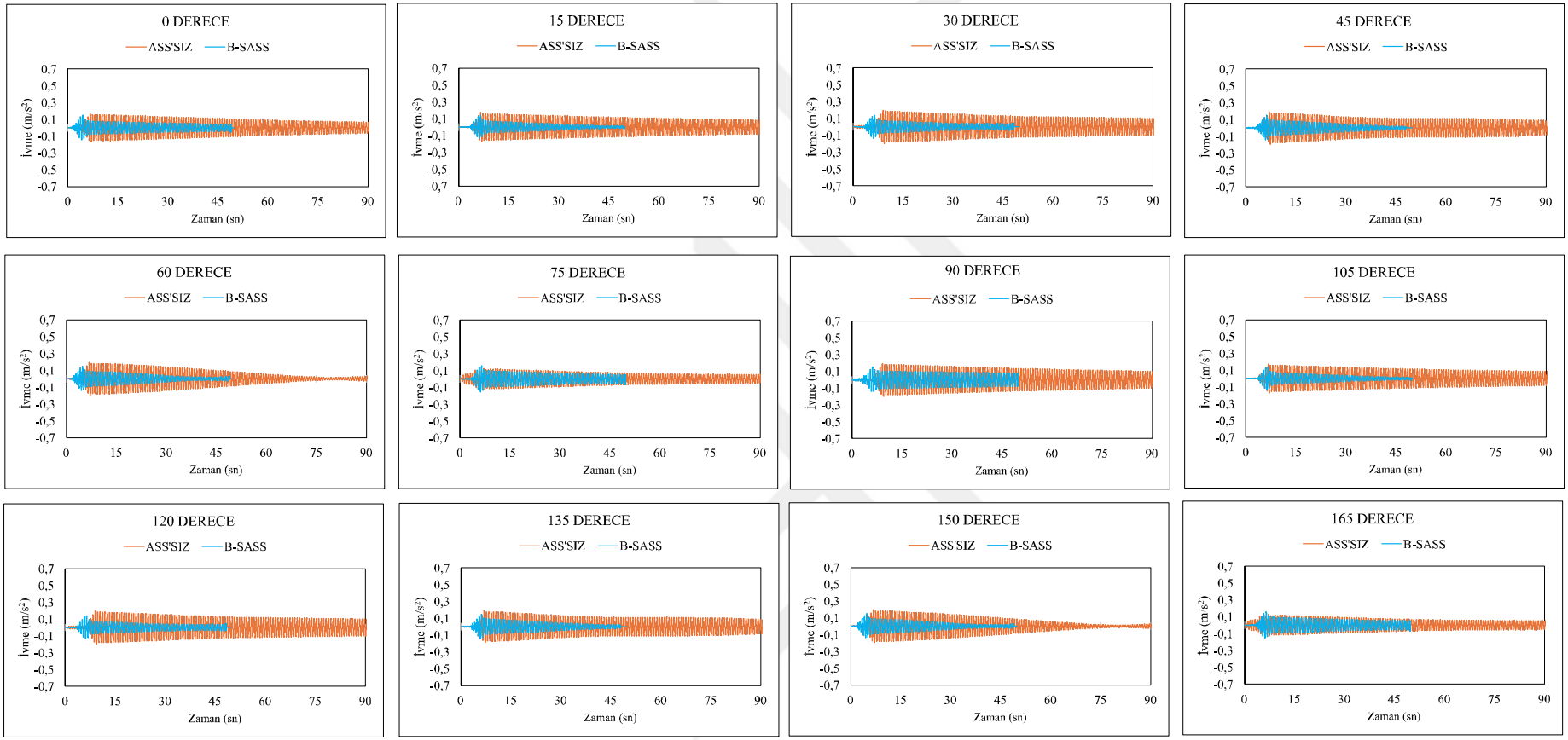
2.4.10. B-SASS İçin Dinamik Sonuçlar

Model binanın B-SASS sistem ile sarsma masası deneyleri (Şekil 61) harmonik hareketler için gerçekleştirilmiş ve elde edilen dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumu için irdelenmiştir (Şekil 62). Ayrıca Şekil 62'de sistemin maksimum ivmeleri ve sönüm oranı değerlerinin farklı açı durumları için değişimler verilmiştir. Şekil 62 ve Şekil 63 incelendiğinde; B-SASS sistemiyle gerçekleştirilen harmonik titreşim deneyleri, sistemin farklı genliklerde ve açısal yönlerdeki etkinliğini ortaya koymuştur. Küçük genliklerde sönüm etkisi sınırlı kalırken, 6 mm ve özellikle 9 mm genlikte sıvı hareketi artmış, borular arası akış farkı ve viskoz kayıplar belirgin hale gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, B-SASS sisteminin genlik arttıkça doğrusal olmayan enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ve sönüm oranının yaklaşık %5'e kadar yükseldiğini göstermektedir. Ayrıca, sönümleme performansının açı değişiminden etkilenmemesi (0° 15°, 30°, 45°, 60° bir miktar daha efektif), sistemin yön bağımsız bir davranış sergilediğini kanıtlamaktadır. Maksimum ivmeler B-SASS sistem ile birlikte: harmonik hareketler etkisinde örneğin; 3 mm genlikli harmonik harekette 15°'de 0.17 m/s^2'den 0.14 m/s^2'ye (%20), 6 mm genlikli harmonik harekette 75°'de 0.42 m/s^2'den 0.28 m/s^2'ye (%24) ve 9 mm genlikli harmonik harekette 75°'de 0.54 m/s^2'den 0.47 m/s^2'ye (%26) azalmıştır. B-SASS'de sıvının çalkalanmasından ziyade osilasyon – salınım ile sönümle yaptığı tespit edilmiştir. Bu durum sistemin efektifliğini azaltmıştır.



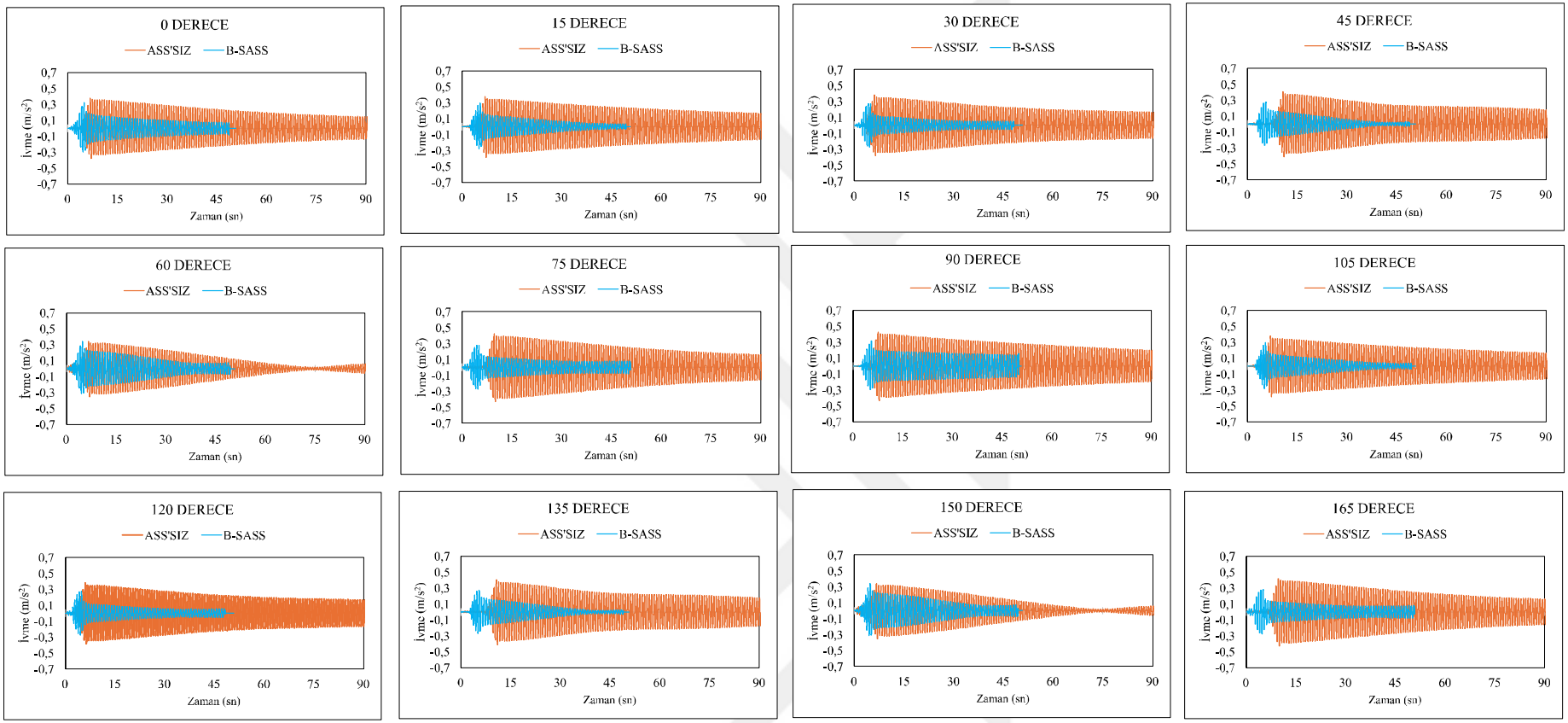
Şekil 61. Model binanın B-SASS durumu için sarsma masası deneyler

Şekil 62. Model binanın B-SASS durumu için yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi durumunda ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, (b) 6 mm genlik ve (c) 9 mm genlik



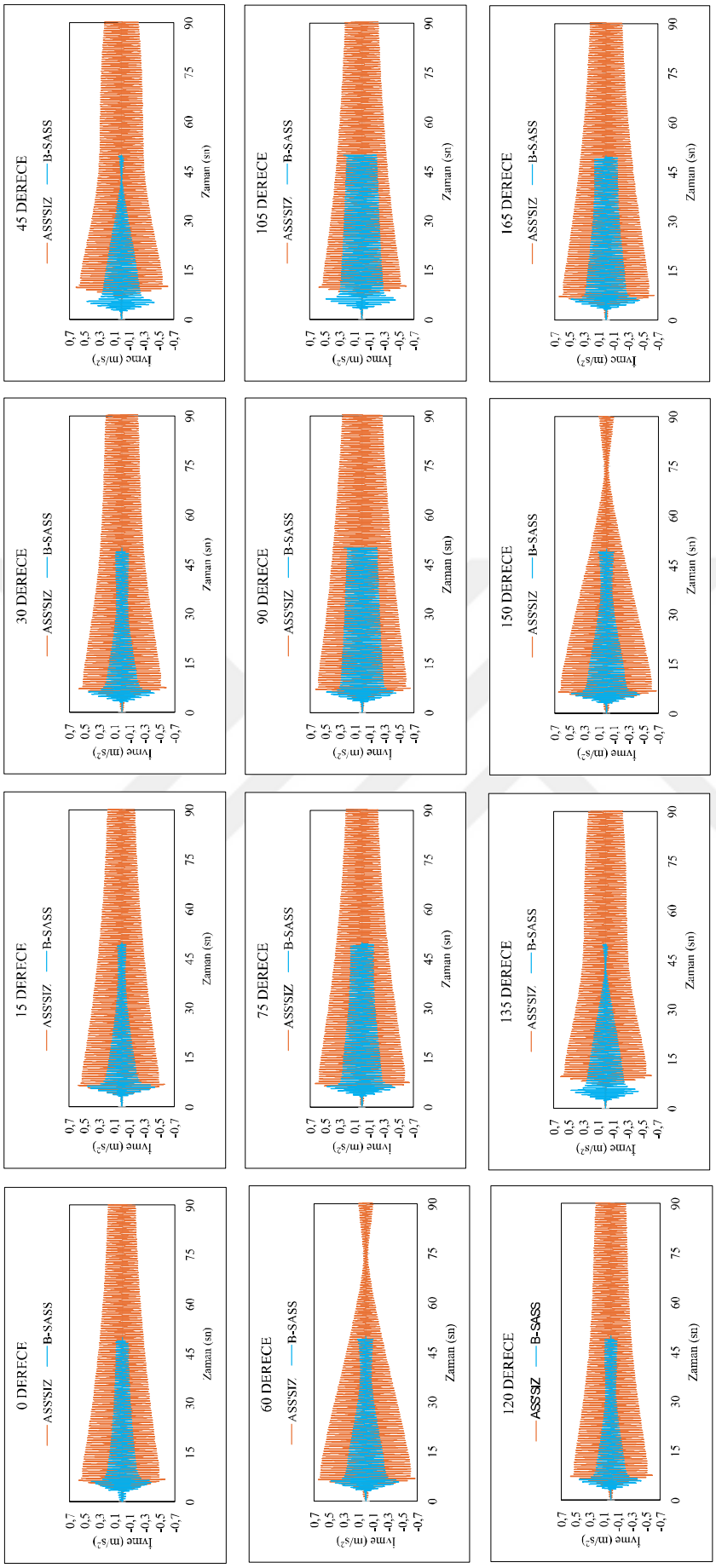
(a)

Şekil 62'nin devamı

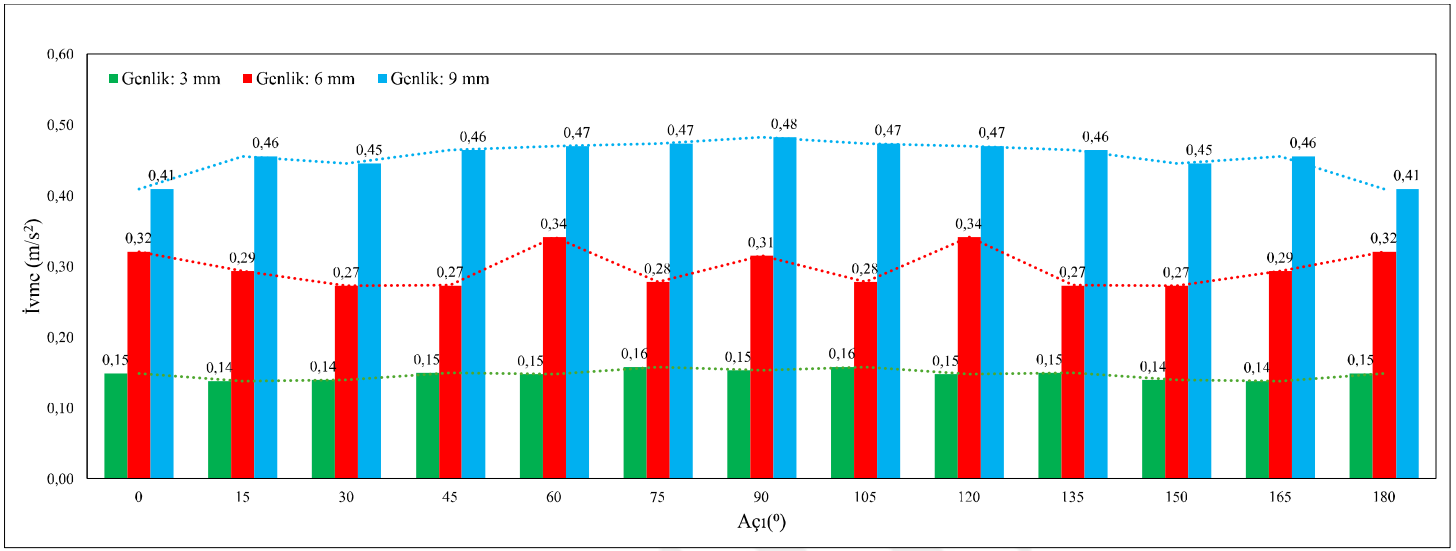


(b)

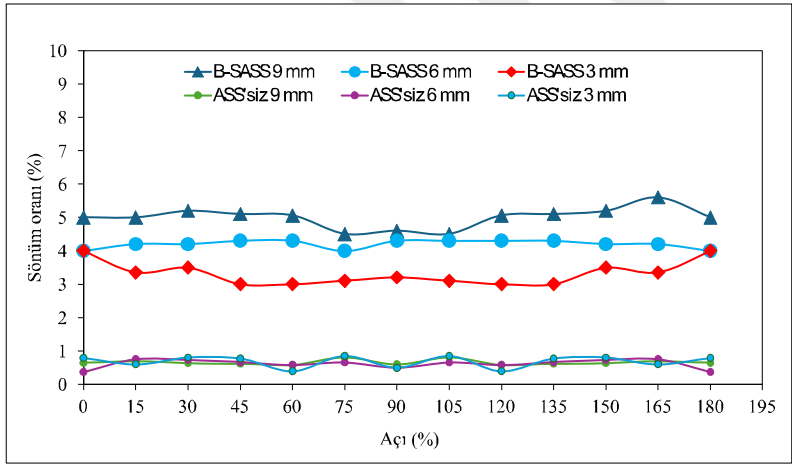
Şekil 62'nin devamı



(c)



(a)



(b)

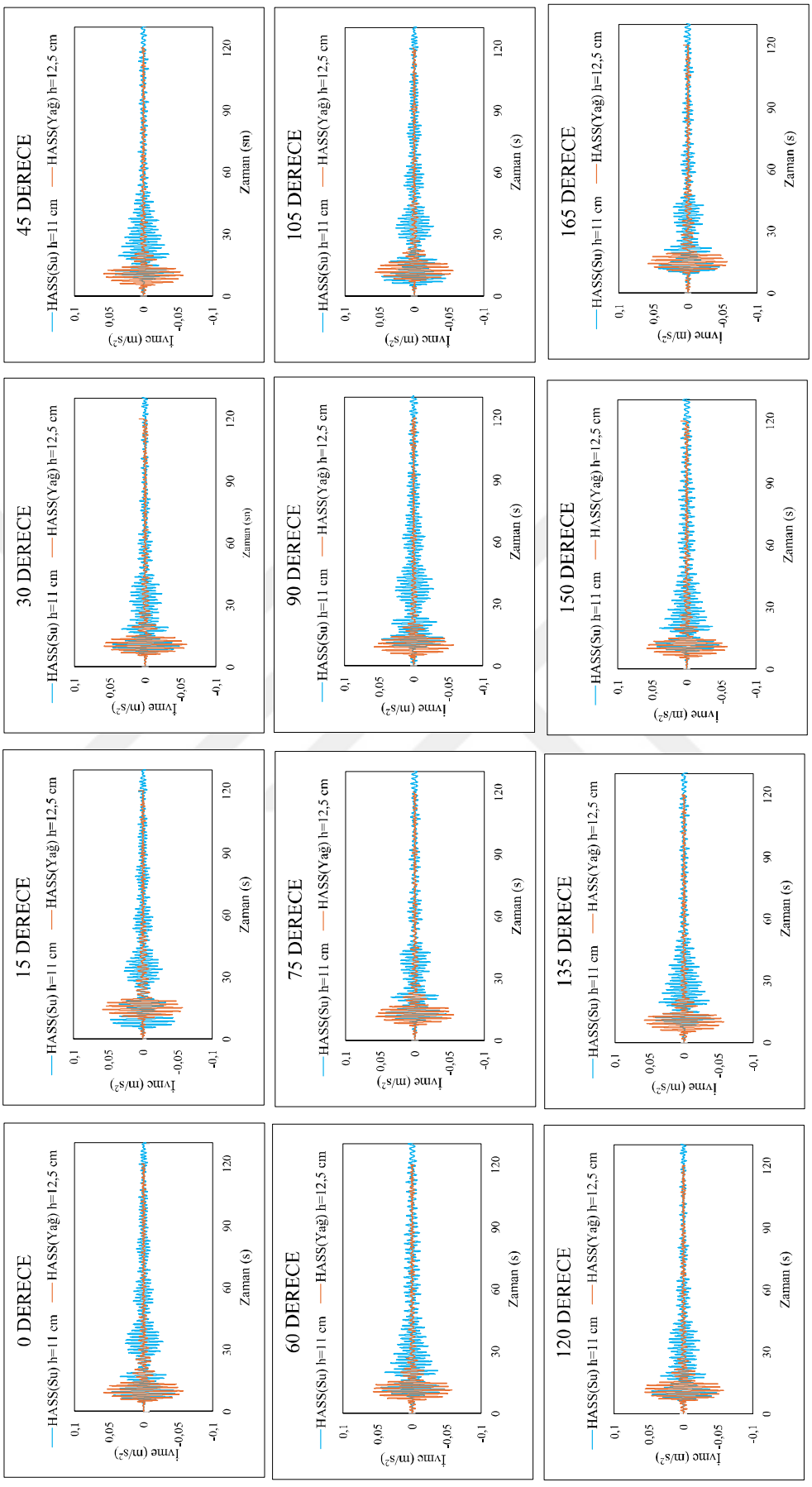
Şekil 63. B-SASS durum için harmonik hareketler neticesinde (a) maksimum ivmelerin ve (b) sönüm oranının farklı açılarda değişimi

2.4.11. Akışkan Sıvı Olarak Makine Yağı Kullanılması Durumu İçin Dinamik Sonuçlar

Bu bölüm kapsamında akışkan sıvı olarak su yerine makine yağı kullanılması durumunda elde edilen dinamik sonuçlar irdelenmiştir. Makine yağı olarak 15w/40 motor yağı (yoğunluk 0.88 g/cm^3, viskozite, 100^{o}C, cSt 12.5-16.3) kullanılmıştır. Tank içerisindeki sıvının makina yapı olması durumu için sarsma masası testleri HASS ve 4-AKSS* sistemleri için 3 mm, 9 mm genlikli harmonik hareketler ve Erzincan depreminin %50'si tekrarlanmıştır. HASS ve 4-AKSS* sistemleri önceki testlerde gösterdikleri efektif dinamik davranış nedeniyle seçilmiştir. Makina yağı için sıvı yükseklikleri Bölüm 2.3 kapsamında sunulan yaklaşımlar ile HASS sistemi için 12.5 cm, 38 cm olarak hesaplanmıştır. Su için bu yükseklikler 11 cm ve 23 cm olarak hesaplanmıştır. Model binanın her iki durum için sarsma masası deneyleri (Şekil 64) harmonik hareketler ve Erzincan depremi için gerçekleştirilmiş ve elde edilen dinamik sonuçlar modelin farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumu için irdelenmiştir (Şekil 65-66). Şekil 65-66 incelendiğinde; HASS ve 4-AKSS* sisteminde makina yağı kullanılması durumunda 3 mm, 9 mm genlikli harmonik hareketler ve Erzincan depremi etkisinde makina yağlı sistemlerin sulu sistemlere göre daha erken (agresif) sönümleme sağladığı, Erzincan depremin tüm kaydı boyunca genel sönüm hızı ve kalıcı titreşimlerin sönümlenmesi bakımından makina yağı daha kararlı ve hızlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her iki sistem için tüm açı durumlarda makina yağı su da olduğu gibi benzer etkinliği sağlamaktadır.



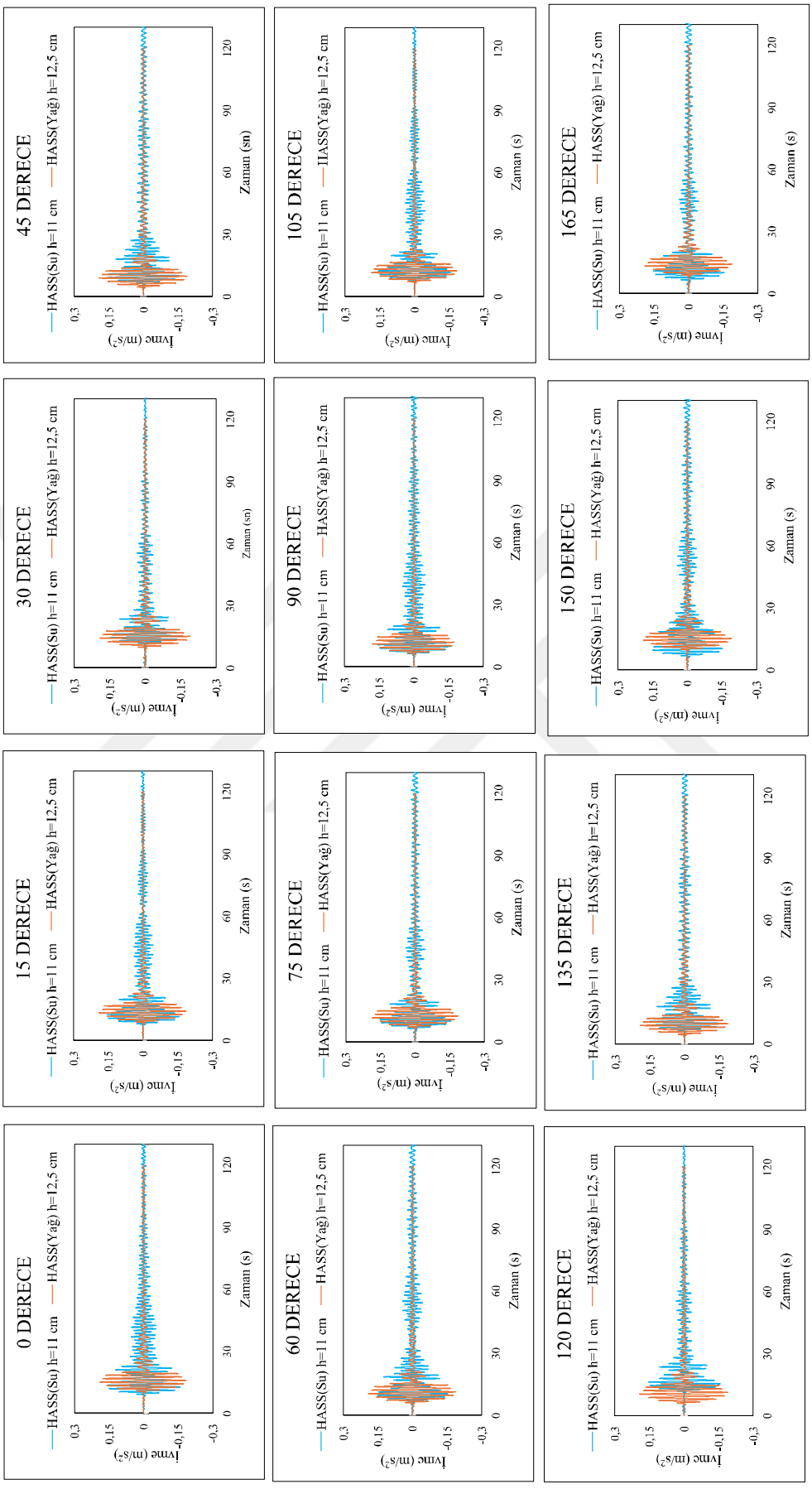
Şekil 64. Model binanın HASS ve 4-AKSS* sistemlerde makina yağı kullanılması durumu için sarsma masası deneyler



(a)

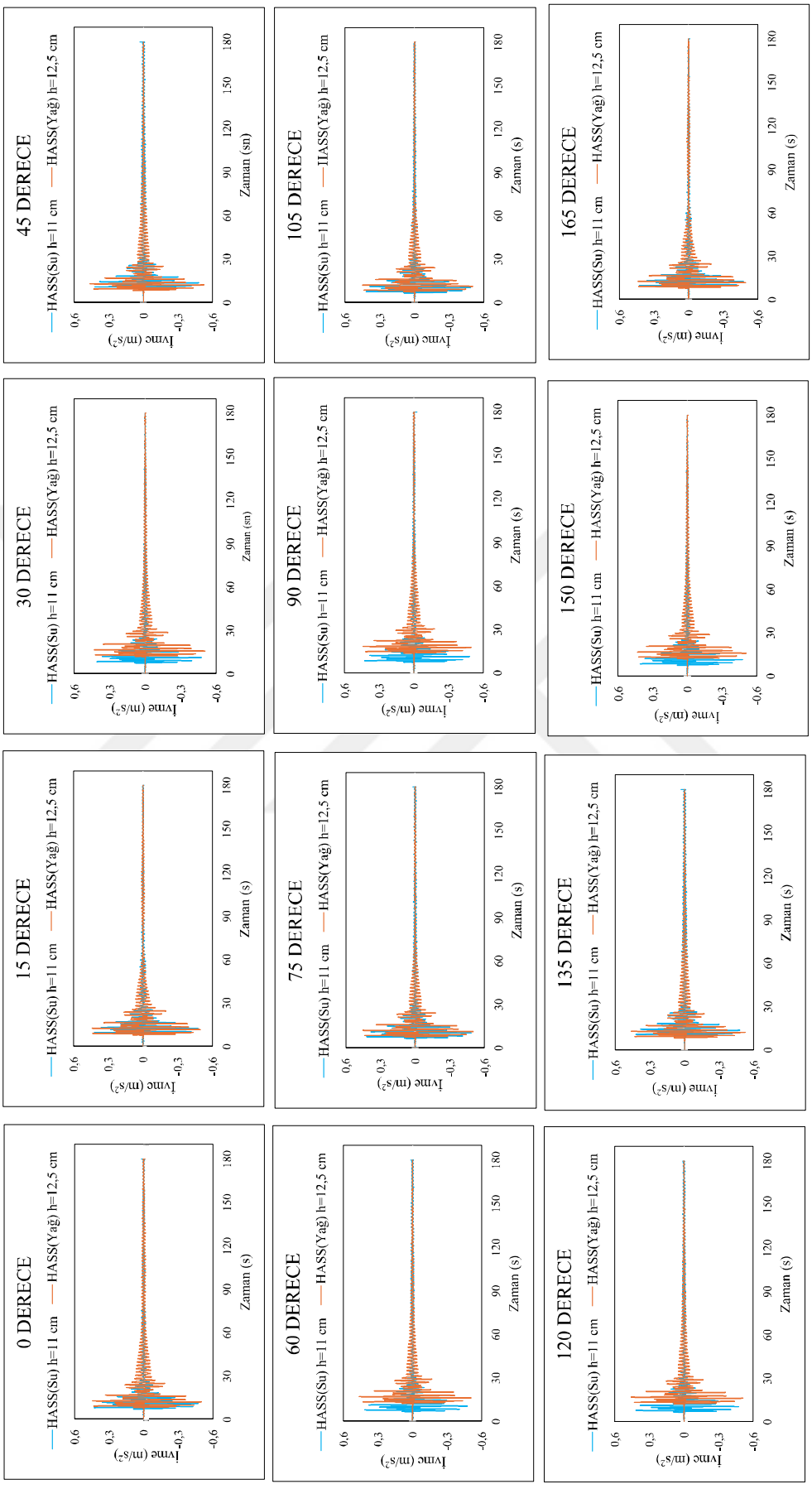
Şekil 65. Model binanın HASS sisteminde makina yağı kullanılması durumunda yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi halinde ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, 9 mm genlik ve (c) Erzincan depremi

Şekil 65'in devamı



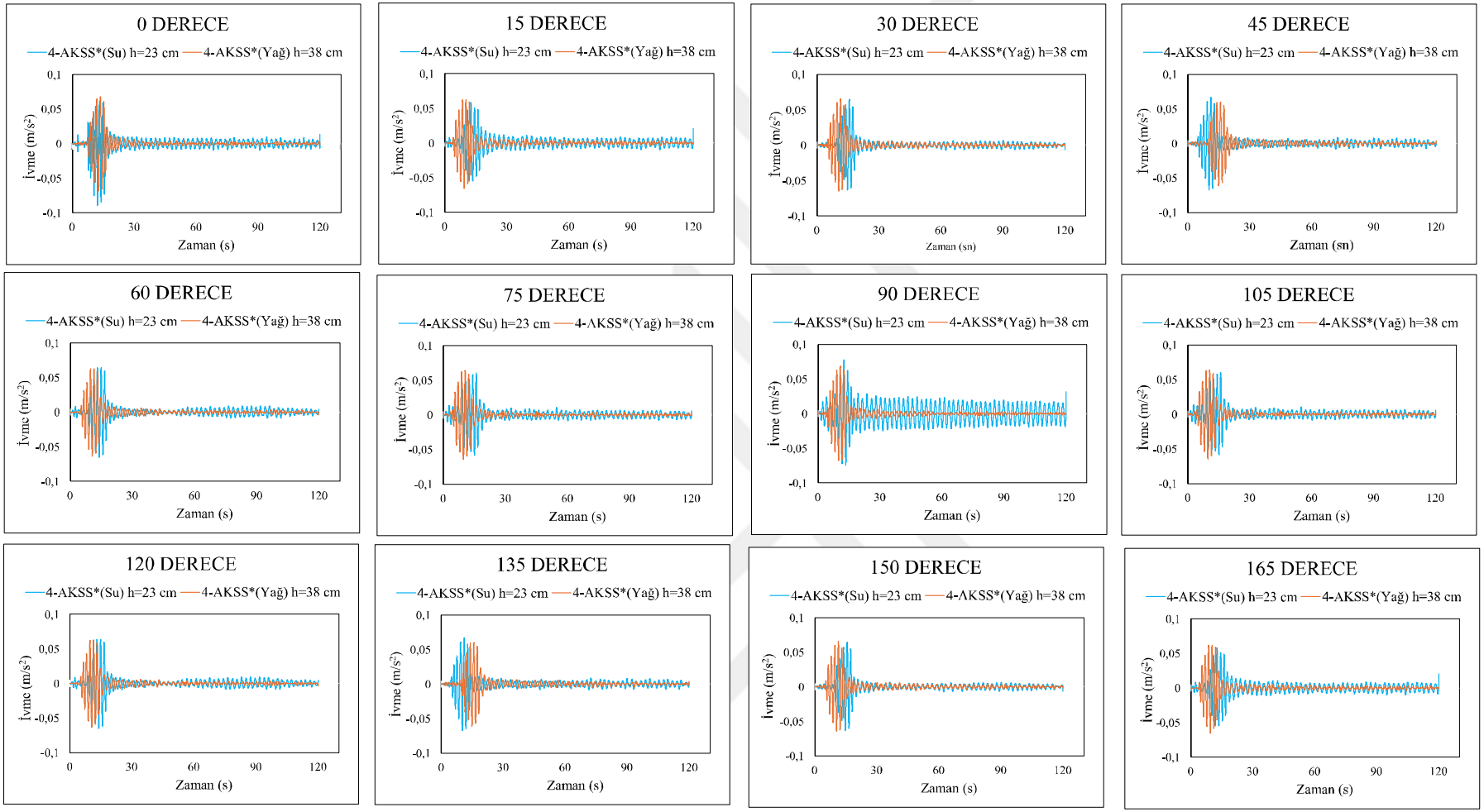
(b)

Şekil 65'in devamı



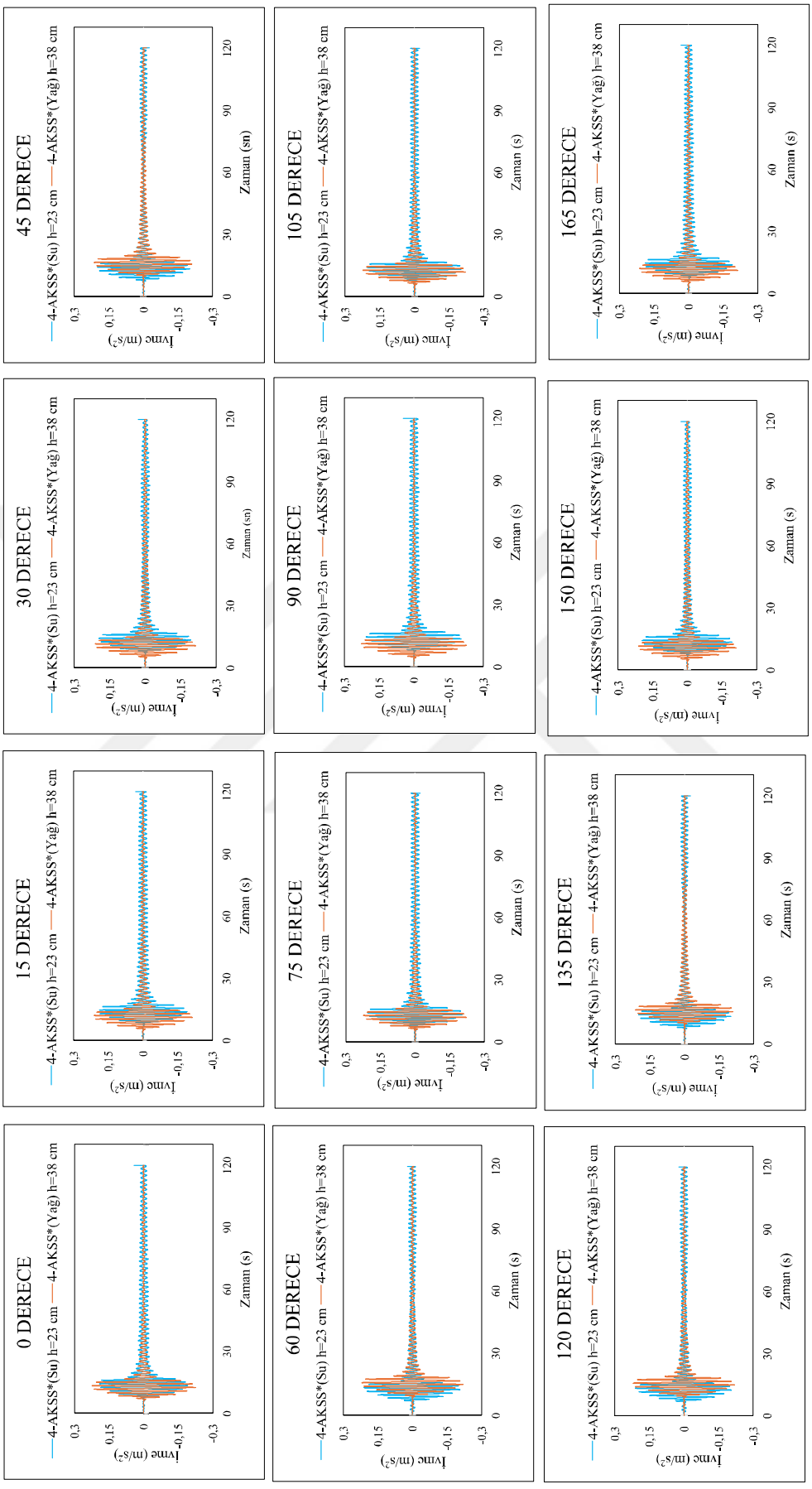
(c)

Şekil 66. Model binanın 4-AKSS* sisteminde makina yağı kullanılması durumunda yer hareketlerinin farklı açılarda etkimesi halinde ivme-zaman grafikleri: (a) 3 mm genlik, 9 mm genlik ve (c) Erzincan depremi



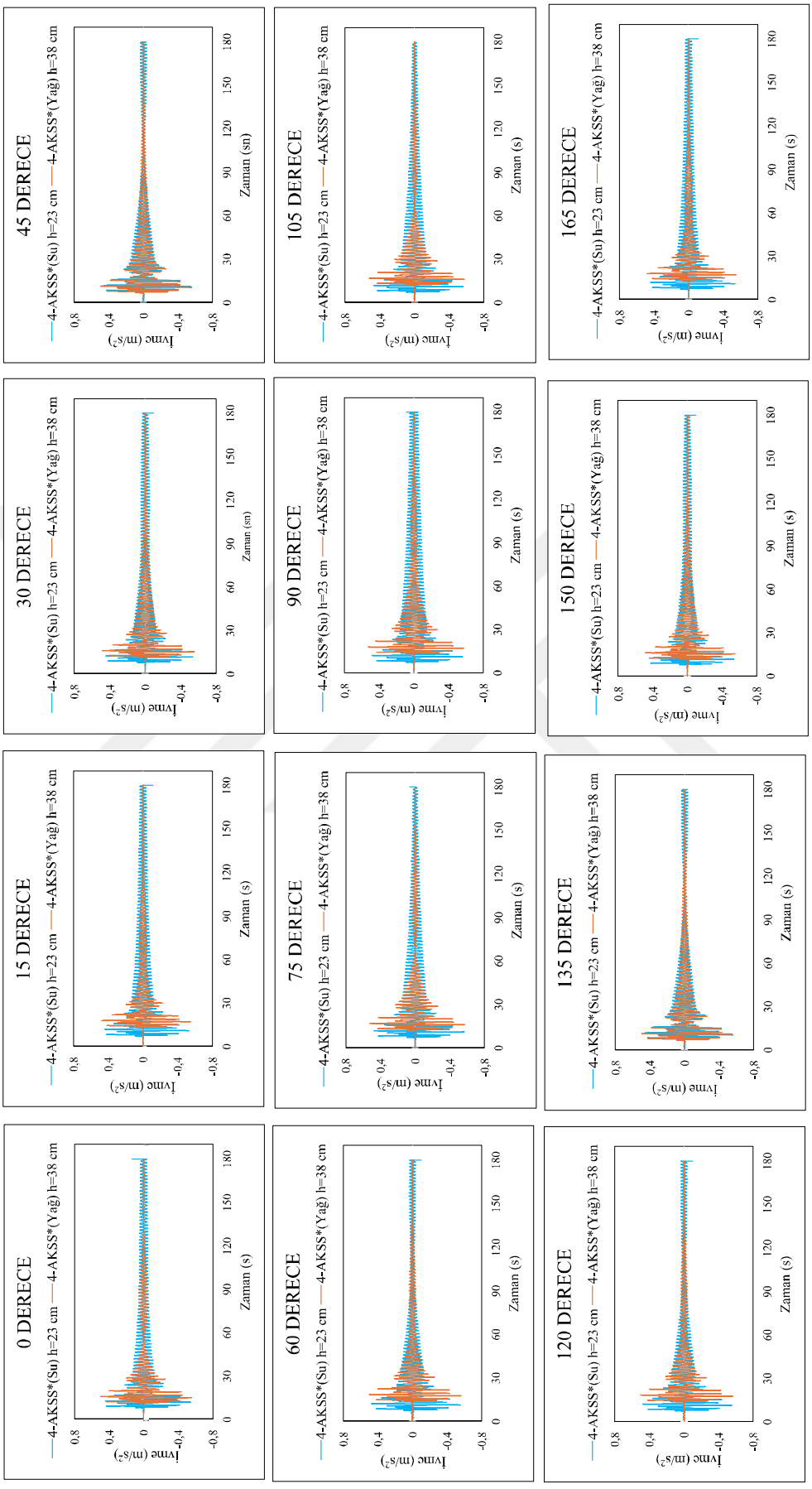
(a)

Şekil 66'nın devamı



(b)

Şekil 66'nın devamı



(c)

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile farklı açılarda yer hareketlerine maruz binalarda titreşim kontrolü için ayarlı sıvı sönümleyici sistemlerin etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda model çelik bir bina kullanılarak 10 farklı geometriye sahip sönümleyici tank sistemi depremin farklı açılarda etkimesi durumu için (0° 15°, 30°, 45°, 60°, 75° 90°, 105°, 120°, 135°, 150° 165°, 180°) sarsma masası üzerinde test edilmiştir. Yer hareketi olarak, 3 adet farklı genlikli harmonik hareket ve 1992 Erzincan depremi kullanılmıştır. Akışkanın viskozitesinin titreşim kontrolündeki etkisini incelemek amacıyla, 2 adet sönümleyici sistem için sarsma masası testleri akışkan olarak su yerine makine yağı kullanılması durumu için tekrarlanmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen temel sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Ayarlı sıvı sönümleyici sistemlerin titreşim kontrolünde oldukça etkin olduğu, binaların farklı açılarda yer hareketlerine maruz kalması durumunda sistemlerin tank geometrilerine bağlı etkinliklerinin değiştiği veya sabit kaldığı ve farklı viskoziteye sahip akışkanların sistemlerin etkinliklerini ayrıca değiştirdiği tespit edilmiştir.
- ASS sistemlerin farklı genliklerde ve/veya frekanslarda yer hareketlerini maruz kalması durumunda etkinlikleri değişmektedir.
- Gerçekleştirilen deneyler neticesinde ASS sistemlerden; DASS %52, SASS %72, AKSS %48, HASS %79, 4-AKSS %64, 4-AKSS* %67, 3L-AKSS %70, HAKSS %60, GAKSS %55 ve B-SASS %25 oranında ortalama ivmeleri ASS'siz sisteme göre azaltmıştır.
- ASS sistemler genel olarak model binada gerçekleşen çarpılma etkisini azaltma eğiliminde davranış göstermiştir.
- DASS ve SASS sistemlerde çakışma meydana gelmiş ve ek sönümleme sağlamak amacıyla, tanka akış sönümleme cihazları (FDD) yerleştirilebilir.
- DASS, AKSS, GAKSS sistemlerinin etkinliği (ivmelerin azalması, sönün oranının artması gibi) binanın farklı açılarda yer hareketine maruz kalması durumunda, artan açı değerleriyle birlikte azalmaktadır.
- Erzincan depreminde test edilen DASS, HASSS, HAKSS, GAKSS ve 4-AKSS* sistemler dinamik tepkileri azaltmışlardır. Özellikle HASS ve 4-AKSS* sistemler

dinamik tepkileri yer hareketinin farklı açılarda etkimesi durumunda çok belirgin azaltmış ve çarpılma etkisini baskılamıştır.

- SASS, HASS, 4-AKSS, 4-AKSS*, HAKSS, 3L-AKSS ve B-SASS sistemlerin etkinliği binanın farklı açılarda yer hareketine maruz kalması durumunda, artan açı değerleriyle birlikte genel olarak değişmemektedir.
- HASS ve 4-AKSS* sisteminde makina yağı kullanılması durumunda makina yağlı sistemlerin sulu sistemlere göre daha erken (agresif) sönümleme sağladığı, Erzincan depremin tüm kaydı boyunca genel sönüm hızı ve kalıcı titreşimlerin sönümlenmesi bakımından makina yağı daha kararlı ve hızlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her iki sistem için tüm açı durumlarda makina yağı su da olduğu gibi benzer etkinliği sağlamaktadır.
- Farklı açı durumlarında ivmelerde meydana gelen değişim ile sönüm oranlarında meydana gelen değişimler benzerdir.
- ASS'siz sistemin sönüm oranı yaklaşık %0.5-1 civarında iken ASS sistemleri ile sönüm oranı yaklaşık %4-25 arasında iyileştirilmiştir.
- Depremin farklı açılarda etkimesi durumu için ivmelerin azaltılması, çarpılma ve çakışma olaylarının minimize edilmesi bakımından en etkili sistemin HASS sistem olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, çok yönlü sismik uyarımlar altında yapıların dinamik davranışlarını iyileştirmeye yönelik yeni nesil pasif kontrol sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Çalışmada incelenen farklı sıvı sönümleyici sistemleri (SASS, HASS, HAKSS, 4-AKSS, 3L-AKSS, B-SASS vb.) hem yönelimsiz (omnidirectional) titreşim azaltma kabiliyeti hem de yüksek enerji yutma potansiyeli göstermiştir. Özellikle yüksek viskoziteli akışkanlar ve çok yönlü akış geometrisine sahip sistemler, deprem etkilerinin yapıya iletilen genliklerini belirgin biçimde düşürmüştür. Bu bulgular, deprem mühendisliğinde daha dayanıklı, enerji yutan ve performans odaklı yapıların tasarımı için pratik bir temel sunmakta; çok yönlü sönümleyici sistemlerin, gelecekteki yüksek katlı binalar ve önemli altyapı yapılarında ekonomik ve etkin bir titreşim kontrol çözümü olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan hareketle, aşağıdaki önerilerin dikkate alınması ve bu konuyla ilgili araştırmaların geliştirilmesi tavsiye edilmektedir.

- Her bir ASS'nin etkinliği deneysel veriler ışığında akışkanın modellenmesi dikkate alınarak numerik olarak irdelenebilir.
- ASS'lerin etkinliği mağnetik sıvılar kullanılarak irdelenebilir
- ASS'lerin farklı deprem kayıtları için optimum özellikleri (su/kütle oranı, h/L oranı gibi) optimize edilmesi irdelenebilir.
- ASS'lerin açık deniz yapılarında ve rüzgar etkilerinde etkinlikleri deneysel ve numerik olarak irdelenebilir.
- ASS'lerin etkinliği çok eksenli sarsma masası deneyleri ile irdelenebilir.
- ASS sistemlerin binalarda burulma etkilerini sınırlandırması durumu irdelenebilir.
- ASS sistemlerin hibrit sistemlerde etkinliği irdelenebilir.

5. KAYNAKLAR

Abe, M., Fujino, Y., & Sano, Y. (1997). Vibration Control by Active Tuned Liquid Damper using Magnetic Fluid, *ASME Design Engineering Technical Conferences*, September 14-17, Sacramento, California, USA.

Aldemir, Ü., & Aydın, E. (2005). Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 435-2005/1.

Altunışık, A. C., Yetişkin A., & Kahya, V. (2018). Experimental study on control performance of tuned liquid column dampers considering different excitation directions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102,59-71.

An, Y., Wang, Z., Ou, G., & vd. (2019). Vibration mitigation of suspension bridge suspender cables using a ring-shaped tuned liquid damper, *Journal of Bridge Engineering*, *24*(4), 1-12.

Anderson, J. G, Semercigil, S. E & Turan, O. F. (2000a). A standingwave-type sloshing absorber to control transient oscillations, *Journal of Sound and Vibration*, 232(5), 839-856.

Anderson, J.G, Semercigil, S. E & Turan, O. F. (2000b) An improved standing-wave-type sloshing absorber, *Journal of Sound and Vibration*, 235(4), 702-710.

Awada, A., Younes, R., & Ilinca, A. (2021). Review of vibration control methods for wind turbines, *Energies,* 14(11), 3058.

Banerji, P., Murudi, M., Shah, A. H., & Popplewell, N. (2000). Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 587-602.

Bauer, H. F. (1960). Theory of fluid oscillations in a circular cylindrical ring tank partially filled with liquid, NASA TND-557.

Bauer, H. F (1984). Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures, *Journal of Sound and Vibration*, 93(1): 117-133.

Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement. (2021). *BK Connect (Version 25.1) (Computer software)*. B&K.

Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement. (2021). *OMA, Operational Modal Analysis (Version 7.1) (Computer software)*. B&K

Cao, L., Gong, Y., Ubertini, F., & vd. (2020). Development and validation of a nonlinear dynamic model for tuned liquid multiple columns dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 487, 115624.

Colwell, S., & Basu, B. (2009). Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control, *Engineering Structures*, 31(2): 358-368.

Corte, WDe, Delesie., C., & Bogaert, PVan. (2007). Sealed tunedlLiquid column dampers: A cost effective solution for vibration damping of large arch hangers. *In: 5th International Conference on Arch Bridges*, 409-416.

Das, S., & Choudhury, S. (2017). Seismic response control by tuned liquid dampers for low-rise RC frame buildings, *Aust. J. Struct. Eng.*, 18(2), 135-145.

Ding, H., Wang, J. T., Lu, L. Q., & Pan, J. W. (2021). Experimental comparison of nonlinear damping performance of toroidal and conventional tuned liquid column dampers, *Nonlinear Dyn.,* 104, 3365-3384.

Froude, W. (1861). On the rolling of ships. *Transactions of the Institution of Naval Architects,* 2, 180-227.

Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chaiseri, P., & vd. (1988). ParametricsStudy on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free oscillation experiment, *Structural Engg./ Earthquake Eng.,* 5(2), 177-187.

Fujino, Y., Pacheco, B. M., Nakamura, S. I., & Warnitchai, P. (1993). Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.,* 22(9),741-758.

Ghaemmaghami, A. R., Kianoush, R., & Yuan, X. X. (2013). Numerical modeling of dynamic behavior of annular tuned liquid dampers for the application in wind towers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28, 38-51.

Ghaemmaghami, A.R., Kianoush, R., & Mercan, O. (2016). Numerical modeling of dynamic behavior of annular tuned liquid dampers for the application in wind towers under seismic loading, *Journal of Vibration and Control*, 22(18), 3858-3876.

Ghosh, A. D, Saha, P. C & Basu, B. (2012) Study of a tank-pipe damper system for seismic vibration control of structures. *In: 15 WCEE.* Lisbon, Portugal: Curran Associates, Inc., 26098–26107.

Vazquez-Greciano, A., Lopez, A. A., Buratti, N., & Herrera, J. M. O. (2024). Magnetic fields to enhance tuned liquid damper performance for vibration control: A Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31,25-45.

Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S, Watkins, R. D., & vd. (1997a). Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA) I., *Engineering Structures*, 19(2), 126-134.

Hitchcock, P. A, Kwok, K .C. S., Watkins, R. D, & vd. (1997b). Characteristic of liquid column vibration absorbers (LCVA) II., *Engineering Structures*, 19(2), 135-144.

Housner, G. W. 1954. Earthquake Pressures on Fluid Containers. Eight Technical Report under Office of Naval Research, CALTECH, Pasadena, California, U.S.A.

Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381-387.

Horie, S., Shimoda, M., Ohno, K-I., Nakamura, J., & Sawada, T. (2007). Effective method of applying magnetic field on a tuned liquid damper using a magnetic fluid, *Int. J. Appl. Electromagn Mech.,* 25,139-143.

Hua, L., & Juang, H. (2012). Experimental study on the vibration mitigation of offshore tension leg platform system with UWTLCD, *Smart Struct. Syst.,* 9(1),71-104.

Issa, J. S. (2013). Optimal design of a new vibration absorber setup for randomly forced systems, *Journal of Vibration and Control* 19(16): 2335-2346.

Jeon, S. H., Seo, M. W., Cho, Y. U., Park, W. G., & Jeong, W. B. (2013). Sloshing characteristics of an annular cylindrical tıned liquid damper for spar-type floating offshore wind turbine, *Structural Engineering Mechanics*, 47(3), 331-343.

Jin, Q., Li, X., Sun, N., Zhou, J., & Guan, J., (2007). Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform, *Marine Structures*, 20, 238-254.

Kaneko, S. & Ishikawa, M. (1999). Modeling of tuned liquid dampers with submerged nets, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 121(3), 334-344.

Kareem, A., & Sun, W. J. (1987). Stochastic response of structures with fluid-containing appendages, *Journal of Sound and Vibration*, 119(3): 389-408.

Kareem, A., Kijewski, T., & Tamura, Y. (1999). Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, *Wind Struct.,* 2(3):201-251.

Kitazawa, M., Nishimori, K., Noguchi, J., & vd. (1992). Earthquake resistant design of a long-period cable-stayed bridge, In: *10th World Conferance on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, 4797-4802.

Konar, T., & Ghosh A. D (2010) Passive control of seismically excited structures by the liquid column vibration absorber, *Structural Engineering and Mechanics* 36(5): 561-573.

Konar, T., & Ghosh, A. D. (2023). A review on various configurations of the passive tuned liquid damper, *Journal of Vibration and Control*, 29 (9-10) 1945-1980.

Lago, A., Trabucco D., & Wood, A. (2019). Damping technologies for tall buildings. DOI: 10.1016/b978-0-12-815963-7.00008-7

Lamb, H. (1932) Hydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge.

Lee, S. C & Reddy, D. V. (1982). Frequency tuning of offshore platforms by liquid sloshin, *Applied Ocean Research*, 4(4):226-231.

Li., S. J, Li., G. Q., Tang, J., & Li, Q. S. (2002). Shallow cylindrical tuned liquid damper for vibration control of high-rise structures, *Struct. Des. Tall Build.*, 11(4), 295-308.

Love, J. S, McNamara, K. P, Tait, M. J, & vd. (2020). Series-type pendulum tuned mass damper-tuned sloshing damper, *Journal of Vibration and Acoustics*, 142(1), 1-8.

Marulli, G., & Moutinho, G. (2024). Experimental testing on tuned liquid dampers for implementation in industrial chimneys, *Sensors*, 24(9), 2800.

Mehrkian, B., & Altay, O. (2020). Mathematical modeling and optimization scheme for omnidirectional tuned liquid column dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 484, 115523.

Modi, V., & Welt, F. (1988). Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing, *J. Wind Eng Ind Aerodyn*, 30(1), 85-94.

Nakamura, S. I., & Fujino, Y. (2002). Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge, *Struct. Eng. Int.,* 12(4): 295-300.

Noji, T., Yoshida, H., Tatsumi, E., & vd. (1991). Verification of vibration control effect in actual structure-Study of vibration control damper using sloshing of water (Part 2). *J. Struct. Const. Eng.,* 419,145-152.

Ocak, A., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M, Kim, S., & Geem Z. W. (2022). Optimization of tuned liquid damper including different liquids for lateral displacement control of single and multi-story structures, *Buildings*, 12(3), 377.

Pandey, D. K, Sharma, M. K. & Mishra, S. K. (2019). A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132: 405-428.

Patil, G. R & Singh, K. D. (2016). Evaluation of sloped bottom tuned liquid damper for reduction of seismic response of tall buildings, *Journal of The Institution of Engineers (India):* Series, A 97(4), 385-394.

Park, S., Glade, M., & Lackner, M. A (2020). Multi-objective optimization of orthogonal TLCDs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine, *Engineering Structures*, 209, 110260.

Peeters, B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*, PhD Thesis, K.U, Leuven, Belgium.

Reiterer, M., & Ziegler, F. (2006). Control of pedestrian-induced vibrations of long-span bridges, *Structural Control and Health Monitoring*, 13(6), 1003-1027.

Rozas, L., Boroschek, R. L., Tamburrino, A., & vd. (2016). A bidirectional tuned liquid column damper for reducing the seismic response of buildings, *Structural Control and Health Monitoring,* 23: 621-640.

SAP2000 (2015). *Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc.,* Version: 17.1.1, Berkeley, California, USA.

Sakai, F., Takeda, S., & Tamaki, T. (1989). Tuned liquid column dampers – new type device for suppression of building vibrations, *In: Proc. of International Conference on High Rise Buildings*, Nanjing, China, 926-931.

Sakai, F., Takaeda, S., & Tamaki, T. (1991). *Damping Device for Tower-like Structure*, US5070663. USA.

Saoka, Y., Sakai. F., Takaeda. S., & vd. (1988). *On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers*, In: Annual meeting of JSCE, Tokyo, Japan.

Shah, M. U., & Usman, M. (2022). An experimental study of tuned liquid column damper controlled multi-degree of freedom structure subject to harmonic and seismic excitations, *Plos One*, 17(6), e0269910.

Sayar, B. A., & Baumgarten, J. R. (1981). Pendulum analogy for nonlinear fluid oscillations in spherical containers, *Journal of Applied Mechanics*, 48(4), 769-772.

Sayar, B. A and Baumgarten J. R (1982) Linear and nonlinear analysis of a fluid slosh dampers, *AIAA. Journal,* 20(11), 1534-1538.

Sawada, T., Tanahashi, T., & Kikura, H. (1999). Kinematic characteristics of magnetic fluid sloshing in a rectangular container subject to non-uniform magnetic fields, *Exp. Fluids*, 26(3), 215-221.

Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., & vd. (1992). Modelling of tuned liquid damper (TLD), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, 1883-1894.

Sun, L. M & Fujino, Y. (1994). A semi-analytical model for tuned liquid damper (TLD) with wave breaking, *Journal of Fluids and Structures*, 8(5): 471-488.

Tait, M. J. (2008). Modelling and preliminary design of a structure- TLD system, *Engineering Structures*, 30(10), 2644-2655.

Tamura, Y., Kousaka, R., & Modi, V. J. (1992). Practical application of nutation damper for suppressing wind-induced vibrations of airport towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* 41-44: 1919-1930.

Tamura Y, Fujii K, Ohtsuki T, et al. (1995). Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitations. *Engineering Structures*, 17(9): 609-621.

Tamura, Y. (1998). Application of damping devices to suppress wind-induced responses of buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76: 49-72.

Teramura, A., & Yoshida, O. (1996). Development of vibration control system using U-shaped water tank. *In: 11th World Conferance on Earthquake Engineering,* Acapulco, Mexico, 1-8.

Vandiver, J. K & Mitome, S. (1978). The effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms, *In: 10th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, USA.

Vafaei, M., Pabarja, A., & C. Alih, S. (2021). An innovative tuned liquid damper for vibration mitigation, *International Journal of Civil Engineering*, 19, 1071-1090.

Vandiver, J., Mitome, S. (1979). Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms, *Appl. Ocean. Res.*, 1(2); 67-74.

Wang, Q., Qiao, H., Domenico, D. D., Zhu, Z., & Tang, Y. (2021). Seismic performance of optimal Multi-Tuned Liquid Column Damper-Inerter (MTLCDI) applied to adjacent high-rise buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106653.

Watts, D. (1883). *On a method of reducing the rolling of ships at sea.* Transactions of the Institution of Naval Architects 24, 165-191.

Watkins, R. D. (1991). *Tests on Various Arrangements of Liquid Column Vibration Absorbers Show Affiliations*, Research Report R639.

Zeng, X., Yu, Y., Zhang, L., Liu, Q., & Wu, H. (2015). A new energyabsorbing device for motion suppression in deep-sea floating platforms, *Energies*, 8(1),111-132.

Zuo, H., Bi, K., & Hao, H. (2020). A state-of-the-art review on the vibration mitigation of win turbines, *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121,109710.

Xu, Y. L, Kwok, K. C. S & Samali, B. (1992b). The effect of tuned mass dampers and liquid dampers on cross-wind response of tall/slender structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(1): 33-54.

ÖZGEÇMİŞ

Brahim Ahmat Idriss, İlköğrenimini Sultan Mahamat Ourada Okulu'nda tamamladıktan sonra, 2000-2007 yılları arasında lise eğitimini Abeche/Çad'da bitirdi. 2009-2010 öğretim yılında Ain Temouchent Üniversitesi (Cezayir) İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2012 yılında mezun oldu. Aynı yıl, Ain Temouchent Üniversitesi (Cezayir) İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tezli yüksek lisans programına başladı. 2014 yılında Yüksek Lisans Tezini tamamladı. 2017 yılında Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı tarafından verilen Türkiye Bursları'nı almaya hak kazandı. 2017-2018 yılında TÖMER'de Türk Dili Eğitimini tamamladı ve akabinde 2018 yılından Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı.

Idriss, B. A. Günaydın, M., Altunışık, A.C., ve Kahya, V. (2023). Design Phases and Effectiveness of Tuned Liquid Damper and Tuned Liquid Column Damper in Seismic Induced Vibration. *3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23)*, Trabzon, Türkiye.

Idriss, B. A., Günaydın, M., Sunca, F., Okur, F. Y., Şahin, M. C., Karahasan, A. K., Altunışık, A.C., ve Akbulut, Y. E. (2025). Dynamic Vibration Control Through Tuned Liquid Damper Under Different Excitation Angle Using Shaking Table Tests. *4th International Civil Engineering & Architecture Conference (ICEARC'25*), Trabzon, Türkiye.