



**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SİSMİK İZOLATÖRLÜ YAPILARDA RİJİT CİSİMLERİN
SALLANMA HAREKETİNİN İNCELENMESİ**

MUSTAFA DURSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

ARALIK – 2024

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİSMİK İZOLATÖRLÜ YAPILARDA RİJİT CİSİMLERİN
SALLANMA HAREKETİNİN İNCELENMESİ

MUSTAFA DURSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

ARALIK – 2024

YOZGAT



YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı öğrencisi Mustafa DURSUN'un hazırladığı “**Sismik İzolatörlü Yapılarda Rijit Cisimlerin Sallanma Hareketinin İncelenmesi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 23/12/2024 günü saat 11:00'de yapılmış, tezin onayına oy birliği ile karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR

(Danışman)

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Yuşa ŞAHİN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Prof. Dr.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğini beyan ederim.

Mustafa DURSUN

23/12/2024

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Sismik İzolatörlü Yapılarda Rijit Cisimlerin Sallanma Hareketinin İncelenmesi” isimli tez çalışmasının tasarlanmasından başlayarak, araştırılmasına, planlanmasına ve yazılmasına kadar bütün aşamalarında desteğini, emeğini ve yardımlarını bir an olsun esirgemeyen, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşarak bana ilham veren, her aşamada beni teşvik eden, aynı zamanda rol modelim olan çok değerli danışmanım Doç. Dr. Hüseyin ÇİLSALAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim sürecinde eğitim aldığım bütün hocalarıma ve Tez Savunma Jüri Başkanlığı’nı kabul eden sayın Doç. Dr. Oğuz DÜĞENCİ’ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans hayatım boyunca karşıma çıkan zorluklarda maddi ve manevi her türlü yardımı ve desteğini karşılıksız sağlayan aileme minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tez çalışmamın her aşamasında desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan arkadaşım Filiz ARSLAN’a teşekkür ederim.

Mustafa

DURSUN

23/12/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SİSMİK İZOLATÖRLÜ YAPILARDA RİJİT CİSİMLERİN SALLANMA HAREKETİNİN İNCELENMESİ

MUSTAFA DURSUN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. HÜSEYİN ÇİLSALAR

Sismik izolasyon özellikle deprem kuşağındaki yapılara etki eden sismik tehlikenin azaltılmasında etkili bir yoldur. Bu teknoloji, yapılardaki deplasman taleplerini azaltırken aynı zamanda da deprem performansını artırmaktadır. Bu iyileşme hem yapısal hem de yapısal olmayan elemanların korunması açısından olabilir. Böylece, sismik izolatörler bina fonksiyonelliği açısından önemli olan herhangi bir kattaki rijit cisimlerin performansını iyileştirir. Fakat rijit cisimlerin davranışı deprem şiddetine bağlı olan izolatör özellikleri ile değişmektedir. Sürtünmeli izolatörlü sistemlerde önemli parametrelerden biri olan sürtünme katsayısı kayma yüzeyi üzerinde deprem esnasında oluşan sıcaklıktan etkilenmektedir. Fakat sürtünme katsayısındaki bu sıcaklık genellikle sürtünmeli izolatörlü yapıların modellemesinde ihmal edilmektedir. Bu çalışma kapsamında farklı türdeki yapısal çerçeve modellerinde bulunan rijit cisimlerin devrilme olasılıkları araştırılmıştır. Rijit objelerin devrilme performansına ilişkin parametrik bir çalışma yapılmış ve sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlılığının rijit cisimlerin devrilme kırılma durumuna etkileri ortaya konmuştur.

2024, xvii +97 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sismik izolatör, Sürtünmeli sarkaç, Rijit cisim, Devrilme olasılığı

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF ROCKING RESPONSE OF RIGID BODIES IN SEISMIC ISOLATED STRUCTURES

MUSTAFA DURSUN

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. HÜSEYİN ÇİLSALAR

Seismic isolation is an effective way to reduce seismic hazard on structures, especially for those ones located in earthquake prone areas. While this technology reduces displacement demand on structures, it enhances seismic performance at the same time. This enhancement can be in terms of protection of both structural and nonstructural components. Thus, seismic isolators improve the performance of rigid bodies on any floor of a building, which is very important in terms of functionality of the building. However, the behavior of rigid bodies are affected by the properties of the isolators, which depend on the intensity of earthquake shaking. Friction coefficient, an important parameter for friction pendulum isolators, is affected by the temperature on the sliding surface during an earthquake. However, change in friction coefficient are generally ignored for modeling of structures with friction isolators. In this study, probability of overturning of different rigid bodies on structural frame models are investigated. A parametric study related to overturning performance of the rigid bodies are performed and effect temperature dependence of friction coefficient on overturning of rigid body fragility curves are represented.

2024, xvii +97 pages

Keywords: Seismic isolator, Friction pendulum, Rigid body, Overturning probability

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAY SAYFASI	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
RESİMLER LİSTESİ	xvi
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. RİJİT CİSİMLERİN SALLANMA HAREKETİ	8
3. SİSMİK İZOLATÖRLER VE SÜRTÜNMELİ SARKAÇ SİSTEMLERİ	13
3.1 Sismik izolasyonun tarihçesi.....	13
3.2 Sismik izolasyon çeşitleri	13
4. İZOLATÖRLÜ BİNA MODELLERİ.....	23
5. DEPREM İVME KAYITLARI.....	26
6. ANALİZ SONUÇLARI	29
7. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	38
8. KAYNAKLAR.....	40
EKLER	44

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Sismik enerji sönümleyicilerin avantaj ve dezavantajları	15
Tablo 4.1. Kullanılan yapı sistemlerine ait bilgiler	23
Tablo 6.1. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin açıklığa bağlı sonuçları.....	36
Tablo 6.2. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin efektif periyoda bağlı sonuçları.....	37
Tablo 6.3. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin açıklığa bağlı sonuçları.....	37
Tablo 6.4. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin sürtünme değerine bağlı sonuçları.....	37

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. AFAD Deprem Haritası geçmişİ.....	1
Şekil 1.2. Sırası ile deprem izolatörsüz ve deprem izolatörlü yapıda yatay hareket.....	2
Şekil 2.1. Rijit bir cismin yer hareketi altında sallanması.....	9
Şekil 2.2. Enerji kaybına ilişkin katsayı en/boy ilişkisi	11
Şekil 2.3. Örnek deprem ivmesi kaydı	12
Şekil 3.1. Sürtünmeli sarkaç sistemi çalışma prensibi	16
Şekil 3.2. Sürtünmeli sarkaç sistemi öğeleri (TBDY).....	17
Şekil 3.3. Üç sürtünme yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemi.....	17
Şekil 3.4. Sürtünmeli sarkaç sisteminin normalize edilmiş kuvvet deplasman grafiği..	18
Şekil 3.5. Sürtünmeli sarkaç sistemi temel parametreleri	18
Şekil 3.6. Deprem ivmesi altında sıcaklık etkisi ile ve sıcaklık etkisi olmadan elde edilen kuvvet deplasman eğrisi.....	20
Şekil 3.7. Deprem esnasında oluşan izolatör üzerindeki sıcaklık değeri	21
Şekil 3.8. Sürtünme katsayısının sarsıntı boyunca değişimi	22
Şekil 4.1. İzolatörlü 6 katlı 3 açıklıklı yapı modeli	25
Şekil 5.1. Periyot değeri 4,25 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları	27
Şekil 5.2. Periyot değeri 4,25 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları	28
Şekil 5.3. Periyot değeri 5,00 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları	28
Şekil 6.1. Sürtünmeli sarkaç sistemli bir yapının yer ve çatı katında meydana gelen toplam ivme grafikleri	30
Şekil 6.2. Örnek kümülatif dağılım fonksiyonu	31
Şekil 6.3. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılgenlik eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PTV model)	32
Şekil 6.4. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılgenlik eğrileri (Sürtünme değeri % 8 PTV model)	33
Şekil 6.5. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılgenlik eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PV model).....	34
Şekil 6.6. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılgenlik eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PV model).....	35
Şekil Ek. 1. 3 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılgenlik eğrileri.....	44

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

- Şekil Ek. 107.** 9 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri97
- Şekil Ek. 108.** 9 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri97



RESİMLER LİSTESİ

Resim

Sayfa

Resim 1.1. Deprem sırasında devrilen cisim3



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

B

: Rijit cismin eni

H

: Rijit cismin boyu

θ

: Rijit cismin dönme açısı

μ

: Sürtünme katsayısı

λ

: Üst yapı ağırlığının toplam yapı ağırlığına oranı

Kısaltmalar

Açıklamalar

PV

: Hızın sürtünme katsayısı üzerine olan etkisinin dikkate alındığı model

PTV

: Sıcaklık ve hızın sürtünme katsayısı üzerine olan etkisinin dikkate alındığı model

P50%

: %50 devrilme olasılığına karşılık gelen g cinsinden spektral ivme değeri

P80%

: %80 devrilme olasılığına karşılık gelen g cinsinden spektral ivme değeri

Teff

: Elastik ötesi davranışa bağlı olarak hesaplanan periyot değeri

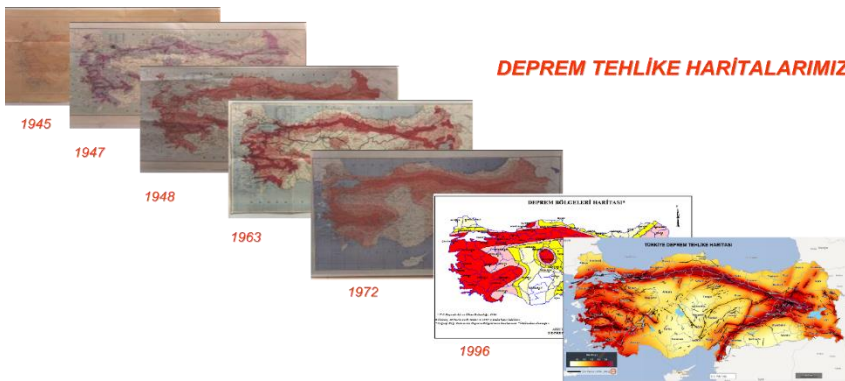
TBDY

: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Üzerinde yaşadığımız yer kabuğu var olmaya başladığından itibaren değişime uğrayarak insanları etkilemiştir. Bu etkilerden en önemlilerinden biri ise depremlerdir. Depremler, yer kabuğunu oluşturan plakların kayarak birbirleriyle etkileşimlerinden dolayı karşılaştığımız ve etkisinin büyük olduğu doğa olaylarıdır. Ülkemiz de deprem kuşağında yer aldığından dolayı bazen büyük ve hayatı doğrudan etkileyen depremlere maruz kalmaktadır. Bu depremler hem mal hem de can kaybına neden olmaktadır.

Ülkemiz tarih boyunca çeşitli büyük çaplı depremlere maruz kalmıştır. Bu depremlerde, birçok yapı hasar görmüş, yıkılmış ve çok sayıda can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Ülkemizde yaşanan büyük depremlerden olan 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş merkezli depremlerde de çok sayıda yapı yıkılmış, hasar almıştır ve can kayıpları yaşanmıştır. 1999 yılında yaşanan depremler de ülkemizde yaşanan büyük depremlere birer örnek olarak gösterilebilir. Ülkemizin deprem kuşağında olmasından dolayı deprem oluşturabilecek fay hatlarına bağlı olarak deprem tehlikesini ve yer hareketlerini belirleyebilmek için AFAD tarafından “Türkiye Deprem Haritası” çıkarılmıştır. Bu haritadan alınan parametreler ışığında ve yönetmeliklerin belirlemiş olduğu yöntemlerle yapıların analizi ve tasarımı yapılmaktadır. Aşağıda verilen şekilde gösterilen haritalar ülkemizdeki deprem tehlike haritasının yıllar içerisindeki değişimini göstermektedir (<https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>).

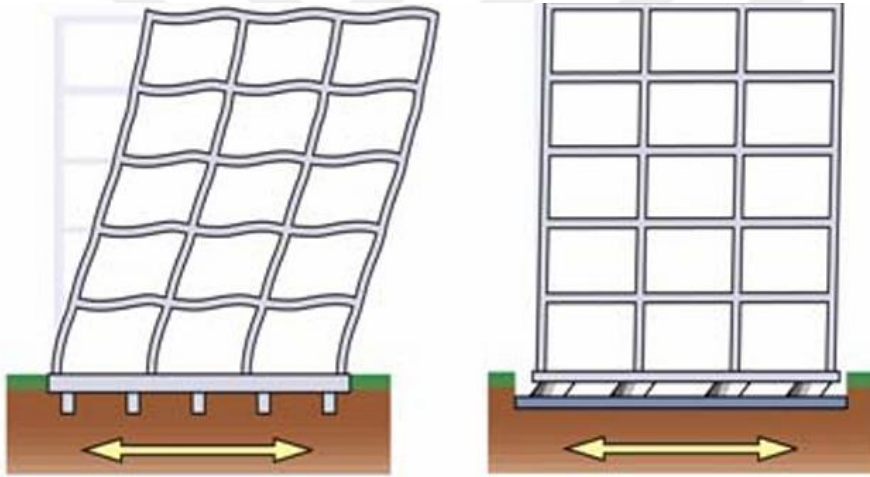


Şekil 1.1. AFAD Deprem Haritası geçmişi

İçerisinde yaşadığımız yapılar, yer kabuğunun etkisiyle deprem hareketine maruz kalmaktadır. Deprem etkileri, yapılarda meydana gelen yer değiştirmeden dolayı yapının temelini harekete zorlayarak üst kısımlara doğru ilerler. Bu durumda oluşan etkiler ve

kuvvetler yapıyı düşey yüklerin dışında yatay olarak da zorlamaktadır. Hatta yapıda burulma etkisi oluşturarak yapının dönmesine de neden olabilmektedir.

Yapıların maruz kaldıkları deprem etkilerine göre tasarımı yapılırken hem depremden dolayı oluşacak olan taleplere karşı koyacak yeterli rijitliğe hem de deprem enerjisini sönümleyerek hasar almasını sınırlı düzeyde tutacak yeterli sönümü oluşturabilecek sünekliğe sahip olması göz önünde tutularak tasarlanmalıdır. Ancak bu durum tasarımcıları tasarım yapma konusunda zorladığından ve yapının kullanılışlılığını etkilediğinden, başka bir yöntem olan, deprem etkilerinden yapıyı izole edecek izolator sistemleri geliştirilmiştir. Zamanla da geliştirilmeye devam etmektedir. Symans (2009) tarafından verilen, Şekil 2.1’de deprem izolatörlü ve izolatörsüz bir yapının davranışı temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Sırası ile deprem izolatörsüz ve deprem izolatörlü yapıda yatay hareket

Sismik izolasyon yöntemleriyle yapının üzerinde bulunduğu zeminden dolayı yapıya aktarılan yer hareketi belli oranda sönümlenmekte ve yapıya etki edecek olan deprem enerjisi azalmaktadır. Böylece yapı elemanlarında meydana gelecek olan talep değerleri azalmaktadır. Bu ise yapının deprem esnasında hasar almadan veya az bir miktar hasar alarak depremi atlmasına olanak sağlamaktadır. Genellikle iki farklı tür olan elastometrik ve sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler yaygın olarak deprem izolasyonunda kullanılmaktadır (Constantinou vd. 2011).

Elastometrik izolatörler kauçuğun sönümleme ve geri çağırma özelliğinden faydalanılarak yapıya olan etkileri azaltan izolatörler olarak adlandırılabilir. Sürtünmeli sarkaç

sistemlerinde ise belli bir eğrilik yarıçapına sahip yüzey üzerinde kayan bir disk elemanın sürtünmeden dolayı enerji sönümlenmesi ile deprem etkileri azaltılmış olur. Her iki tip izolatörde de elemanların üzerinde bulunan eksenel yük düzeyi önem arz etmektedir. Yatayda harekete karşı gösterilecek olan direnç bu eksenel yüke ve bazı diğer parametrelere bağlı olarak farklılık gösterir.

İzolatörler sadece yapıda oluşan talep değerlerinin azaltılmasında değil, yapıların deprem performansının da artırılmasında kullanılmaktadır. Yapıda oluşacak göreceli kat ötelemeleri veya ivmeler istenilen seviye içerisinde tutularak yapıda verilen hizmetin deprem esnasında dahi devam etmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca, yapı içerisinde bulunan bazı cisimlerin korunması da son derece önem arz edebilmektedir. Örneğin bir hastane yapısı içerisinde bulunan bir cihazın maliyeti yapının toplam yapım maliyetinin üzerinde olabilmektedir. Dolayısı ile bu tür cihazların korunması yapının korunması kadar önemlidir.

Bu nedenle yapı içerisinde bulunan cisimlerin devrilme durumlarının incelenmesi ve bu durumların yapının bulunduğu bölgedeki deprem tehlikesi ile ilişkilendirilmesi yapının tasarım aşamasından sonra, yapı içerisinde kullanılacak olan cihaz vb. objelerin kullanımı açısından önemlidir. Yapı içerisinde bulunan eşyalar sabitlenmediğinde deprem anında yaptıkları hareketler insanları psikolojik olarak etkilemektedir. Hastaneler, veri depolama tesisleri gibi önemli yapılarda bulunan teknik cihazlar, kullanılan bazı ağır cihazlar, salınım hareketleri sonucunda kendilerine bağlı sistemleri etkileyerek gerektiğinde kullanımlarının kesilmemesi gerekmektedir. Cimellaro vd. (2012) tarafından verilen ve Resim 1.1 deprem sırasında devrilen bir cism gösterilmektedir.



Resim 1.1. Deprem sırasında devrilen cisim

Housner tarafından yapılan çalışma rijit objelerin yer hareketi açısından incelenmesinde ilk çalışmalardan biridir (Housner, 1963). Bu çalışma kapsamında belirli bir harmonik yer hareketi altında rijit cisimlerin davranışı araştırılmıştır.

Yim vd. (1980) tarafından ise rijit cisimlerin davranışının araştırılması ve yer hareketinden dolayı meydana gelen yer ivmesinin özelliğine bağlı olarak çıkarımlar yapılmıştır. Ayrıca olasılıksal değerlendirmelerin yapıldığı çalışmada bazı tahminler yapılarak rijit cisimlerin sarsıntı altındaki davranışları araştırılmıştır.

Makris ve Roussos (1998) yakın fay etkisinde bulunan yapılardaki rijit cisimlerin davranışını incelemiştir. Yer hareketinden dolayı oluşan sinyalin tipine bağlı olarak farklı çıkarımlar yapılmıştır. Elektrik ekipmanlarının davranışına dair farklı önerilerde bulunulmuştur. Ayrıca rijit objelerin davranışı açısından farklı parametreler de farklı çalışmalarda incelenmiştir (Zhang ve Makris, 2001; Makris ve Zhang, 2001).

Arredondo ve Reinoso (2008) frekans ve bazı diğer yer hareketlerinin maksimum değerine bağlı olarak sallanma hareketini incelemiştir. Maksimum hız, ivme ve frekans değerlerinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bir tahmin denklemi de sunulmuştur.

Veeraraghavan vd. (2020) tarafından rijit cisimlerin sallanma hareketi incelenmiş ve iki rijit cisim arasındaki etkileşime dair sonuçlar sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda bir algoritma önerilmiştir ve bu algoritmanın geçerliliği araştırılmıştır.

Vassiliou ve Makris (2012) tabanı yer hareketlerinden yalıtılmış bir zemin üzerinde duran rijit cisimlerin hareketini incelemiştir. Çalışmada küçük objelerin korunması açısından taban yalıtımın önemli olduğu belirtilmiştir. Hatta rijit bir taban üzerinde duran tarihi antik klasik kolonların sismik izolatörlü olması durumuna göre daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Hatta izolatör periyodunun büyük olması durumunda dahi bu antik klasik kolonların rijit taban üzerindeki performansının daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

Contento ve Di Egidio (2009) tarafından taban yalıtımının faydaları araştırılmıştır. Genel olarak taban izolatör sistemlerinin rijit cisimlerin sallanma hareketi sonucunda meydana gelen tepkilerini belirtilmiştir. Ancak sismik izolatörlerin deplasman kapasitesine ulaşması ve bu noktada bir engel ile karşılaşması sonucunda ise sismik izolasyonun etkili olmadığı, davranışı daha da kötüleştirdiği belirtilmiştir.

Di Egidio ve Contento (2008) tarafından yapılan çalışmada izolotörlü yapılarda meydana gelen rijit yapıların tepkileri tabanı izolotörsüz olan yapılardan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Taban yalıtımının etkili olabileceği belirtilen bu çalışmada sürtünme katsayısının da etkisi araştırılmıştır. Sürtünme katsayısının artması sonucunda rijit cismin üzerinde bulunduğu taban ile sürekli temas halinde olduğu belirtilmiştir.

Contento ve Di Egidio (2014) taban yalıtımın rijit cisimlerin sallanma performansını iyileştirmede kullanılmasını araştırmıştır. Yapılan çalışmada maksimum yer ivmesine bağlı olarak rijit cisimlerin sallanma tepkisi ifade edilmiştir. Taban yalıtımın bazı durumlarda rijit cisimlerin korunmasında etkili olmayabileceği ifade edilmiştir.

Politopoulos (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada taban izolotörlü yapıların sallanma hareketi incelenmiştir. Aktif ve yarı aktif sismik koruma yöntemlerinin izolotörlü yapıların devrilme performansını artırdığı belirtilmiştir.

Sismik izolotörlü yapılardaki rijit cisimlerin sallanma hareketi izolotörde meydana gelen çekme etkisi dikkate alınarak Zhou ve Yen (2023) tarafından incelenmiştir. Objeler için yapılan analizler sonucunda bazı sınırlandırıcı koşullar bu çalışma kapsamında sunulmuştur.

Temelden ankastreli yapılarda yapı içindeki rijit objelerin deprem etkilerine maruz kalmasında yapıyla ilgili parametreler; yapı ağırlığı, yapı rijitliği, yapı geometrisi, yapı taşıyıcı sisteminin yerleşimi, yapıda düzensizlik bulunma durumu ve dolayısıyla yapının periyodudur.

Sismik izolasyonlu yapılarda yapı içindeki rijit objelerin deprem etkilerinde maruz kalmasında ise yapıyla ilgili parametrelerin yanında izolotör parametreleri de etkili olmaktadır. İzolotör parametreleri ise; izolotör sistemi, sönüm katsayısı, lineer elastik ve lineer olmayan davranışlara ait parametreler, sürtünmeli sarkaç izolotörde sürtünme katsayısı, sürtünme etkisiyle oluşan ısı ile oluşan etkiler (sürtünme katsayısının artması veya azalması), izolotörün düşey rijitliği, izolotörün yatayda deplasman yapabilme sınırı gibi parametrelerdir.

Yapı içindeki rijit cisimlerin deprem sırasında sallanması ve ağırlık merkezinin taban sınırını aştığında devrilme durumu hem cismin maruz kaldığı harekete hem de kendi geometrisine bağlıdır. Harekete bağlı parametreler; cismin maruz kaldığı hız ve ivme, hareketin cisme etkidiği yön, hareketin düzlemsel veya dairesel olması veya ikisinin birlikte etkimesi

durumdur. Cisimlerin geometrisine bağı parametreler ise; yapının geometrisi, yapının taban geometrisi, yapının ağırlığıdır. Cismin maruz kaldığı ivme değeri, cismin herhangi bir noktasından sabitlenmesi veya serbest kalması durumu ve dolayısıyla cismin maruz kaldığı kuvvetin etkiye noktası, salınım hareketinin incelenebilmesi için etkiyen kuvvetin etkiye süresi, yapının periyodu ve cisim periyodu gibi parametreler de davranışın belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde en önemli parametrelerden olan sürtünme katsayısının deprem esnasında sürtünmeden dolayı meydana gelen sıcaklık ve hız gibi etkiler ile değiştiği bilinmektedir (Constantinou vd. 1993, Tsopelas vd. 1994; Kumar vd. 2019). Ancak bu değişim genellikle analizlerde ihmal edilmektedir.

Sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklıktan ötürü meydana gelen sürtünme katsayısındaki değişim Chang vd. (1990) tarafından açıklanmıştır ve bir formül önerilmiştir. Benzer bir yaklaşım ile sürtünme katsayısında oluşan değişim Tsai (1997) tarafından da araştırılmıştır. Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde meydana gelen sürtünme katsayısındaki değişim ise Kumar vd. (2019) tarafından araştırılmış ve formüle edilmiştir. Elde edilen ve önerilen formül ise yapıların deprem analizleri için kullanılan açık kaynak kodlu bilgisayar programı olan OpenSees (McKenna, 1997) içerisine yeni bir eleman olarak eklenmiştir. Bu eleman içerisinde bulunan hesaplamalar ile sürtünme katsayısının dinamik analiz sırasında sürekli güncellenmesi yapılmaktadır. İzolatör üzerinde bulunan basınç, izolatör hızı ve sıcaklığı bağı olarak elde edilen üç parametre ile sürtünme katsayısı sürekli güncellenmektedir.

Bu çalışma kapsamında farklı geometrik özelliklere sahip yapıların çatı katında bulunan farklı en/ boy oranına sahip rijit cisimlerin devrilme olasılıklarına ilişkin kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir ve sıcaklığın bu eğrilere ne oranda etki ettiği araştırılmıştır. 3, 6 ve 9 katlı yapıların 3, 4 ve 5 adet açıklığı sahip olmaları ve tabanda bulunan sürtünmeli sarkaç sisteminde elastik ötesi rijitlik dikkate alınarak hesaplanan periyodun ise 3,50, 4,25 ve 5,00 saniye olduğu varsayılarak farklı yapı sistemleri oluşturulmuştur. Ayrıca izolatörün referans sürtünme değeri ise %4 ve %8 alınmıştır. Üst yapı kütlelerinin ise tüm yapı kütlelerine oranı 0,65 ve 0,80 olduğu varsayılmıştır. Böylece 108 adet sistem oluşturulmuştur. Bu yapılara artan oranda yer hareketi uygulanarak çatı katındaki farklı geometrilere sahip rijit cisimlerin devrilme olasılıkları araştırılmıştır. İzolatörün sarsıntı sırasında sıcaklık değişiminden dolayı sürtünme katsayısında meydana gelen değişim dikkate alınarak ve alınmadan iki ayrı

izolatör sistemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Sürtünme katsayısının hıza bağlı değişimi ise her iki modelde de dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ile kırılma eğrilerinin hem yapı parametrelerine bağlı olarak değişimi hem de sıcaklık etkisine bağlı olarak değişimi araştırılmıştır.

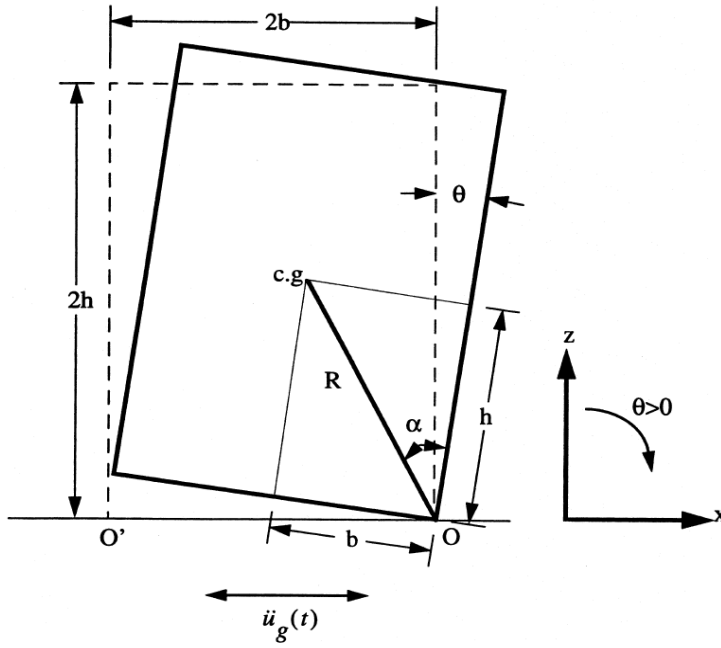


2. RİJİT CİSİMLERİN SALLANMA HAREKETİ

İnşaa edilen yapılar içerisinde bulunan cisimler bazen yapının fonksiyonelliği veya yapıdan elde edilmesi planlanan amaç ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle hastane, data merkezleri, müzeler vb. kritik öneme sahip yapılarda bulunan objeler çok büyük önem arz etmektedir ve bu durumda yapılarda bulunan bu tür rijit cisimlerin korunması önem arz etmektedir. Dolayısı ile yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de bu tür objelerin korunması ve tasarım aşamasında bunların vereceği tepkilerin de ayrıca belirlenmesi veya tahmin edilmesi gerektiğidir. Eğer detaylı bir analiz yapılmıyor ise dahi belli katsayılar ile bu cisimlerin korunmasına yönelik hesaplamalar ile işlem yapılarak bu cisimlerin korunması gerekmektedir. Bir hastane içerisinde bulunan özel bir cihazın sarsıntıdan dolayı hasar görmesi o hastaneden hizmet almayı bekleyen kişilerin gerekli tedaviye ulaşamaması anlamına gelmektedir. Bir data merkezi düşünüldüğünde ise büyük ve önemli dataların toplandığı bu tür merkezdeki cihazların sarsıntıdan dolayı devrilmesi ve hizmet verememesi yıllar boyunca toplanan dataların yok olması anlamına gelebilir. Ayrıca müzelerde binlerce yıllık cisimlerin sergilendiği göz önünde bulundurulur ise insanlık açısından çok kıymetli olabilecek bu tür objelerin devrilmesi sonucunda bu tür önemli objeler kaybedilebilmektedir.

Dolayısı ile bu tür cisimlerde meydana gelebilecek olan sallanma hareketinin deprem ivmesi altında incelenmesi yapıdan elde edilmesi amaçlanan hizmet açısından son derece önemlidir. Bir zemin üzerinde duran rijit cisimler üzerinde bulundukları yüzeyin yer hareketine bağlı olarak sağa ve sola doğru açısal bir hareket meydana getirirler. Bu hareketin meydana gelmesi için belli bir eşik değerinin aşılması gerekmektedir. Bu hareketin derecesi cismin geometrik özelliklerine ve yer hareketinin büyüklüğüne bağlıdır. Ayrıca yer hareketinin frekans değeri de bu hareketin modları açısından önem taşımaktadır. Yerde meydana gelen hareket sonucunda oluşan açısal yer değiştirme kritik bir değerin üzerine çıkar ise bu durumda devrilmenin meydana geldiği söylenebilir. Aşağıda Makris ve Roussos (1998) tarafından verilen ve Şekil 2.1’de gösterilen rijit cismin hareketi dönme açısı cinsinden ölçülmektedir. Şekilde $2h$ değeri yüksekliği $2b$ değeri ise cismin genişliğini temsil etmektedir. Burada cismin rijit olması sarsıntı sırasında oluşan kuvvetlerden ötürü cisim içerisinde meydana gelen relatif şekil değiştirmelerin ihmal edildiği anlamında gelmektedir. Dolayısı ile oluşan kuvvetlerden ötürü şekil değiştirme rijit cisim diyagramının elde

edilmesinde ve bundan sonra oluşturulacak olan dinamik hareket denkleminin çıkarılmasında ihmal edilmiştir. Genellikle yapı içerisinde kullanılan objelerin sarsıntı sırasında kendi içerisinde pek fazla şekil değiştirme yapmayacağı kabulünden hareket ile bu varsayım ile gerekli hesaplamaların yapılmasında sonuca büyük oranda etki edecek bir hata bulunmamaktadır. Bu objenin sayfa düzlemine dik boyutu da ayrıca ihmal edilmiştir ve elde edilecek olan sonuçlar sadece bir doğrultuda meydana gelen yer hareketi ile ilgilidir.



Şekil 2.1. Rijit bir cismin yer hareketi altında sallanması

Rijit bir cismin θ kadar dönmesi sonucunda elde edilen serbest cisim diyagramına bağlı olarak hareket denklemi elde edilebilir. Ancak burada cismin sallanma yönüne bağlı olarak elde edilen hareket denklemi farklılık gösterecektir. Şekil 2.1’de verilen cisim ve hareket yönü dikkate alınır ise Denklem 2.1 ve Denklem 2.2’de verilen hareket denklemi elde edilir. Burada I değeri kütle atalet momenti, m rijit bloğun kütlesi α ise yine Şekil 2.1’de verilen açı olarak ifade edilir. Yer hareketinin ivmesi ise $\ddot{u}_g$ olarak ifade edilmiştir. $I_o = 4mR^2/3$ olarak hesaplanmaktadır. R ifadesi ise Şekil 2.1’de verilen b ve h değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır ve cismin geometrik özellikleri ile ifade edilebilir. Denklem 2.1’de verilen hareket denklemi dönme değerinin negatif olması durumunda geçerli olmaktadır. Ancak θ ifadesi pozitif ise hareket denklemi Denklem 2.2’de verildiği gibi olmaktadır.

$$I_o \ddot{\theta} + mgR \sin(-\alpha - \theta) = m\ddot{u}_g R \cos(-\alpha - \theta) \text{ Eğer } , \theta < 0$$

Denklem 2.1. Rijit cismin negatif dönme hareketi altındaki denklemi

$$I_o \ddot{\theta} + mgR \sin(\alpha - \theta) = m\ddot{u}_g R \cos(\alpha - \theta) \text{ Eğer } , \theta > 0$$

Denklem 2.2. Rijit cismin negatif dönme hareketi altındaki denklemi

Burada verilen hareket denklemleri işaret fonksiyonu kullanılarak tek bir denklemle ifade edilebilir. Gerekli sadeleştirmeler de yapılır ise Denklem 2.3'te verilen hareket denklemi elde edilmektedir. Burada p değeri $\sqrt{\frac{3g}{4R}}$ olarak ifade edilmektedir (Makris ve Roussos, 1998).

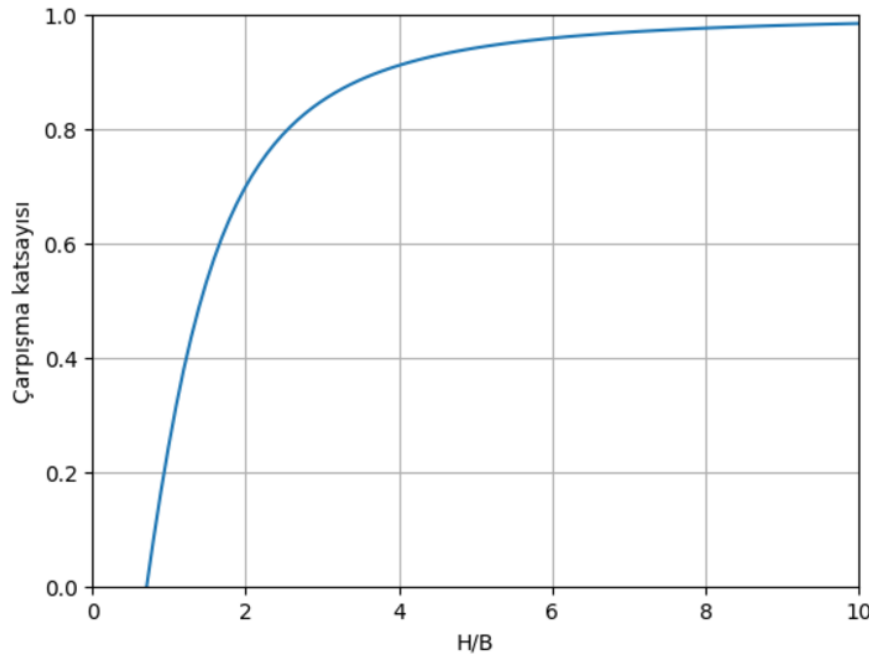
$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin(\alpha \operatorname{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)) + \frac{\ddot{u}_g}{g} \cos(\alpha \operatorname{sgn}(\theta(t)) - \theta(t)) \right\}$$

Denklem 2.3. Rijit cismin negatif dönme hareketi altındaki denklemi

Burada verilen denklemde ise g yer çekimi ivmesini göstermektedir. sgn fonksiyonu ise bir değer işaretine bağlı olarak 1, -1 ve 0 değeri almaktadır. Eğer sgn fonksiyonunun içerisindeki değer pozitif ise 1, negatif ise -1 ve 0 ise buradan elde edilen değer sıfır olmaktadır.

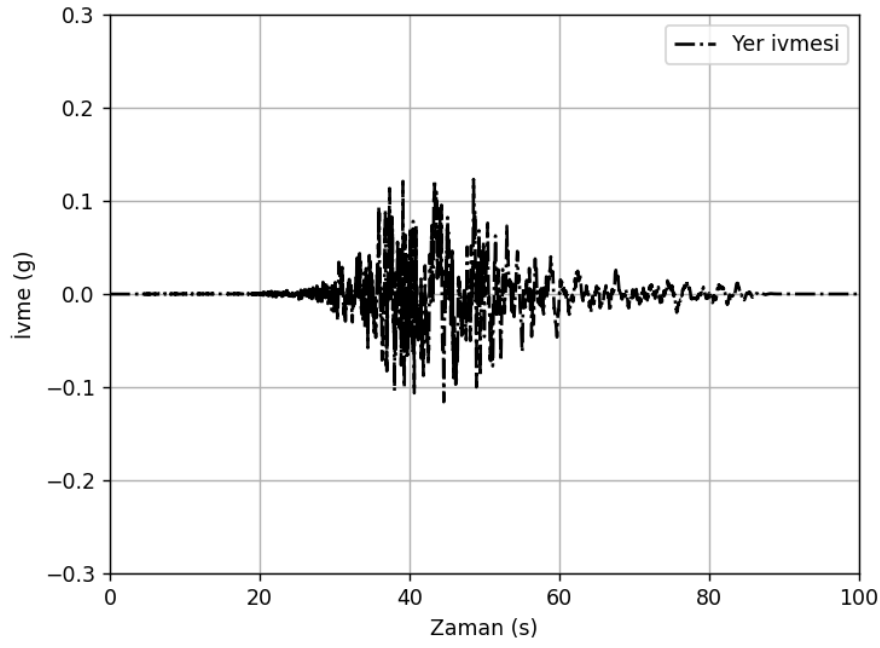
Hareket denkleminin çözümünden ise yer çekimi ivmesine bağlı olarak dönme açısı değeri elde edilmektedir. Eğer herhangi bir anda bu dönme değeri α değerini aşar ise rijit cismin devrildiği varsayılabilir. Burada verilen denklemlerde ve sistemler yer çekiminin düşey etkisi ve rijit cisim ile üzerinde bulunduğu yüzey arasında meydana gelebilecek kaymalar ihmal edilmiştir.

Ayrıca cismin köşelerinin yüzeye çarpması sonucunda oluşacak olan elastik geri tepmelerden dolayı meydana gelecek olan enerji kayıpları ihmal edilmiştir. Bu kayıpların rijit cismin boyutlarına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu enerji kaybına ilişkin katsayı aşağıda Şekil 2.2'te verildiği gibi değişmektedir (Yim vd., 1980). Bu tez kapsamında parametrik çalışmada kullanılacak olan rijit cisimlerin en/boy oranları 1/4, 1/5 ve 1/6 olarak seçildiğinden dolayı burada enerji kaybını düzenleyen katsayı değeri yaklaşık 1 olduğundan ötürü, rijit cismin köşelerinin yüzey ile temas etmesi durumunda meydana gelecek olan enerji kayıpları göz önüne alınmamıştır.



Şekil 2.2. Enerji kaybına ilişkin katsayı boy/en ilişkisi

Devrilme hareketinin incelenmesi amacı ile Denklem 2.3'te verilen hareket denkleminin çözümlenmesi gerekmektedir. Bu denklem nonlineer ikinci dereceden homojen olmayan bir diferansiyel denklemdir. Ayrıca bu denklemde bulunan $\ddot{u}_g$ ise yer hareketinin ivmesinin zamana bağlı olarak değişimini ifade etmektedir. Bu ifade ise analitik olarak bir fonksiyon yardımı ile ifade edilemeyen bir deprem hareketinden dolayı herhangi bir katta meydana gelen ivme ifadesidir. Şekil 2.3'te örnek bir deprem ivmesi kaydı gösterilmektedir. Bu grafikte verilen ivme değerleri kapalı bir fonksiyon ile ifade edilemez. Bu tez kapsamında bir binanın çatısında bulunan rijit objenin sallanma hareketi incelendiğinden ötürü çatı katında meydana gelen toplam ivme değeri $\ddot{u}_g$ olarak alınacaktır. Dolayısı ile bu denklemde verilen yer hareketinin analitik çözümü elde edilemez. Bu nedenle denklemin nümerik olarak çözülmesi gerekmektedir. Nümerik çözümün elde edilmesinde MATLAB programı kullanılmıştır.



Şekil 2.3. Örnek deprem ivmesi kaydı

3. SİSMİK İZOLATÖRLER VE SÜRTÜNMELİ SARKAÇ SİSTEMLERİ

İçerisinde yaşadığımız yapılar depreme maruz kaldıklarında bu durum insan hayatını olumsuz yönde etkilemektedirler. Özellikle hastane, telekomünikasyon merkezleri gibi kullanımının kesilmemesi veya depremden sonra hemen kullanımının olması gereken yapılar çok kritik öneme sahiptirler. Bu durum, yapılardan deprem etkisini uzaklaştırma ya da deprem etkisini azaltmakla mümkün olmaktadır.

Yapılarda deprem etkisinin azaltılmasında çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yöntem yapılarda sismik izolasyon sistemi kullanılmasıdır.

3.1 Sismik izolasyonun tarihçesi

İnsanlık tarihi boyunca meydana gelen depremlere karşı farklı çözüm önerileri aranmıştır. Bunun nedeni ise deprem gibi doğa olaylarının can ve mal kaybına neden olma potansiyellerinin çok fazla olmasıdır. İnsanlar, tarih boyunca içinde yaşadıkları yapıların deprem etkisinden korumanın çeşitli yöntemlerini araştırmışlardır ve bu araştırma günümüzde de hızla devam etmektedir.

Günümüzde kullanılan izolasyon sistemlerinin tarihi çok eskiye dayanmaktadır ve yaygın kullanımı 1980'lerde başlamıştır, ancak 1990'larda ise geniş uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde halen çok yaygın olarak uygulaması pek fazla değildir ve kullanımı genellikle bina önem katsayısı yüksek olan yapılar ile sınırlıdır.

Günümüzde yapılan araştırmalarla ve çalışmalarla hem önceden belirlenen sismik yalıtım teknikleri geliştirilmekte hem de yeni ve alternatif yalıtım teknikleri bulunmaktadır. Hatta sadece yapıya özel olarak tasarlanan ve analiz edilen sistemler de geliştirilebilmektedir.

3.2 Sismik izolasyon çeşitleri

İçinde yaşadığımız yapılar depreme maruz kaldıklarında taban hareketi nedeni ile depremin karakterine bağlı olarak çok fazla yer değiştirmeye maruz kalabilmekte ve bu durum da yapıda hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle yapıların deprem etkisinden uzaklaşması için ya da deprem etkilerinin azaltılması için kullanılan çeşitli sismik izolasyon sistemleri mevcuttur. Bunlar;

1. Aktif sönümleyiciler
2. Pasif sönümleyiciler
 - 2.1. Metal sönümleyiciler
 - 2.2. Sürtünme sönümleyicileri
 - 2.3. Visko-Elastik sönümleyiciler
 - 2.4. Viskoz sönümleyiciler
 - 2.5. Ayarlanmış kütle sönümleyicileri
 - 2.6. Ayarlanmış sıvı sönümleyicileri
 - 2.7. Sismik taban izolatörleri
 - 2.7.1. Elastomerik izolatörler
 - 2.7.1.1. Düşük sönümlü kauçuk izolatörler
 - 2.7.1.2. Kurşun çekirdekli elastomer izolatörler
 - 2.7.1.3. Yüksek sönümlü kauçuk izolatörler
 - 2.7.2. Sürtünmeli kayma sistemleri
 - 2.7.3. Sürtünmeli sarkaç sistemi
 - 2.8. Sismik damperler
3. Karma sistemler

Deprem yalıtımı için kullanılan bütün sistemlerin kendilerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Dünya üzerinde yapılan uygulamalarda en çok tercih edilen sistemler; elastomerik sistemler ve kayma tabanlı sistemlerdir. Kayma sistemlerinden ise en çok tercih edileni sürtünmeli sarkaç sistemleridir. Ayrıca pasif enerji sönümleyici sistemler de yapıların deprem performansının artırılmasında başvurulan elemanlardır. Bunların ise çalışma mekanizması türlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Yapıların sismik izolasyonunda kullanılan yalıtım sistemlerinin özelliklerinden dolayı tercih edilen her sistemin avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. İlk olarak tasarlanan kauçuk tabanlı sistemler zamanla istenilen koşullara cevap verememişlerdir ve bazı durumlarda stabilite problemleri ortaya çıkmıştır. Çelik plakalarla güçlendirilmişlerdir. Daha sonra kurşun çekirdekli sistem önerilmiştir. İlerleyen zamanlarda elastomer kauçuk malzemesi üretilmeye başlamışlardır. Bu sistemler düşey rijitlik, yatay rijitliğe göre oldukça fazladır. Ancak zamanla kauçuk parça kısmı deprem etkisiyle deforme olarak zarar görmektedir. Ayrıca ileri deplasman seviyelerinde meydana gelecek olan izolatör şekil değiştirme talepleri sonrasında stabilite problemleri ortaya çıkabilmektedir. Artan ikinci merteye

etkilerinden ötürü kauçuk izolatörlerde burkulma meydana gelmesi sonucunda izolatörün beklenen performansı vermesi olanaksız hale gelmektedir.

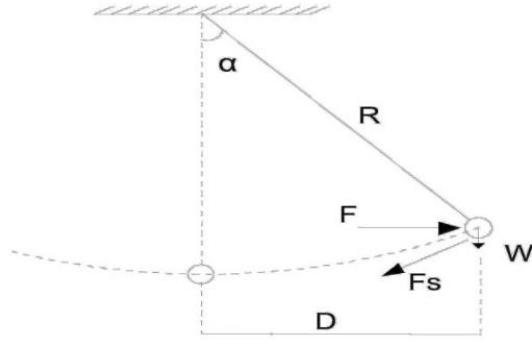
Aşağıdaki tabloda taban yalıtımlı izolatör sistemlerinin avantajları ve dezavantajları listelenmiştir:

Tablo 3.1. Sismik enerji sönümleyicilerin avantaj ve dezavantajları

İzolatör Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Elastomer Esaslı	Yapı içi ivmeler düşüktür Düşük maliyet	Büyük deplasmanlarda stabilite problemleri Üretimin çok fazla detay gerektirmesi Bina tabanına sonradan uygulamanın zor olması
Sürtünme Esaslı	Burulma etkisi azdır Sürtünmeye bağlı olarak yüksek sönüm Düşey yüklere dayanıklıdır Stabilite problemi azdır	Kalıcı deformasyon Artan kat ivmeleri Sürtünme yüzeyinin kirlenebilir olması Bina tabanına sonradan uygulamanın zor olması
Viskoz Sönümleyiciler	Yüksek sönüm Hıza bağlı kuvvet Sonradan kolay uygulanabilirlik	Üreten firma sayısının göreceli olarak az olması Çerçeve içerisinde görüşü etkilemesi

Kauçuk sistemlere alternatif olarak kayma sistemleri tasarlanmıştır ve kullanılmaya başlamıştır. Ancak bu sistemin en büyük eksik yönü yapı yanal deplasman yaptığında sistemi tekrar merkeze getirecek çağırıcı kuvvetin bulunmamasıdır. Bu kayma sistemler kayıcı metal yüzey veya teflon yüzey üzerinde kayan mafsallı parçanın kayması üzerine kurulmuştur. Sistemde geri çağırıcı kuvvetin bulunmamasının çözümü olarak yüzeylerden bir tanesi konkav hale getirilerek yatay yönde kaymayla birlikte düşey hareket kabiliyeti de

kazanmaktadır. Bu etki sonucunda yatayda hareket eden sitem kinetik enerjisinin tamamını potansiyel enerjiye çevirmekte ve arkasından potansiyel enerjinin geri çağırıcı kuvvet oluşturması nedeniyle de tekrar sistem ilk haline dönebilmektedir. Sistemin bu durumdaki hareketi sonucunda izolatör sistemi üzerindeki yapı sarkaç gibi salınım yapmakta ve hareket etmektedir.



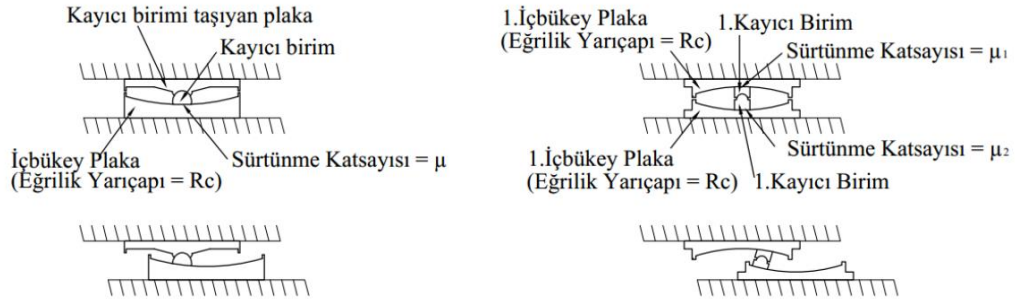
Şekil 3.1. Sürtünmeli sarkaç sistemi çalışma prensibi

Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörün çalışma prensibinde sistemin çalışmasında etkili olan parametreler sürtünmedeki eğrisel yüzeyin yarıçapı, yapı ağırlığı, deplasman miktarı ve sürtünme katsayısına bağlıdır. Yatay deplasman değerine bağlı olarak sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerde meydana gelen kuvvet Denklem 3.1 ile ifade edilmektedir.

$$F = \frac{W}{R} * u + \mu * W sgn(\dot{u})$$

Denklem 3.1 Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kuvvet deplasman ilişkisi

Burada belirtilen R değeri sürtünmeli sarkacın eğrilik yüzeyinin efektif yarıçapı, W ise izolatör üzerindeki kuvvet değerini, u izolatörün deplasmanını, $\dot{u}$ ise izolatörün hız değerini göstermektedir. sgn ise daha önce ifade edilen işaret fonksiyonudur. İzolatörlerin kayıcı yüzeyine bağlı olarak elde edilen denklem farklılık gösterebilmektedir. Denklem 3.1’de bulunan ifade tek sürtünme yüzeyine sahip izolatörün davranışını temsil etmektedir. Aşağıda verilen Şekil 3.2’de farklı tipte bulunan sürtünmeli izolatörler şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 3.3’te ise EPS (2024) tarafından verilen sürtünmeli bir sarkaç sistemi gösterilmektedir.

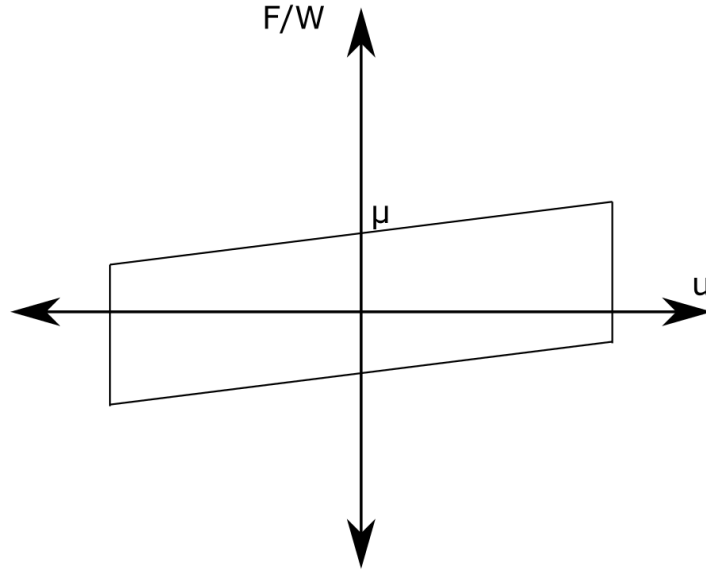


Şekil 3.2. Sürtünmeli sarkaç sistemi öğeleri (TBDY)



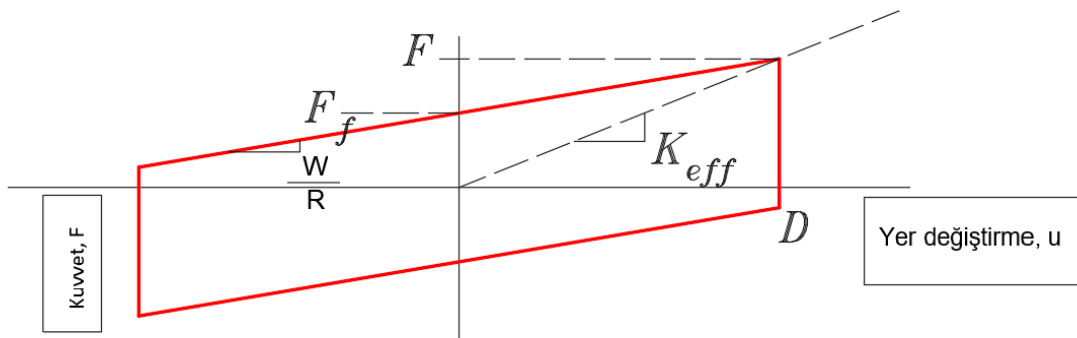
Şekil 3.3. Üç sürtünme yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemi

Sürtünmeli sarkaç sisteminde geri çağırıcı kuvvetlerin oluşması ve kayıcı yüzey üzerinde hareketten dolayı oluşan histeretik kuvvet deplasman grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir. Burada deplasman değerinin yön değiştirdiği anda kuvvet eğrisinde oluşan histeretik davranışa dikkat edilmelidir. İzolatörlü yapılarda bu davranış sönüm ile doğrudan alakalıdır Ayrıca geri çağırıcı kuvvet olan elastik ötesi şekil değiştirme durumunda meydana gelen çizginin eğimi de W/R olarak bulunur. Buradaki R değerinin efektif eğrilik yarıçapı olduğuna dikkat edilmelidir. Çünkü kayıcı parçanın belli bir yüksekliğe sahip olduğu ve dönme esnasında meydana gelen şekil değiştirmeden dolayı oluşacak olan eğrinin yarıçapına etki ettiği göz önüne alınmalıdır. Dolayısı ile efektif yarıçap kayıcı kısmın yüksekliğinin yarısının izolatörün eğrilik yarıçapından çıkarılması ile elde edilecektir. Bu çalışmada ifade edilen eğrilik yarıçapları ve onlara bağlı olarak yapılan hesaplamaların hepsi efektif yarıçap dikkate alınarak yapıldığı varsayılmaktadır.



Şekil 3.4. Sürtünmeli sarkaç sisteminin normalize edilmiş kuvvet deplasman grafiği

Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde maksimum deplasman değerinde meydana gelen kuvvete orijinden çekilen çizginin eğimi efektif rijitlik olarak adlandırılır. Şekil 3.5'te FEMA451, (2006) verilen yer değiştirmeye ve kuvvet deplasman eğrisine bağlı olarak efektif rijitlik değeri gösterilmektedir. Bu tez kapsamında sürtünmeli sarkaç sistemlerinin özellikleri, elastik ötesi yer değiştirme sonrası meydana gelen sabit eğimli kısmın rijitliğine bağlı olarak hesaplanan periyot değerleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.5'te verilen W/R eğimine bağlı olarak bu çalışma kapsamında periyot değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Sürtünmeli sarkaç sistemi temel parametreleri

Bir sistemin salınım periyodu o sistemin rijitliği ve kütlesi ile bağlantılıdır. Denklem 3.1'de verilen eşitlik incelendiğinde elastik ötesi rijitliğin Denklem 3.2 ile ifade edildiği görülür.

Burada verilen ifade, sistem sürtünme kuvvetini yendikten sonra meydana gelen harekete bağlı olarak kuvvet deplasman eğrisinde hesaplanan rijitlik değeridir.

$$k = \frac{W}{R}$$

Denklem 3.2. Elastik tesi rijitlik değeri

Eğer yapının toplam kütlesi de ağırlığın yer çekimine oranı olarak elde edilir ise rijitlik ve kütle ifadelerine bağlı olarak periyot hesabı yapılmış olur. İşlem adımları Denklem 3.3-3.6’da gösterilmiştir.

$$m = \frac{W}{g}$$

Denklem 3.3. Kütle ifadesi

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Denklem 3.4. Periyot formülü

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{WR}{gW}}$$

Denklem 3.5. Periyot değerinin kütleye bağlı ifadesi

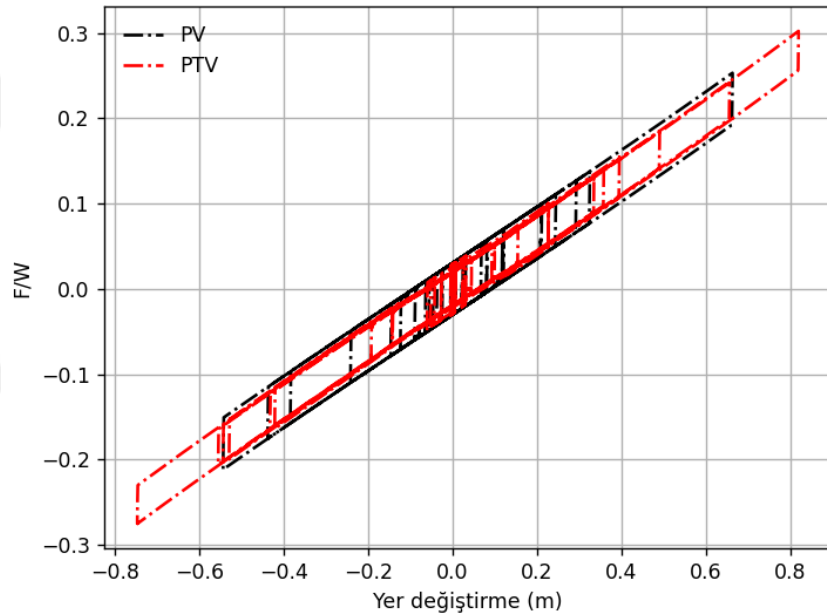
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Denklem 3.6. Periyot değerinin izolatör eğrilik yarıçapına bağlı ifadesi

Denklem 3.6’dan görüldüğü üzere elastik ötesi rijitlik değerine bağlı olarak hesaplanan periyot değeri sadece sürtünmeli sarkaa sistemini efektif eğrilik yarı çapına bağlıdır. Bu tez çalışması kapsamında Denklem 3.6’dan elde edilen periyot değerleri 3,50, 4,25 ve 5,00 saniye olacak şekilde R değeri ayarlanmıştır. Bu değerler literatürde verilen çalışmalar baz alınarak seçilmiştir. Bu değerlerin çok yüksek olması izolatörde geri aağırma kuvvetinin çok düşük olmasına neden olur. Bu ise yapıda meydana gelen kalıcı izolatör deplasmanlarının meydana gelmesine yol aaar.

şekil değiştirme fonksiyonunda yer alan μ değeri izolatör yüzeyleri arasında meydana gelen göreli yer değiştirmeye bağlı olarak oluşacak olan sürtünme kuvveti ile ilgilidir. Bu

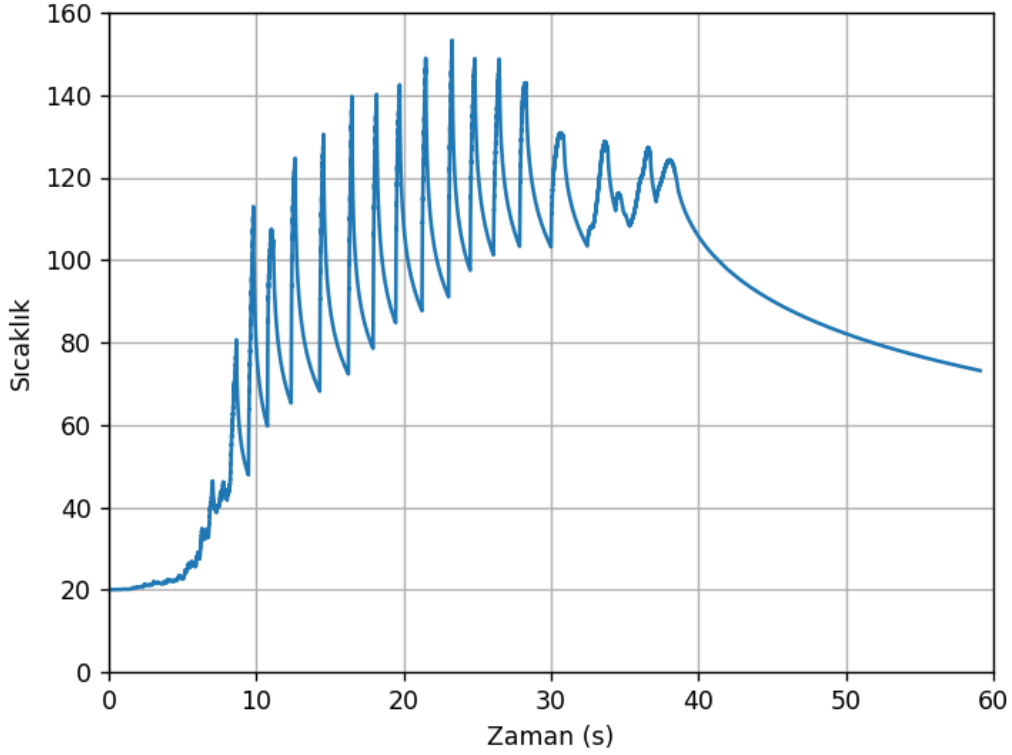
katsayının ise sıcaklık etkisi ile değiştiği ortaya konmuştur. Bu nedenle sürtünmeli izolatorlı sistemlerde yapılacak olan analizlerde bu katsayı değişiminin de dikkate alınması gerekmektedir. Aşağıda verilen Şekil 3.6’da sürtünmeli sarkaç sisteminin bir deprem ivmesi altında meydana gelen yük yer değiştirime grafiği görülmektedir. Burada PV isimli modelde sadece basınç ve hız değişiminin sürtünme katsayısında meydana getirdiği değişim dikkate alınmıştır. PTV isimli modelde ise bu etkilere ek olarak sıcaklık etkisinin de sürtünme katsayısını nasıl değiştirdiği dikkate alınmıştır. Buradan görüldüğü üzere sıcaklık etkisinin hem maksimum taban deplasmanı hem de meydana gelen izolator katı kesme kuvveti değerinde değişiklik meydana getirdiği görülmektedir.



Şekil 3.6. Deprem ivmesi altında sıcaklık etkisi ile ve sıcaklık etkisi olmadan elde edilen kuvvet deplasman eğrisi

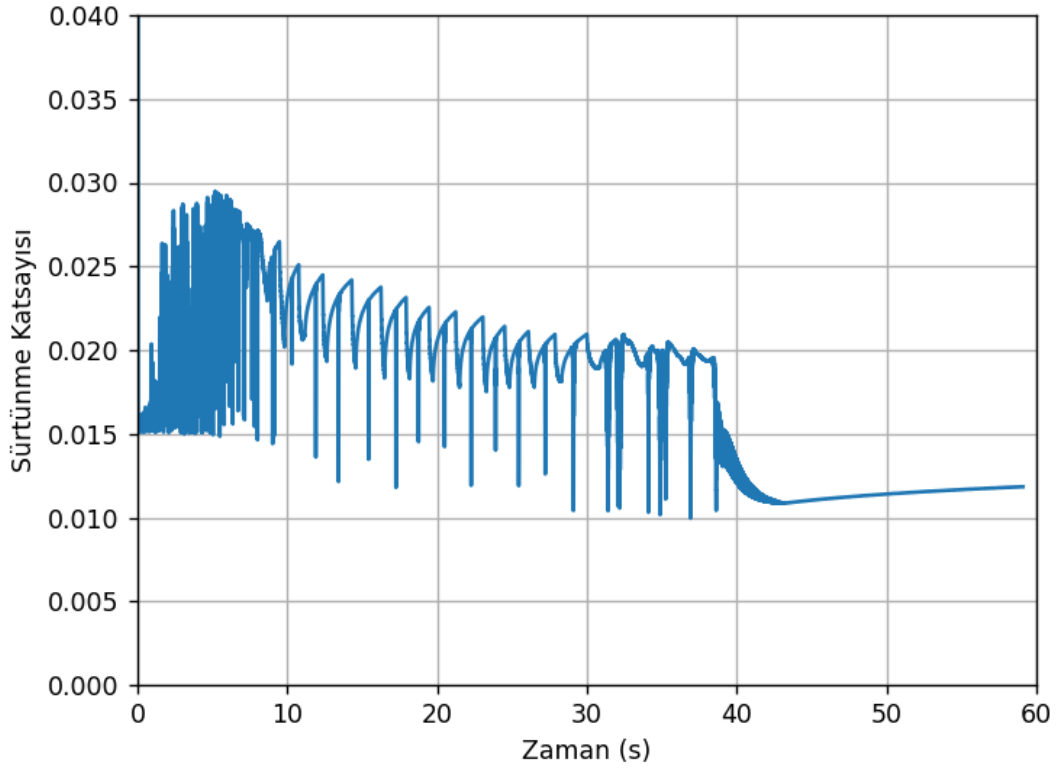
Yapısal olmayan elemanların kat ötelemelerinden ziyade kat seviyelerinde meydana gelen ivmeler etkili olmaktadır. Kat seviyelerindeki ivmeler ise sismik izolatorlı yapılarda sürtünme katsayısı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısı ile yapısal olmayan elemanların davranışının araştırılmasında sıcaklıktan dolayı meydana gelen sürtünme katsayısındaki değişimi de dikkate alarak değerlendirmek gerekir. Bu katsayının değişimi rijit cisimlerin devrilme olasılıkları üzerinde etkisi olabileceği çıkarımı yapılır. Bu ise tezin ana konusunu oluşturmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 3.7’de bir deprem esnasında izolator üzerinde meydana gelen sıcaklık değerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Sıcaklık değeri santigrat derece cinsinden verilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere izolator üzerindeki

sıcaklık değeri 150 santigrat derece değerlerine kadar ulaşabilmektedir. Bu da izolatörden elde edilecek olan tepkinin değişimine neden olacaktır. Ayrıca Şekil 3.8’de verilen sürtünme katsayısı değişimi de göstermektedir ki sarsıntı boyunca sürtünme değerleri sürekli değişmektedir. Burada verilen analizler OpenSees programında FPBearingPTV eleman modeli ile yapılmıştır.



Şekil 3.7. Deprem esnasında oluşan izolatör üzerindeki sıcaklık değeri

Bu eleman modelinde sürtünme katsayısının değişimi hız, basınç ve sıcaklık değerine göre değişimi dikkate alınabilmektedir. Bu çalışma kapsamında ve burada verilen eğrilerde izolatörler üzerinde herhangi bir yük değişimi olmadığından ve düşey yer değiştirme sınırlı olduğundan ötürü basınç etkisi dikkate alınmamıştır. Hız ve sıcaklık değişimi hem aynı anda hem de ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. OpenSees elemanının gösterimine bağlı olarak sıcaklık modeli PTV, sıcaklığın dikkate alınmadığı model ise PV modeli olarak adlandırılmıştır. Bu notasyon bundan sonra verilecek olan şekillerde ve tablolarda bu şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3.8. Sürtünme katsayısının sarsıntı boyunca değişimi

Hızın dikkate alınmasında Mokha vd. Tarafından önerilen formülasyon kullanılmaktadır (Mokha vd. 1988) ve literatürde verilen diğer çalışmalar ile izolatör hızına bağlı olarak bir geçiş parametresi tanımlanarak hızın sürtünme katsayısına olan etkisi dikkate alınmaktadır. Kumar vd. (Kumar vd. 2019) tarafından geliştirilen OpenSees elemanı olan FPBearingPTV modeli bir referans sürtünme değerine bağlı olarak sürtünme katsayısının sarsıntı sırasında değişimini dikkate almaktadır. Bu model ayrıca basınç ve sıcaklık etkisinin de dikkate alınarak analizler sırasında sürtünme değerlerinin güncellenmesini gerçekleştirmektedir.

4. İZOLATÖRLÜ BİNA MODELLERİ

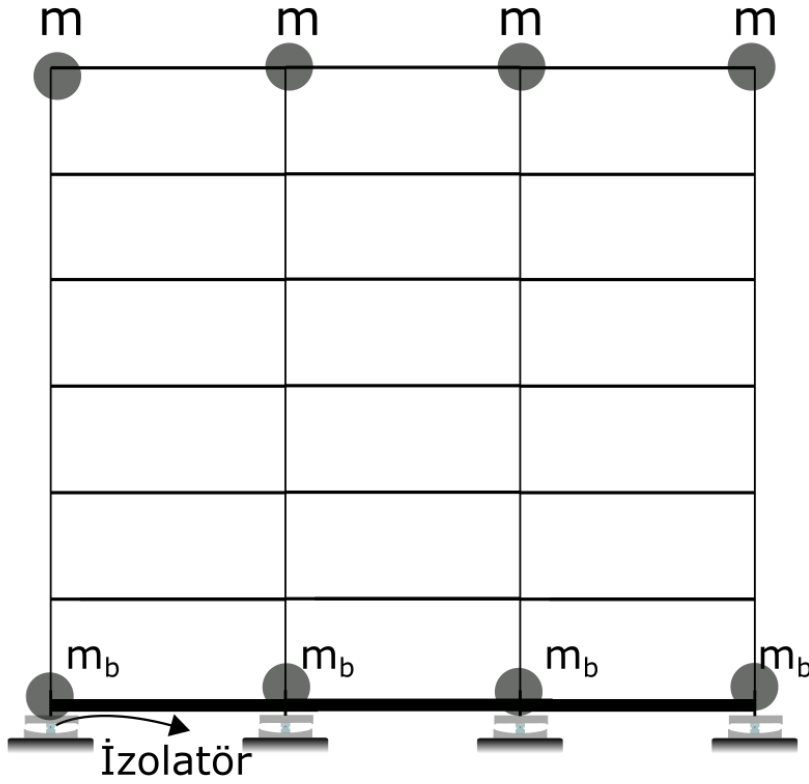
Yapılan bu tez çalışmasında 3, 6 ve 9 katlı yapılar kullanılmıştır. Bu yapıların ayrıca açıklık sayıları 4, 5 ve 6 olarak belirlenmiştir. Yapıların tabana sabit olması durumunda elde edilecek olan periyot değeri yapıların kat adedi değerinin 0,125 ile çarpımı sonucunda elde edilmiştir. Dolayısı ile 3, 6 ve 9 katlı yapıların periyodu sırası ile 0,375 0,75 ve 1,125 saniye olarak belirlenmiştir. Yapıların düğüm noktasında bulunan kütle değerleri ise her yapının açıklık ve kat değerlerine bağlı olarak hesaplanmış ve öz değer analizleri de yapılarak burada verilen periyot değerlerinin sağlandığı ayrıca kontrol edilmiştir. Yapıların elemanları elastik olarak modellemiştir. Dolayısı ile herhangi bir elemanda lineer olmayan deformasyonlar bulunmamaktadır. OpenSees programında bulunan elasticBeamColumn elemanı kullanılarak kiriş ve kolonlar tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında yapısal olmayan elemanların davranışı araştırıldığından ötürü yapıda elastik ötesi bir davranış ve herhangi bir hasar meydana gelmeyeceği varsayılmıştır. Bu yaklaşım sismik izolatörlü yapılarda kullanılan tasarım yaklaşımı ile de uyumludur. Bu nedenle yapısal elemanlarda herhangi bir lineer olmayan malzeme veya eleman modeli kullanılmamıştır. Yapıda kullanılan izolatörler ise FPBearingPTV elemanı kullanılarak modellenmiştir. İzolatörlerin ise iki farklı sürtünme değerine sahip olduğu varsayılmıştır. Bu değerler %4 ve %8 olarak belirlenmiştir. Bu değerler literatürde bulunan çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir. İzolatörlü yapılarda tüm yapı kütlelerinin üst yapı kütlelerine oranı ise ayrı bir parametre olarak belirlenmiştir. W_s/W değerleri ise 0,65 ve 0,85 olarak belirlenmiştir. Böylece bu kütle oranının rijit cisimlerin devrilme kırılabilirliğini ne derece de etkileyeceği araştırılacaktır. Aşağıda verilen Tablo 4.1’de kullanılan parametreler belirtilmiştir. Buradan hareket ile toplamda 108 adet yapı sisteminin kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 4.1. Kullanılan yapı sistemlerine ait bilgiler

Kat Adedi	Açıklık Sayısı	İzolatör Periyodu (saniye)	Kütle Oranı	Sürtünme Katsayısı
3,6,9	3,4,5	3,50-4,25-5,00	0,65-0,85	0,04-0,08

Yapılarda her bir katta bulunan düğüm noktalarının yatayda meydana gelen yer değiştirme değerlerinin birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Dolayısı ile yapı sistemleri rijit diyafram olarak hareket etmektedir. Analizler sırasında ise öncelikle izolatörler üzerinde yüklerin

oluşması için düşeyde bulunan kütlelerden dolayı meydana gelen yüklerin izolatör üzerine aktarılması için düşeyde statik lineer analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise yatay deprem hareketi olan deprem ivmeleri uygulanmıştır. Bunun nedeni ise izolatörlerin üzerinde yatay tepkilerin düşeyde meydana gelen kuvvet ile doğrudan ilişkili olmasıdır. Aşağıda verilen Şekil 4.1’de bulunan yapı sisteminde taban seviyesinde bir kütle diğer her katta ise eşit kütleler bulunmaktadır. Burada ise şekilde sadelik olması açısından sadece tavan katında bulunan ve tabanda yer alan kütleler gösterilmiştir. Yapının tüm kütlesi olan W , her katta bulunan kütleler ve tabandaki kütlelerin toplamından ağırlığın hesaplaması ile elde edilmektedir. W_s ise sadece üst yapıda yani taban seviyesinde bulunan kütleler olmadan hesap edilen ağırlık değeridir. Bu iki değer birbirine oranının izolatörlü yapıların davranışına etkide bulunduğu bilindiğinden ötürü bu ayrıca bir parametre olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sistem dahilinde bulunan her bir kolonun altına bir adet tek yüzeyli sürtünmeli sarkaç sistemi yerleştirilmiştir. Taban seviyesinde ise rijitliği diğer kolon ve kirişlere göre daha fazla olan yatay elemanlar kullanılmıştır. Dolayısı ile en alt kat seviyesindeki yatay elemanlar rijit olarak tanımlanmıştır ve bu elemanlarda bir eğilme söz konusu değildir. Kirişler ve kolonlar ise sabit ölçülerde 300x300 ve 600x600 mm boyutlarında belirlenmiştir. Yapının periyoduna bağlı olarak kütle değerleri ayarlandığından ötürü bu ölçüler her bir yapı modeli için sabittir.



Şekil 4.1. İzolatörlü 6 katlı 3 açıklıklı yapı modeli

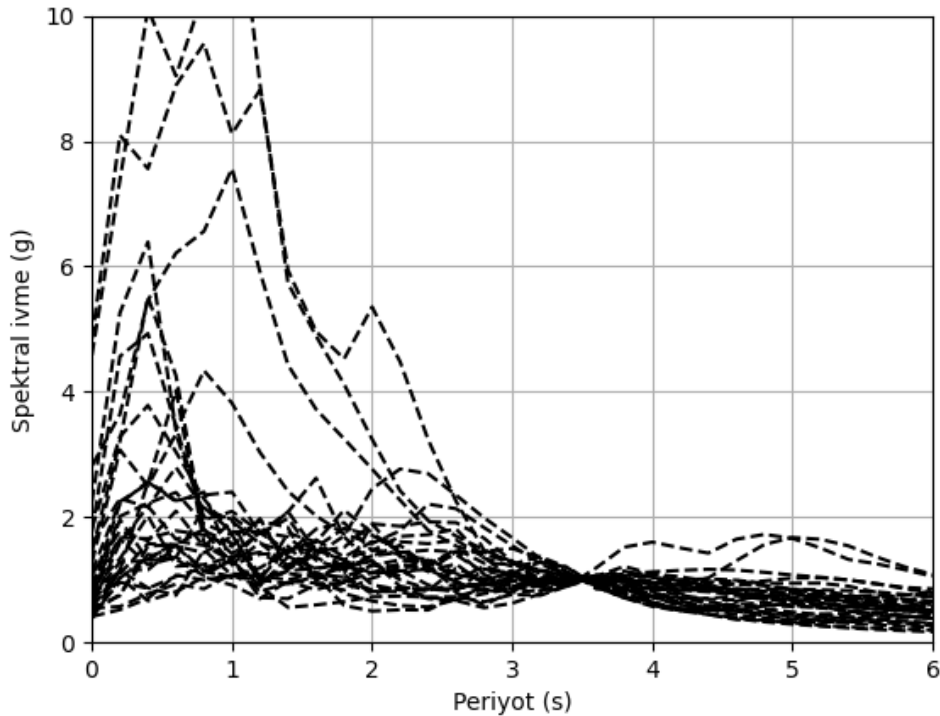
Binaların ilk kat dışındaki diğer katlarının yükseklikleri sabittir ve her biri üç metre olarak alınmıştır. Genellikle ilk kat yüksekliklerinin daha fazla olduğu göz önünde bulundurularak zemin seviyesindeki kat diğer katlarında yüksekliğinin 1,167 katı olarak tanımlanmıştır. Binaların tabanının ankastre olması durumunda oluşacak olan periyot değerleri ise kat adedine bağlı olarak bir oran ile belirlenmiştir. Bu oran ise 0,125 olarak seçilmiştir. Yani kat adedinin 0,125 ile çarpımı saniye cinsinden o yapının periyot değerini vermektedir. Binada bulunan kütleler bu değerleri sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bunun için ise bir Python programı hazırlanmış ve bina geometrisi ve periyot değeri bu programa girilerek bina düğüm noktalarında olması gereken kütle değerleri tahmin edilmiştir. Tabanda bulunan kütlelerin ankastre temelli binanın periyodunu etkilemeyeceğinden ötürü taban kütleleri hedeflenen W_s/W oranına bağlı olarak belirlenmiştir. Binaların her birinin açıklık değeri ise 3,5 m olarak sabit tutulmuştur.

5. DEPREM İVME KAYITLARI

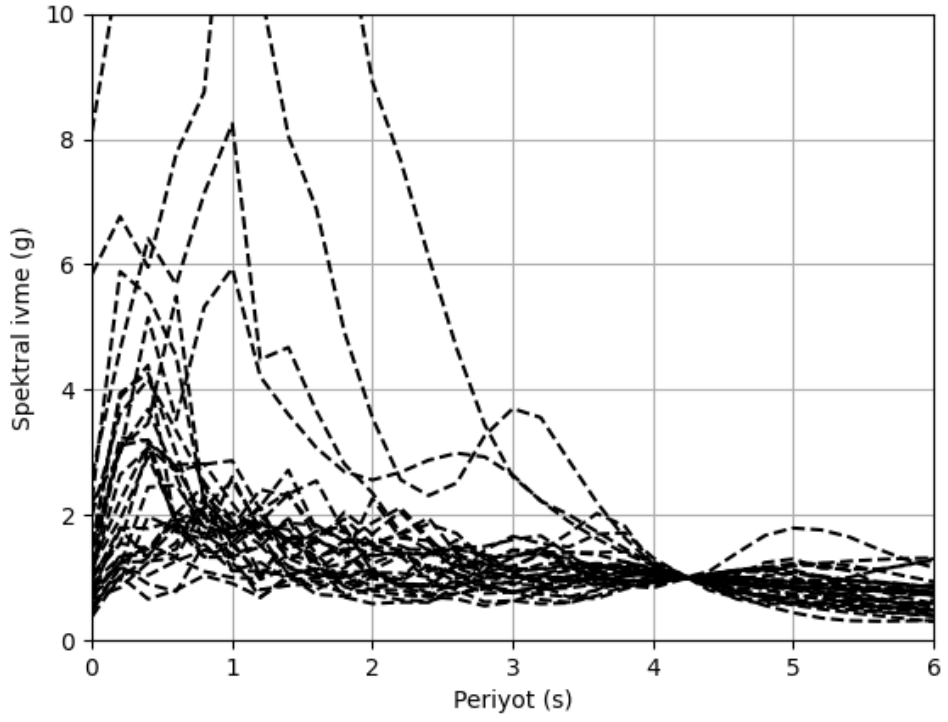
Deprem ivme kayıtlarının seçilmesinde deprem parametrelerinin yer hareketi ile ilişkilendirilmesi sonucunda bir seçim yapılmıştır. Sadece yapının modal parametrelerine bağlı olarak değil bir yapının kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği bir deprem olayına bağlı olarak kayıtlar seçilmiştir. Bu bağlamda koşullandırılmış ivme kayıtları yardımı ile seçim yapılmıştır (Baker, 2008; Baker, 2024; Baker ve Jayaram, 2008; Baker vd. 2011; Jayaram ve Baker, 2010; Jayaram vd., 2011). Bu yöntemde herhangi bir noktada meydana gelebilecek olan deprem olasılıksal deprem tehlike analizi sonuçlarına bağlı olarak elde edilmektedir (Cornell 1968; Baker 2008; McGuire 2008). Bu yöntem sadece bir depremin etkisini değil, yapının bulunacağı konuma bağlı olarak çevrede bulunan farklı fayların, zeminin ve geçmişte o bölgede yaşanan depremin etkileri dikkate alınarak binanın yapılacağı lokasyonda yapı özelliklerine göre ne derecede etkili olacağının bir göstergesi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemde girdi değerleri herhangi bir tekerrür periyoduna sahip deprem için beklenen ortalama moment magnitüd büyüklüğü, depremin meydana gelme olasılığına bağlı olarak hesaplanan bir mesafe değeri ve bir de standart sapmadan oluşan değerdir. Buradaki standart sapma ifadesi beklenen depremin herhangi bir yapı periyoduna karşılık gelen spektral ivme değerinin o bölge için geliştirilen yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen spektral ivme değerinden yine aynı yöntemde sunulan standart sapma cinsinden ifadesidir. Bu tez kapsamında 3 farklı izolatör periyoduna bağlı olarak 3 farklı set halinde deprem ivme kaydı seçimi yapılmıştır. Koşullandırma periyodu olarak ise 3,50, 4,25 ve 5,00 saniye değerleri kullanılmıştır. Bu değerler izolatörlerin elastik ötesi şekil değiştirme durumlarında elde edilen kuvvet deplasman eğrisinin eğiminden yararlanılarak bulunan periyot değerleridir. Moment büyüklüğü için ise genellikle izolatörlü yapıların tasarımında 2475 yıl olan tekerrür periyodu dikkate alındığından ötürü bu tekrar periyodu bu tez kapsamında kullanılmıştır. Dolayısı ile depremin moment büyüklüğü, mesafe ve epsilon değerlerini bu tekrar periyoduna bağlı olarak seçmek gerekmektedir. Bu bağlamda belli bir lokasyon için değerler seçilmemiştir. Ancak hem ülkemizde İstanbul ilinde hem de Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan California eyaletinde yapılan olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçlarına göre seçim yapılmıştır. USGS (2024) tarafından verilen sismik tehlike haritasından ve Odabaşı (2016) tarafından farklı periyotlarda bulunan yapılara ait olasılıksal sismik tehlike analizleri sonuçları dikkate alınarak moment magnitüd değeri 7,5, mesafe değeri 15 km ve epsilon değeri ise 1,48 civarında seçilmiştir. Yer hareketleri kayıtlarının

seçimi için ise Jack Baker tarafından hazırlanan bilgisayar kodları kullanılmıştır. MATLAB programı yardımı ile seçilen kayıtlar, belirlenen ölçek katsayıları ile çarpılmıştır (Baker, 2024) ve deprem ivme kayıtları PEER (<https://ngawest2.berkeley.edu/>) veri tabanından elde edilmiştir (PEER, 2024). Her iki doğrultuda bulunan kayıtlar için aynı ölçek değerleri kullanılmıştır. Her bir periyot için toplamda 30 adet yer hareketi seçilmiştir. Dolayısı ile 3 farklı izolatör periyodu için 30 adet üç ayrı deprem ivmesi hazırlanmıştır.

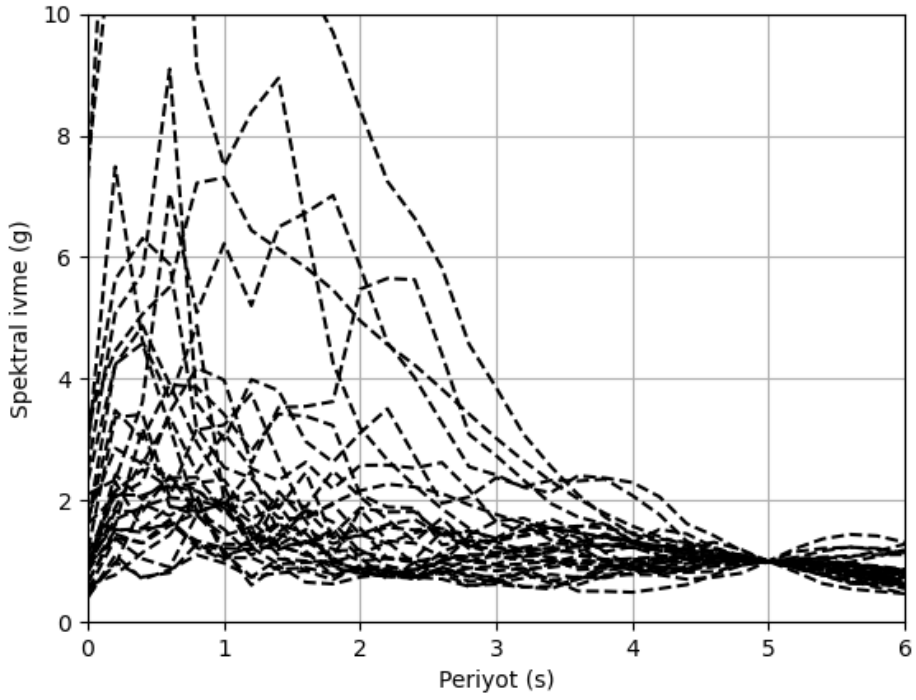
Deprem kayıtları ile kırılganlık analizleri yapılmadan önce deprem ivme kayıtları bazı işlemlere tabii tutulmuştur. Bunlardan ilki her bir deprem ivme setinden elde edilen spektrum ivme değerleri koşullandırma periyotları için $1g$ değerine eşitlenmiştir. Bu ölçeklendirme işlemi FEMA P695'e göre yapılmıştır (FEMA, 2009). Burada elde edilen $1g$ değeri belli katsayılar ile çarpılarak artırılıp kırılganlık eğrileri elde edilecektir. Bu işlemde önce deprem ivmelerinin ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Aşağıda verilen Şekil 5.1-5.3'te her bir periyot değerine bağlı olarak ölçeklendirilen ivmeler sonucunda elde edilen spektrum eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.1. Periyot değeri 4,25 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları



Şekil 5.2. Periyot değeri 4,25 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları



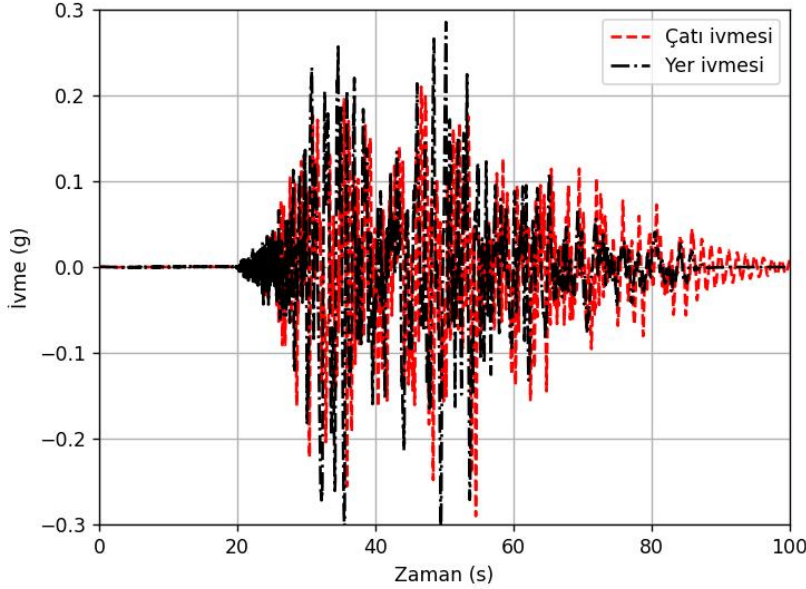
Şekil 5.3. Periyot değeri 5,00 s olan izolatörlü yapı için ölçeklendirilmiş ivme spektrumları

6. ANALİZ SONUÇLARI

Her iki doğrultuda elde edilen deprem kayıtları ayrı ayrı olarak bir doğrultuda yapılara etki ettirilmiştir. Bu etki etki ettirilme sırasında spektrumda ivme değerleri 1g'ye eşitlenen kayıtlar ilk önce küçük bir değer ile çarpılmış daha sonra ise bu çarpım değeri artırılmıştır. Bu çalışmada ilk değer olarak 0,15 kullanılmıştır. Bu değer daha sonra bir önceki değerden 0,05 birim artırılarak çarpım işlemine devam edilmiştir. Burada amaç binaya etki eden deprem ivmesini küçük aralıklar ile artırılması ve bu artım sırasında binada bulunan rijit cismin hangi değerde devrilmeye maruz kaldığını bulmaktır. Bunun için her analiz sonrasında bina çatısında meydana gelen toplam ivme değerleri elde edilmiştir ve sallanma hareketinin incelenmesi için ayrıca bir analiz yapılmıştır. Binaların deprem ivmesi altındaki analizleri için OpenSeesPy kullanılmıştır (Zhu vd., 2018). Bu program OpenSees programının Python tabanlı versiyonudur ve Python'da bulunan kütüphaneler ve diğer programlama dilindeki sağladığı kolaylıklar sayesinde daha geniş kapsamda analiz yapmaya imkan tanımaktadır.

Elde edilen çatı ivmelerinden sonra ayrıca devrilme analizleri için çözüm yapılmıştır. Bu ise Denklem 2.3'te verilen ikinci dereceden nonlinear diferansiyel denklemin elde edilen çatı ivme değerleri ile çözümü sonucunda gerçekleştirilmiştir. Çözüm için ise MATLAB programı kullanmıştır. Runge-Kutta yöntemi ile zaman tanım alanında çözüm yapılmıştır. Rijit cisimde meydana gelen dönme açısı değerleri izlenmiştir. Eğer oluşan dönme değeri kritik eşik değerinden yüksek ise devrilme oluştuğu belirlenmiştir. Kritik açı değerinin ise cisimlerin ağırlık merkezinin zemindeki iz düşümünün, cisim tabanı dışına çıkması sonucunda oluşan açı değeri olduğu varsayılmıştır. Bu durumun gerçekleşmesinde ise belirlenen ivme kaydının artırımı sonlandırılmış ve daha sonra bir sonraki ivme kaydına geçilmiştir. Böylelikle her bir sistem için hangi spektral ivme değerinde bina çatısında bulunan lokasyonlardaki farklı rijit cisimlerin devrilme olasılıkları için spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Rijit cisimler için ise üç farklı geometri belirlenmiştir. Bu objelerin en/boy oranları 1/4, 1/5, ve 1/6 olarak belirlenmiştir. Denklem 2.3'te verilen diğer parametreler ise bu geometriye bağlı olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile analizler çatı katında bulunan üç farklı geometriye sahip cisimler için yapılmıştır. Sürtünmeli sarkaç sistemli yapılarda ivmeler kat seviyesinde yer seviyesinden daha fazla olabilmektedir. Bu nedenle

çatıda oluşacak olan ivmeden dolayı burada bulunan rijit cisimlerin devrilme açısından daha kırılgan olma olasılığı vardır.



Şekil 6.1. Sürtünmeli sarkaç sistemli bir yapının yer ve çatı katında meydana gelen toplam ivme grafikleri

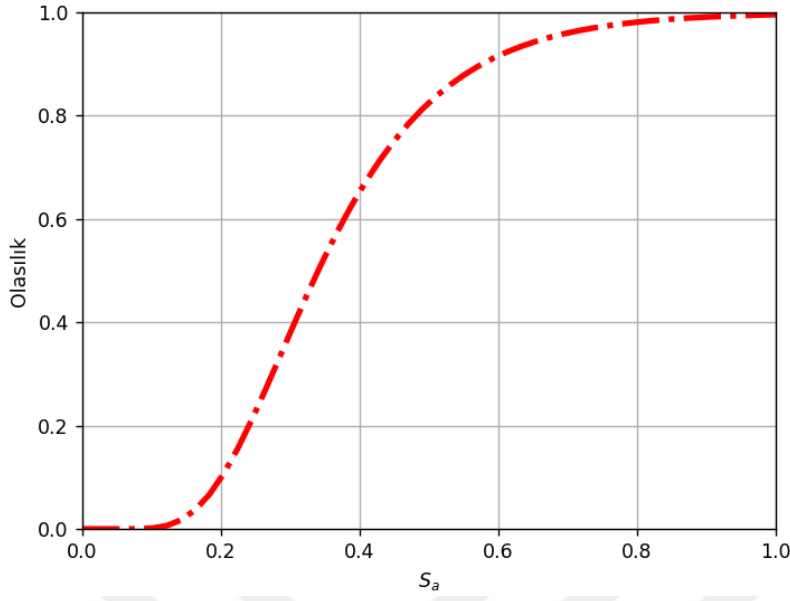
Devrilme kırılgenlik eğrilerinin spektral ivmeye bağlı ilişkisi aşağıda verilen integral yardımı ile elde edilebilir (Kitayama ve Constantinou, 2018). Bu formülde β değeri elde edilen örnek serinin logaritmik değerlerin standart sapması S_a değeri ise elde edilen örnek serinin logaritmik değerlerinin ortalamasıdır.

$$P = \int_0^1 \frac{1}{s\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln s - S_a)^2}{2\beta^2}\right) ds$$

Denklem 6.1. Kümülatif yoğunluk fonksiyonu için gerekli integral

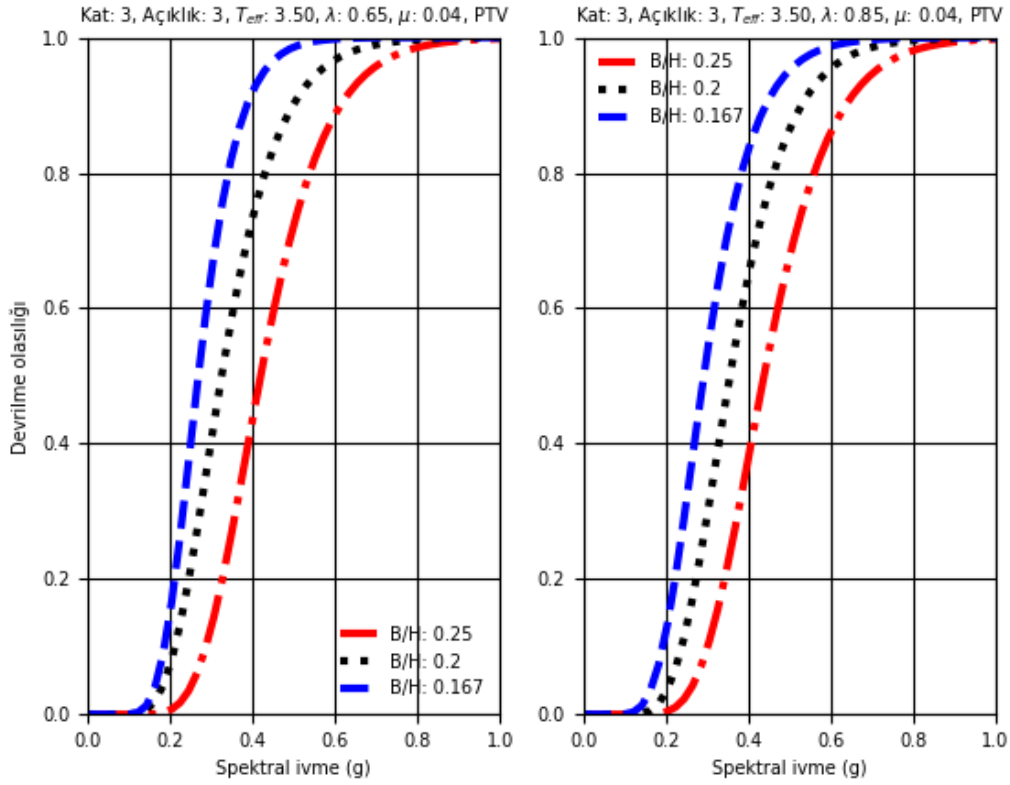
Elde edilen verilerden oluşan seriler Python programında SciPy kütüphanesi yardımı ile analiz edilerek olasılık değerleri hesaplanmıştır. Lognormal dağılım kullanılmış ve ilk olarak örnek seride verilen değerlere bağlı olarak kümülatif dağılım fonksiyonu için gerekli olan şekil ve ölçek faktörleri hesaplanmıştır. Yine aynı kütüphane yardımı ile kümülatif dağılım fonksiyonu hesaplanmıştır.

Aşağıda verilen Şekil 6.2’de örnek olarak gösterilen bir kümülatif dağılım fonksiyonu görülmektedir. Bu fonksiyon elde edilen örnek uzaya bağlı olarak Denklem 6.1’de verilen integral yardımı ile hesaplanmıştır.



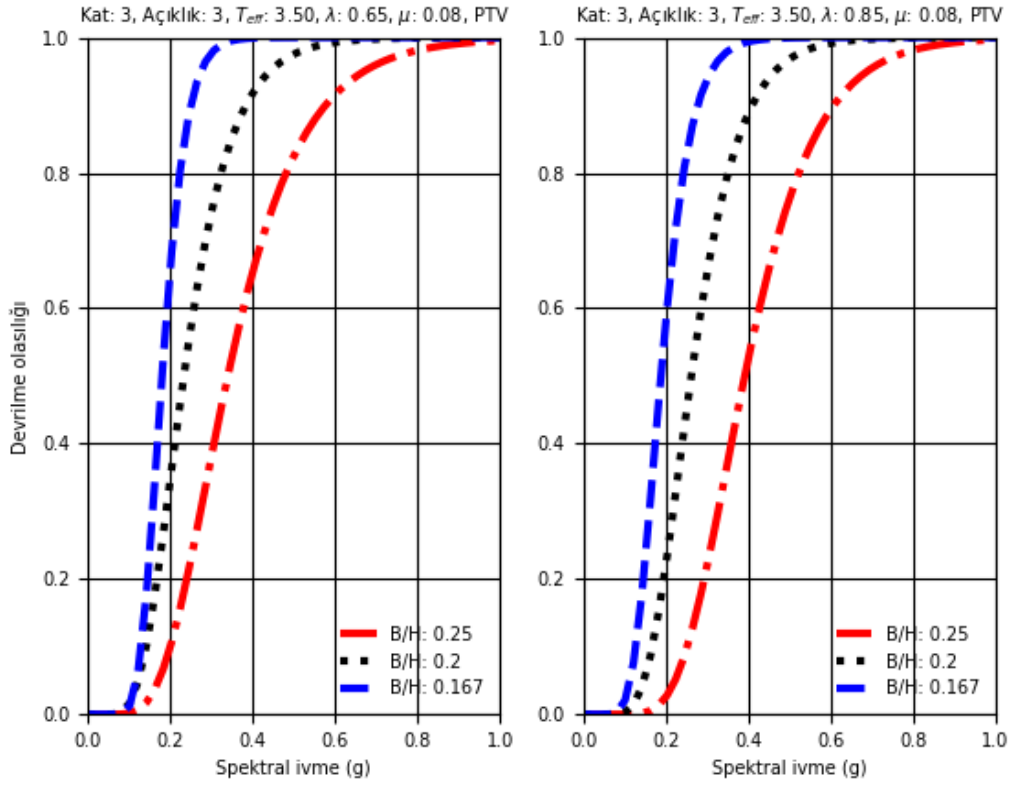
Şekil 6.2. Örnek kümülatif dağılım fonksiyonu

Aşağıda verilen Şekil 6.3-6.6'da 3 katlı üç açıklıklı çerçeve sisteme ait olan devrilme kırılmanlığı eğrileri verilmiştir. Bu şekillerde yatay eksenle verilen değer sistemin T_{eff} değerinde meydana gelen spektral ivme değeridir. Yani bu tez kapsamında 3,50, 4,25 ve 5,00 saniye olarak seçilen değerlerdir. λ değeri ise üst yapı ağırlığının toplam yapı ağırlığı ile normalize edilmiş değeridir.



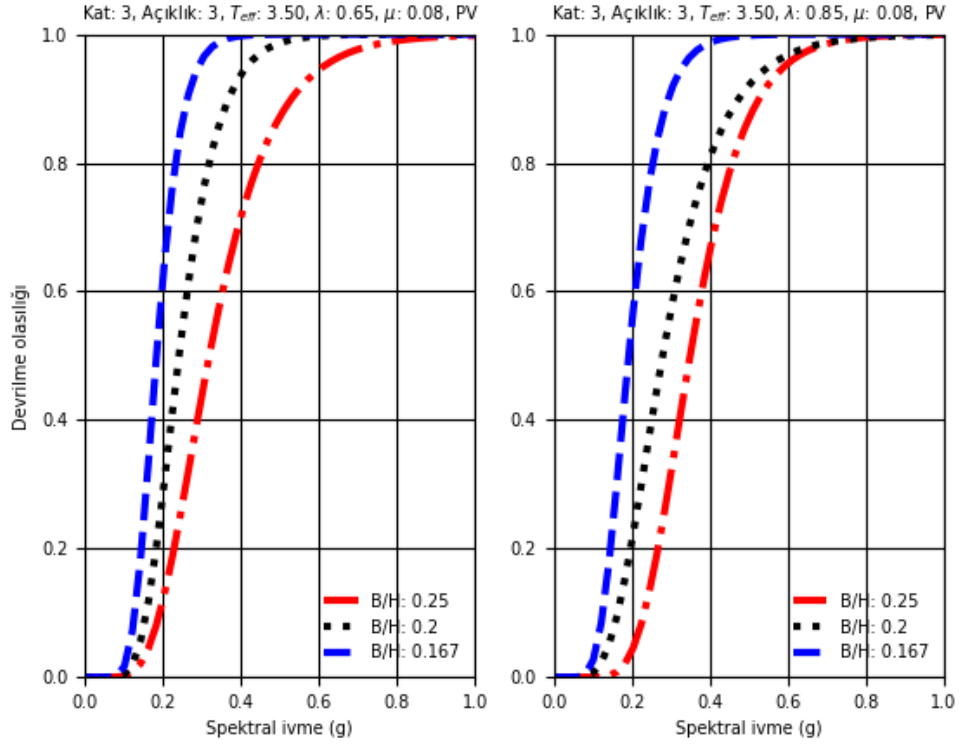
Şekil 6.3. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılma eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PTV model)

Yani λ değeri W_s/W olarak alınmaktadır. B/H değerleri ise analiz edilen rijit cismin en/boy oranı değerini ifade etmektedir. Düşey ekseninde verilen değer ise her bir cismin devrilme olasılığını ifade etmektedir ve bu değer yatay ekseninde verilen spektral ivmeye bağlı olarak bulunur. Örneğin üç katlı 3 açıklıklı bir çerçeve sistemde efektif periyot olarak 3,50 saniye seçilir, kütle oranları ve sürtünme katsayısı da 0,65 ile 0,08 olarak alınır ise en/boy oranı 0,25 olan rijit bir cismin 3,5 saniye değere karşılık gelen spektral ivme değerinin 0,4 olması durumunda çatı katında devrilme olasılığı %62 civarında elde edilmektedir.

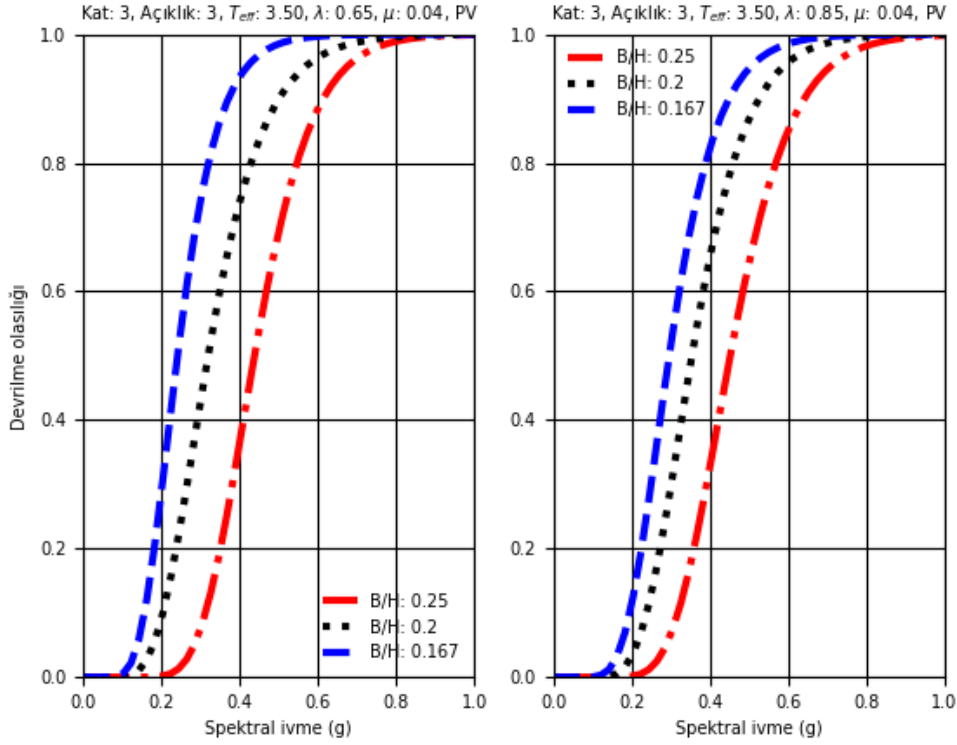


Şekil 6.4. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılma eğrileri (Sürtünme değeri % 8 PTV model)

Örneğin aynı sistem için sadece kütle oranının değiştirilmesi ve 0,85 olarak belirlenmesi durumunda ise bu devrilme olasılığı azalmaktadır. Sağda bulunan eğriler göz önüne alındığında bu devrilme olasılığının %58 civarında olduğu söylenebilir. Burada bahsedilen değerlerde sürtünmeden dolayı meydana gelen sıcaklık etkisi dikkate alınmıştır. Yani kullanılan model PTV modelidir.



Şekil 6.5. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılgenlik eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PV model)



Şekil 6.6. 3 katlı 3 açıklıklı bir yapı sistemi için devrilme kırılma eğrileri (Sürtünme değeri % 4 PV model)

Kat adedinin ve rijit cisimlerin narinliğinin artması sonucunda elde edilen kırılma eğrilerine göre devrilme olasılıkları artmaktadır. Bu hem kat yüksekliğinin artmasından dolayı artan kat ivmelerine hem de narinliğin artmasından dolayı azalan harekete karşı gösterilen direnç ile açıklanabilir.

Açıklık sayısının artması ile elde edilen %50 ve %85 aşılma olasılığına sahip spektral ivme değerlerinde %1-2 civarında bir artış elde edilmiştir. Bu da açıklık sayısının fazla olmasının devrilme olasılığını az bir miktar azalttığını göstermektedir. Bu hem PTV hem de PV modeli için geçerli bir çıkarımdır.

3 katlı yapılarda daha yüksek periyot değerine sahip izolatörlerin kullanılması durumunda devrilme olasılığında bir azalma söz konusudur. 6 ve 9 katlı yapılarda bu azalım ise 3 katlı yapılardaki kadar belirgin değildir. Dolayısı ise esnek yapılarda artan izolatör periyodunda ortaya çıkan etkiye belirgin bir azalma söz konusu değildir.

Sürtünme değerinin az olduğu izolatör sistemlerinde devrilme olasılıklarının daha az olduğu elde edilmiştir. En etkili parametrenin sürtünme katsayısı olduğu söylenebilir. Elde edilen kırılma eğrilerinin tamamı tezin ekler bölümünde sunulmuştur.

Bu tez kapsamında araştırılan husus sismik izolatörlü yapılardan olan sürtünmeli sarkaç sistemi elemanlarda meydana gelen sürtünme ısınmasında dolayı değişen sürtünme katsayısının rijit bir cismin devrilme davranışına olan etkisidir. Dolayısı ile aşağıda verilen tablolarda her bir yapı ve izolatör sistemi parametresine bağlı olarak hızın ve sıcaklığın sürtünme üzerindeki etkisinin dikkate alındığı PTV modelinden elde edilen sonuçlar sadece hızın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin dikkate alındığı sonuçlar normalize edilerek verilmektedir. Bu tablolarda kırılma eğrilerinden elde edilen aşılma olasılıklarına karşılık gelen spektral ivme değerleri elde edilmiş ve oranlanmıştır.

Tablo 6.1. PTV modelinden elde edilen sonuçların PV modeli ile oranlanması sonucunda elde edilen değerlerin açıklık sayısında bağlı olarak gösterimidir. Bu tablolarda P50% ve P85% sırası ile %50 ve %80 devrilme olasılıklarına sahip spektral ivme değerlerinin ortalamalarının oranını ifade etmektedir. Açıklık sayısı ile sıcaklık etkisinin çok değişmediği ancak PTV modelinde aynı devrilme olasılığına sahip spektral ivme değerinin yaklaşık olarak ortalamada %4-5 civarında daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo 6.1. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin açıklığa bağlı sonuçları

	Açıklık Adedi								
	4			5			6		
Kat Ad.	3	6	9	3	6	9	3	6	9
P50%	1,01	1,05	1,04	1,03	1,05	1,03	1,03	1,05	1,04
P85%	1,00	1,05	1,04	1,03	1,06	1,04	1,03	1,07	1,04

Tablo 6.2.'de verilen değerle ise efektif periyot değerine bağlı olarak PTV modelinden elde edilen değerlerin PV modelinden elde edilenler ile normalize edildikten sonra bulunan ortalama değerleri göstermektedir. Efektif periyot arttıkça PTV modelinin etkisi de artmaktadır. Dolayısı ise efektif periyodun azalması durumunda PTV ve PV modellerinden elde edilen devrilme olasılıklarına karşılık gelen spektral ivme değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

Tablo 6.2. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin efektif periyoda bağlı sonuçları

	Teff								
	3,50			4,25			5,00		
Kat Ad.	3	6	9	3	6	9	3	6	9
P50%	1,02	1,04	1,03	1,03	1,05	1,04	1,03	1,05	1,05
P85%	1,02	1,05	1,02	1,02	1,07	1,04	1,02	1,06	1,06

Kat kütlelerinin artması sonucunda oluşan PTV ve PV modeli arasındaki ilişki Tablo 6.3'te gösterilmiştir. Buna bağlı olarak iki model arasındaki fark kütle oranının artması sonucunda azalmaktadır. Bu azalım 3 katlı yapılar için daha belirgindir.

Tablo 6.3. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin açıklığa bağlı sonuçları

	Ws/W					
	0,65			0,85		
Kat Ad.	3	6	9	3	6	9
P50%	1,03	1,06	1,04	1,01	1,04	1,04
P85%	1,04	1,06	1,05	1,00	1,06	1,03

Sürtünme katsayısında bağlı olarak elde edilen PTV ve PV modelleri arasındaki ilişki Tablo 6.4'te verilmiştir. Sürtünme değerinin artması sonucunda PTV modeli ile PV modelinden elde edilen ortalama sonuçlar arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bu fark kat adedinin artması ile daha belirgin hale gelmektedir.

Tablo 6.4. PV modeli ile normalize edilen PTV modeli değerlerinin sürtünme değerine bağlı sonuçları

	Sürtünme Değeri					
	0,04			0,08		
Kat Ad.	3	6	9	3	6	9
P50%	1,01	1,03	1,02	1,03	1,07	1,06
P85%	1,00	1,01	1,00	1,04	1,11	1,08

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında sürtünmeli sarkaç sistemleri ile izole edilmiş sismik yalıtımlı iki boyutlu elastik çerçevelerin çatı katında bulunan rijit cisimlerin sallanma hareketi incelenmiştir. Sismik tehlike analizi sonuçlarına bağlı olarak belli özelliğe sahip deprem ivme kayıtları seçilmiş ve bu kayıtlar ile yapılan ölçeklendirmeler ile artımsal dinamik analiz yapılmıştır. Sürtünmeli sarkaç sistemlerinde meydana gelen sıcaklıktan dolayı sürtünme katsayısındaki değişim dikkate alınmış ve ayrıca bu etki dikkate alınmadan her bir çerçeve ile iki farklı yapı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan çerçeveler kat adedi, açıklık sayısı, efektif izolatör periyot değeri, üst yapının ağırlığının tüm yapının ağırlığına oranı ve sürtünme katsayısı açısından farklılık göstermektedir.

Her bir izolatör periyot değerine bağlı olarak 3 farklı deprem ivme kaydı seti seçilmiştir. Bu deprem kayıtları artan katsayılar ile çarpılarak çerçeveler analiz edilmiş ve her analizde çatı katında oluşan ivme değeri kaydedilmiştir. Bu ivme kaydı ile devrilme analizinde kullanılacak olan ikinci dereceden diferansiyel denklem çözülerek oluşacak açılar değeri elde edilmiştir. Bu açı değerinin kritik değeri geçmesi sonucunda devrilmenin meydana geldiği varsayılmıştır. Devrilmenin meydana geldiği spektral ivme değeri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerler ile kırılma analizi yapılmıştır ve spektral ivme değerlerine bağlı olarak farklı geometrideki yapıların devrilme olasılıkları hesap edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem rijit cisim tepkileri hem de sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklıktan dolayı meydana gelen sürtünme değişimi açısından incelenmiştir.

3 katlı yapılarda meydana gelen devrilme olasılığı artan izolatör periyodu ile azalmakta iken 6 ve 9 katlı yapılarda izolatör periyodunun artması sonucunda 3 katlı yapılarda olduğu gibi belirgin bir değişim söz konusu olmamıştır. Bu nedenle rijit olan yapıların içerisinde bulunan objelerin korunması açısından eğrilik yarıçapı yüksek izolatörlerin kullanılması düşünülebilir. Ayrıca sürtünme katsayısının az olması durumunda da devrilme olasılıklarının az olduğu söylenebilir. Bu durumda da tasarım aşamasında küçük sürtünme katsayısının seçilmesi rijit cisimlerin korunmasında rol oynar. Ancak eğrilik yarıçapının artırılması veya sürtünme katsayısının azaltılması gibi durumlarda izolatörlü yapılarda oluşan taban yer değiştirme taleplerinin artabileceği de göz önüne alınmalıdır.

Analiz edilen her bir yapı sisteminin sonuçları karşılaştırıldığında sıcaklık etkisinin dikkate alındığı durumlarda elde edilen %50 ve %85 devrilme olasılığına karşılık gelen spektral

ivme değerleri bu etkinin dikkate alınmadığı sistemlere nazaran daha yüksektir. Bu sonuç düşük sürtünmeli sistemlerden elde edilen ile uyumludur.

PTV modelinden elde edilen sonuçların PV modeli ile farkının en belirgin olduğu karşılaştırma sürtünme katsayısına bağlı olarak yapılan karşılaştırmadır. PTV modeli %8 sürtünme katsayısı bulunan modelde PV modelinden %10 civarında daha fazla spektral ivme etki etmesi durumunda 6 ve 9 katlı yapılarda %50 devrilme olasılığına sahiptir. 3 katlı yapılarda ise bu oran %3 civarındadır.

Üst yapı ağırlığının tüm yapı ağırlığına oranı açısından PTV modeli PV modeli ile kıyaslandığında ise %50 ve %85 olasılıkla devrilme meydana getirecek olan spektral ivme değerleri %4 civarında daha fazladır.

Bu çalışmanın eklerinde yapılan tüm analizlere ait kırılgenlik eğrileri verilmiştir. Burada verilen sonuçlara bağlı olarak ön tasarım aşamasında bir yapı içerisinde bulunan rijit cisimlerin devrilme olasılıkları tahmin edilebilir ve böylece yapısal olmayan elemanların güvenliği tasarım aşamasında öngörülebilir.

8. KAYNAKLAR

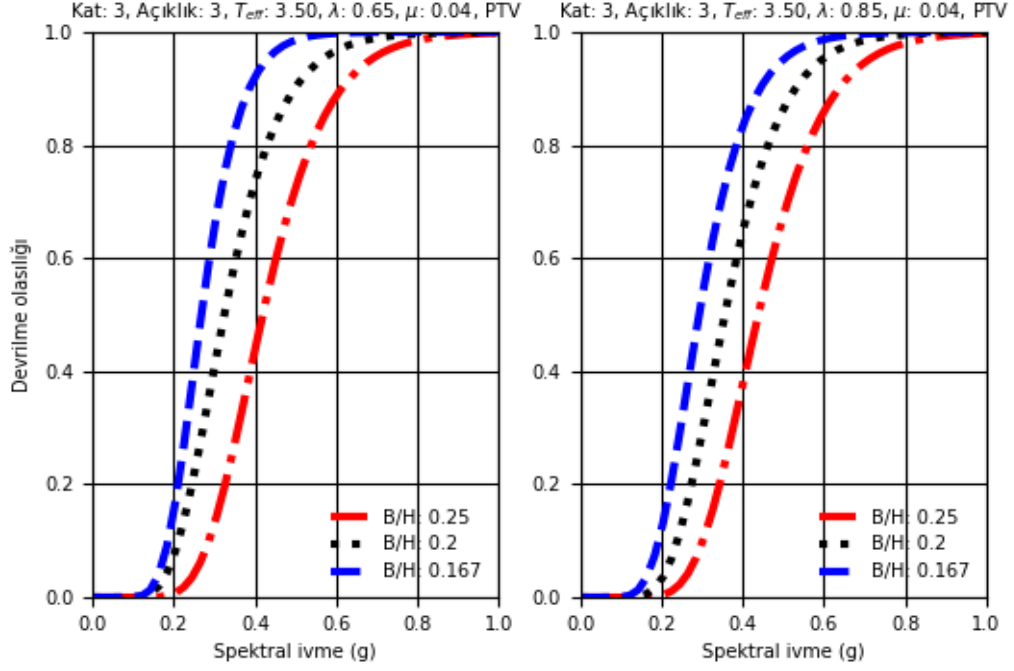
- Arredondo, C. A. ve Reinoso, E. (2008). Influence of frequency content and peak intensities in the rocking seismic response of rigid bodies. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(4), 517-533.
- Baker, J. W. (2024). *Baker Researh Group, Stanford University*, GitHub, https://github.com/bakerjw/CS_Selection
- Baker, J. W. (2008). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). *White paper*, version, 1, 72.
- Baker, J. W. & Jayaram, N. (2008). Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models, *Earthquake Spectra*, 24(1), 299-317. doi: 10.1193/1.2857544
- Baker, J. W., Lin, T., Shahi, S. K., & Jayaram, N. (2011). New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program. *PEER report*, 3, 2011.
- Chang, K. C., Hwang, J. S., and Lee, G. C. (1990). Analytical model for sliding behavior of Teflon-stainless steel interfaces. *Journal of Engineering Mechanics*, 116(12), 2749-2763.
- Cimellaro, G.P., Chiriatti, M., Reinhorn, A.M., Tirca, L. (2012). *Emilia Earthquake of May 20th, 2012 in Northern Italy: rebuilding a resilient community to multiple hazards*. MCEER-12-0009. MCEER, State University of New York (SUNY): Buffalo, NY
- Constantinou, M. C., Tsopeles, P., Kim, Y.-S., and Okamoto, S. (1993). *NCEER-Taisei Corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: Experimental and analytical study of a Friction Pendulum System (FPS)*. Report NCEER-93-0020, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- Contento, A., & Di Egidio, A. (2009). Investigations into the benefits of base isolation for non-symmetric rigid blocks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(7), 849-866.

- Constantinou, M. C., Kalpakidis, I. V., Filiatrault, A., & Lay, R. E. (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*. MCEER 11-0004, State University of New York (SUNY): Buffalo, NY
- Contento, A., & Di Egidio, A. (2014). On the use of base isolation for the protection of rigid bodies placed on a multi-storey frame under seismic excitation. *Engineering Structures*, 62, 1-10.
- Cornell, C Allin. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606
- Di Egidio, A., & Contento, A. (2009). Base isolation of slide-rocking non-symmetric rigid blocks under impulsive and seismic excitations. *Engineering Structures*, 31(11), 2723-2734.
- FEMA-451. (2006) NEHRP Recommended Provisions: Design Examples. *Technical Report FEMA 451*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA (2009). Quantification of building seismic performance factors, *Technical Report FEMA P695*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Housner, G. W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 403-417.
- Jayaram, N. and Baker, J. W. (2010) Ground-Motion Selection for PEER Transportation Research Program, Proceedings, *7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, Tokyo, Japan, 9p.
- Jayaram, N., Lin, T., & Baker, J. W. (2011). A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. *Earthquake Spectra*, 27(3), 797-815.
- Kitayama S, Constantinou MC (2018): *Seismic performance assessment of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7*. MCEER-18-0004, State University of New York (SUNY): Buffalo, NY

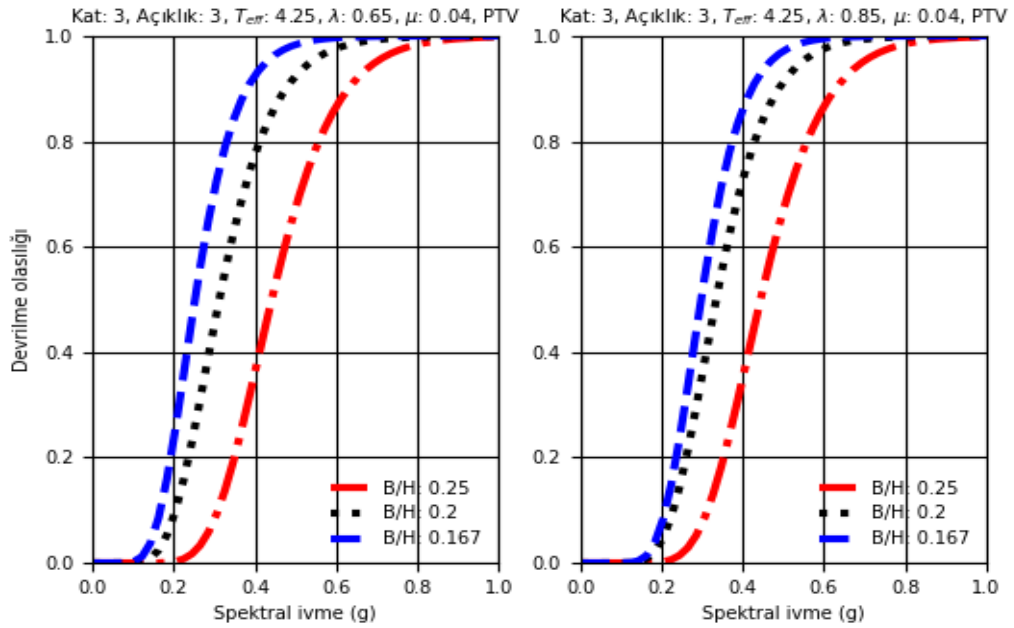
- Kumar, M., Whittaker, A. S., & Constantinou, M. C. (2019). *Seismic isolation of nuclear power plants using sliding bearings. MCEER-15-0006*, , State University of New York (SUNY): Buffalo, NY
- Makris, N., & Roussos, Y. (1998). Rocking response of anchored blocks under pulse-type motions. *Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering, PEER Report 1998/05*.
- Makris, N., & Zhang, J. (2001). Rocking response of anchored blocks under pulse-type motions. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(5), 484-493.
- McGuire, R. K. (2008). Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(3), 329-338.
- McKenna, F. T. (1997). *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing (Publication No. 9827036)*, [Doctoral dissertation], University of California, Berkeley, ProQuest Dissertations Publishing.
- Mokha, A., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M. (1988). *Teflon bearings in aseismic base isolation: Experimental studies and mathematical modeling. Report NCEER-88-0038*, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- Odabaşı, Ö. (2016). *Türkiye'deki yüksek binaların karakteristik yapısal özellikleri ve dinamik davranışı (Yayın No. 434265)*, [Yüksek Lisans Tezi], Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı Tez Merkezi
- PEER. (2024). *Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database*, PEER ground motion database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- Politopoulos, I. (2010). Response of seismically isolated structures to rocking-type excitations. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(3), 325-342.
- Symans, M. D. (2009). *Seismic Protective Systems: Seismic Isolation*, https://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/FEAM_Notes/Topic15-7-SeismicIsolationNotes.pdf

- Tsai, C. S. (1997). Finite element formulations for Friction Pendulum seismic isolation bearings. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(1), 29-49
- Tsopelas, P., Okamoto, S., Constantinou, M. C., Ozaki, D., and Fujii, S. (1994). *NCEERTaisei Corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: Experimental & analytical study of systems consisting of sliding bearings, rubber restoring force devices and fluid dampers. Report NCEER-94-0002*, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- USGS. (2024). *Unified Hazard Tool*, United States Geological Survey <https://earthquake.usgs.gov/hazards/interactive/>.
- Vassiliou, M. F., & Makris, N. (2012). Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2), 177-196.
- Veeraraghavan, S., Hall, J. F., & Krishnan, S. (2020). Modeling the Rocking and Sliding of Free-Standing Objects Using Rigid Body Dynamics. *Journal of Engineering Mechanics*, 146(6), 04020041.
- Yim, C. S., Chopra, A. K., & Penzien, J. (1980). Rocking response of rigid blocks to earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(6), 565-587.
- Zhang, J., & Makris, N. (2001). Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(5), 473-483.
- Zhou, H. S., & Ye, K. (2023). Study on rocking response of base-isolated structure considering the tensile effect of isolators. *Structures*, Vol. 58, 105493.
- Zhu, M., McKenna, F. and Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework, *SoftwareX*, 7, 6-11. doi: 10.1016/j.softx.2017.10.009

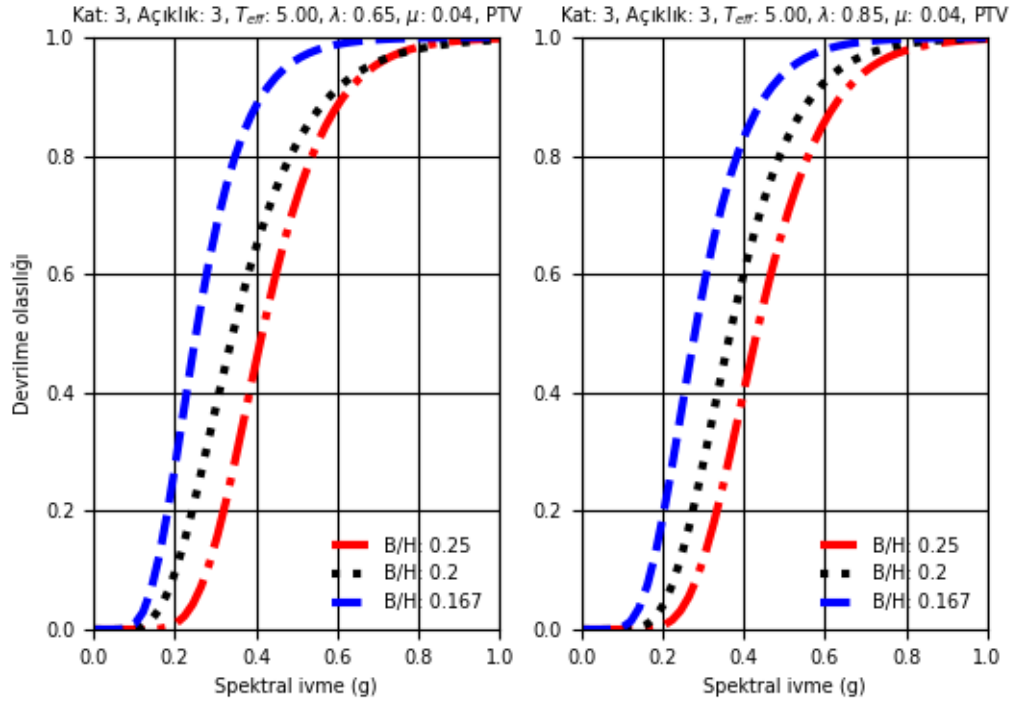
EKLER



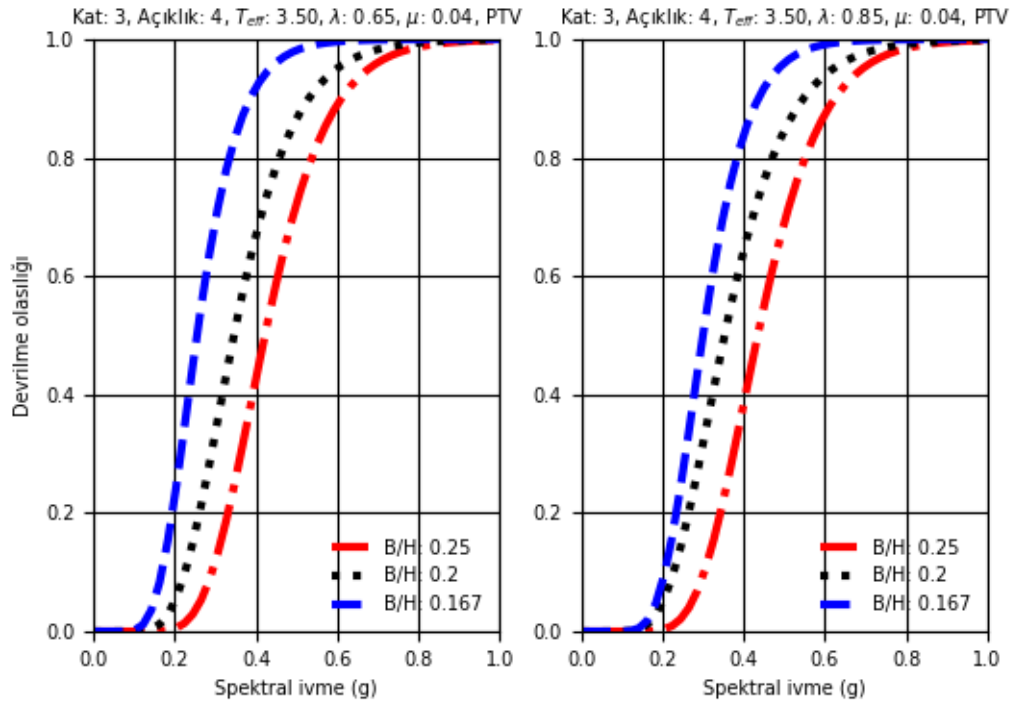
Şekil Ek. 1. 3 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



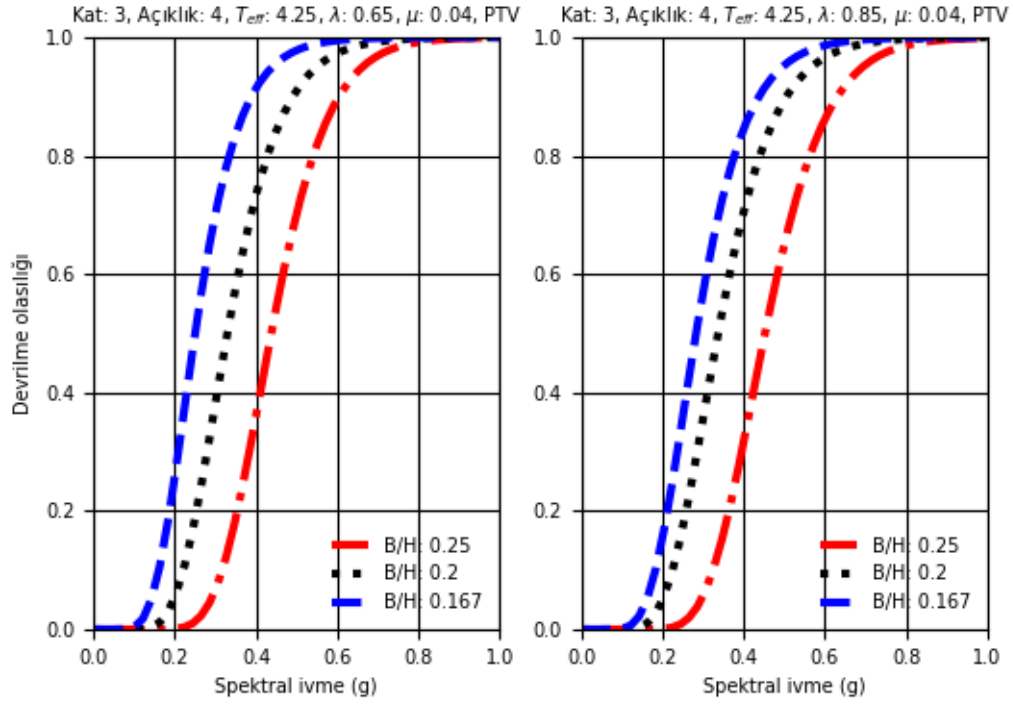
Şekil Ek. 2. 3 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



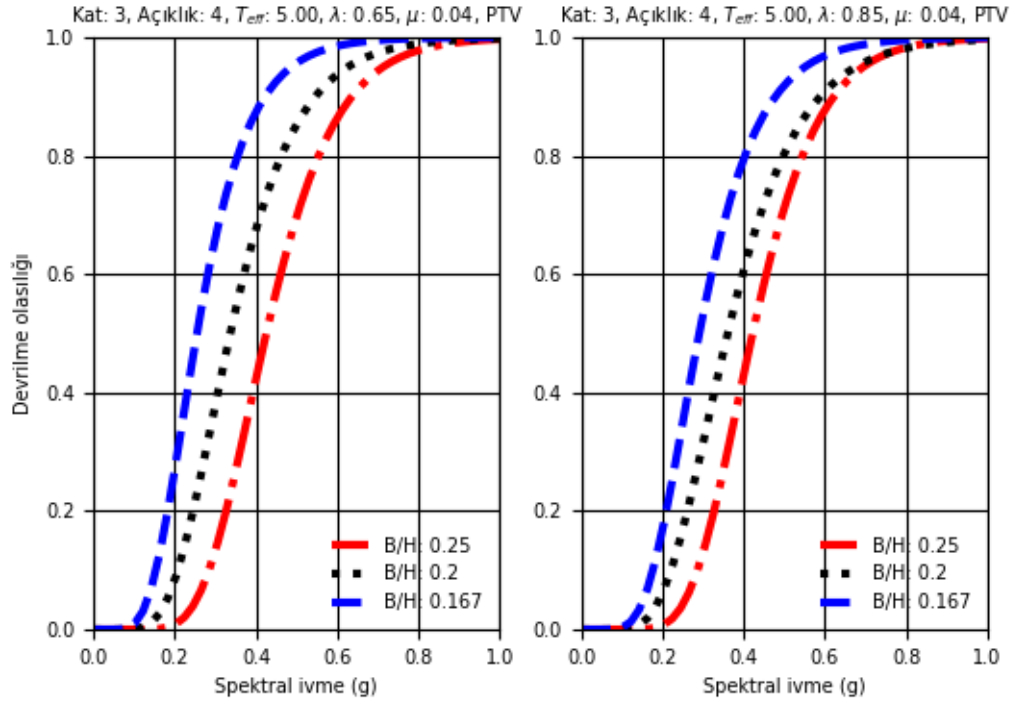
Şekil Ek. 3. 3 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



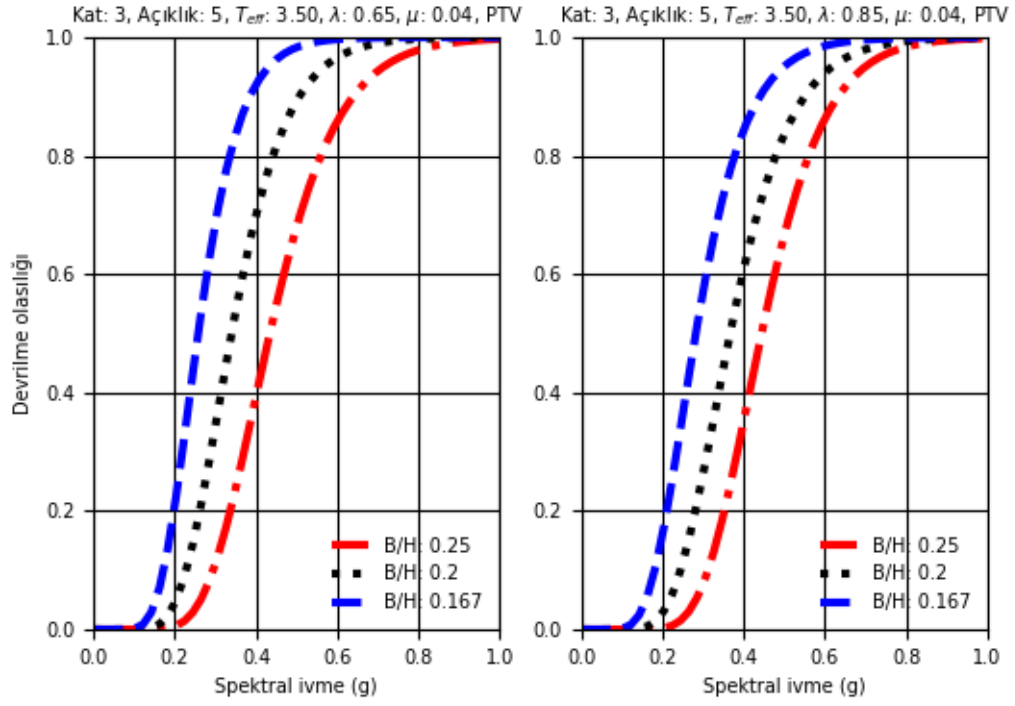
Şekil Ek. 4. 3 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



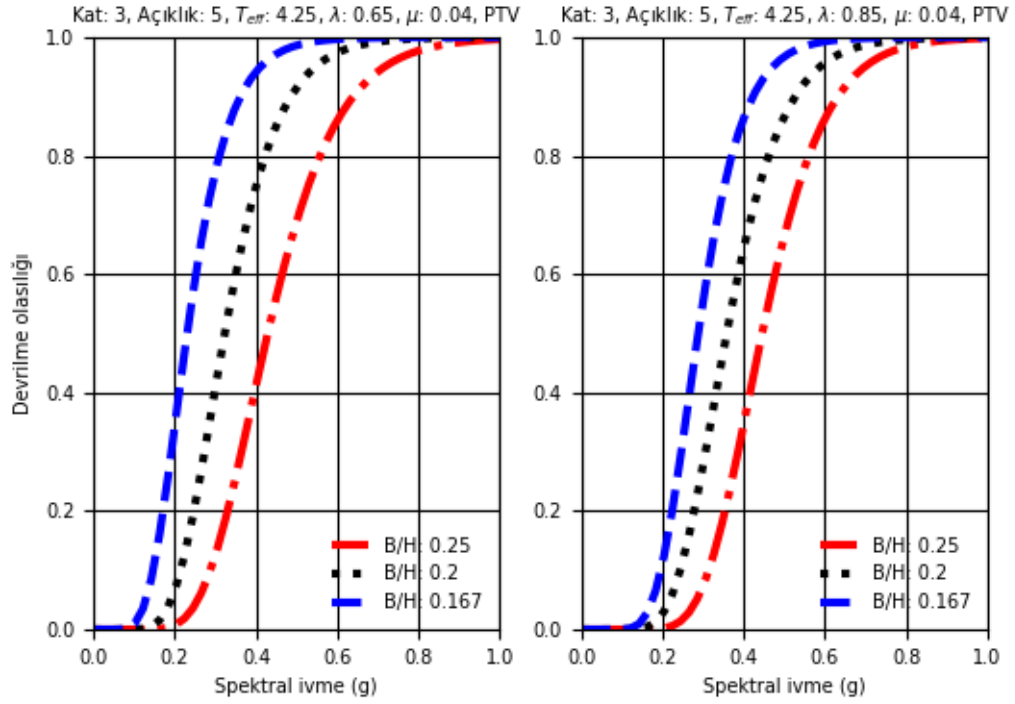
Şekil Ek. 5. 3 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



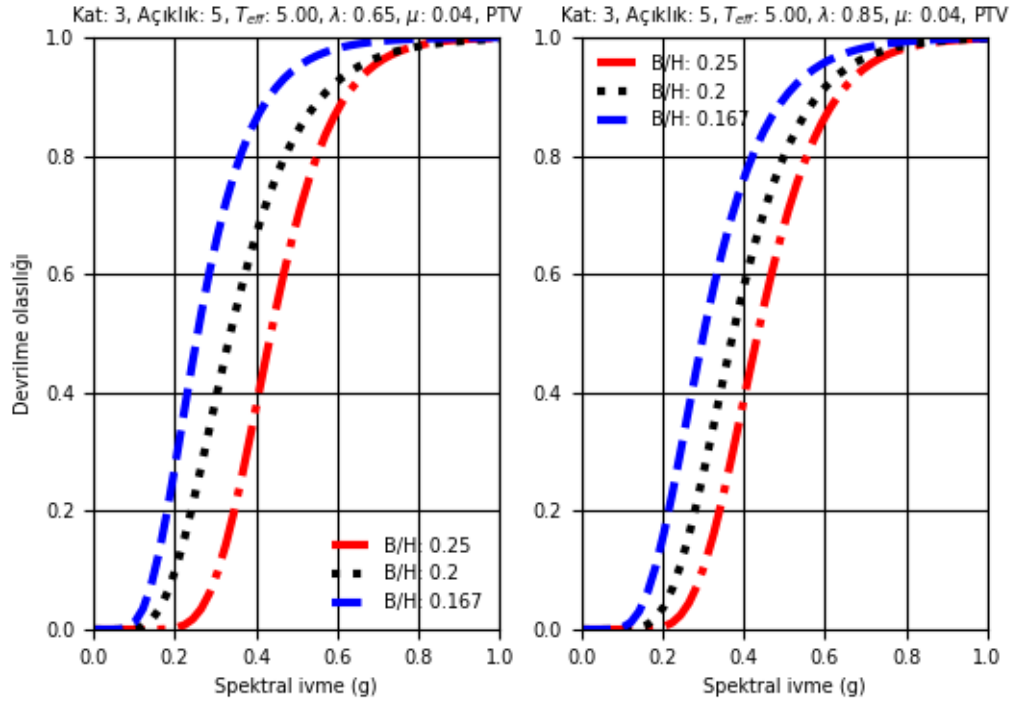
Şekil Ek. 6. 3 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



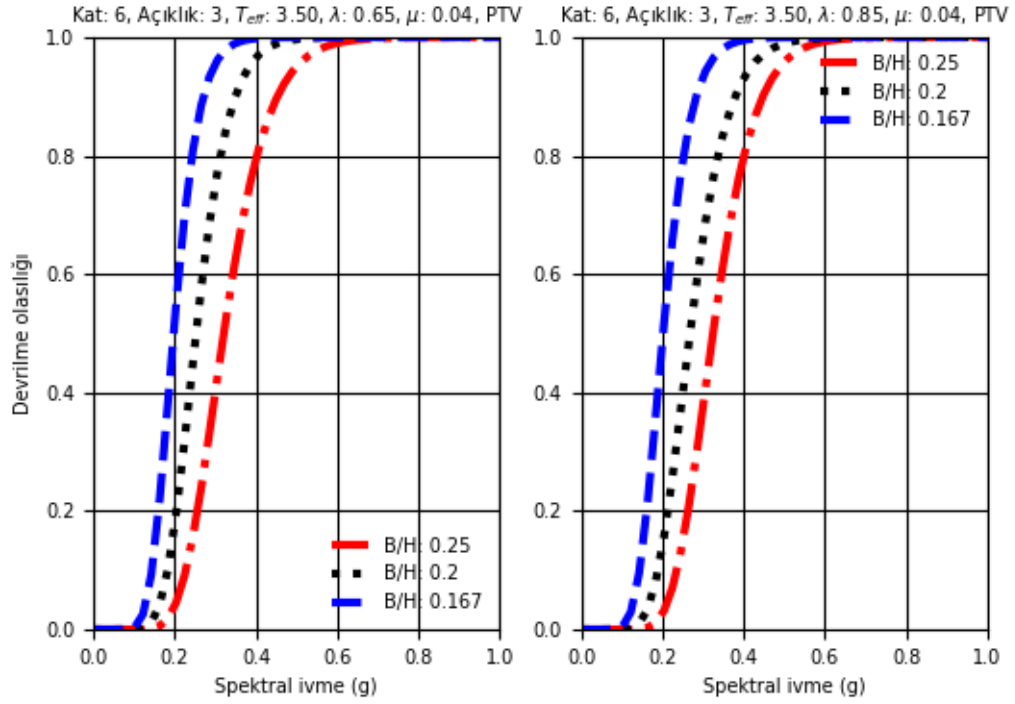
Şekil Ek. 7. 3 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



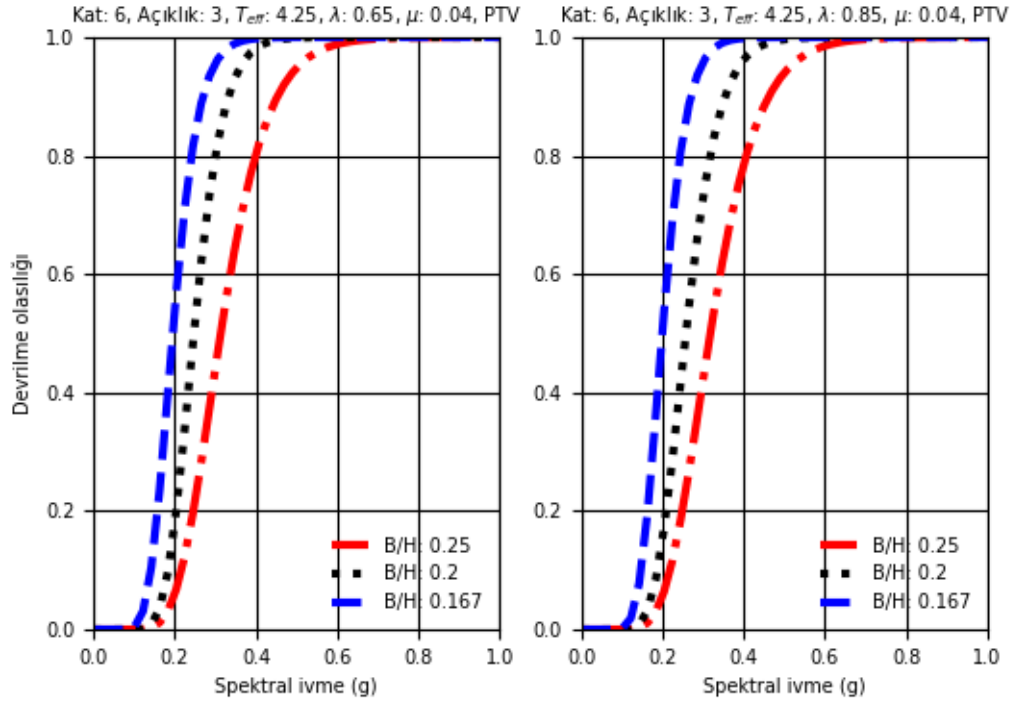
Şekil Ek. 8. 3 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



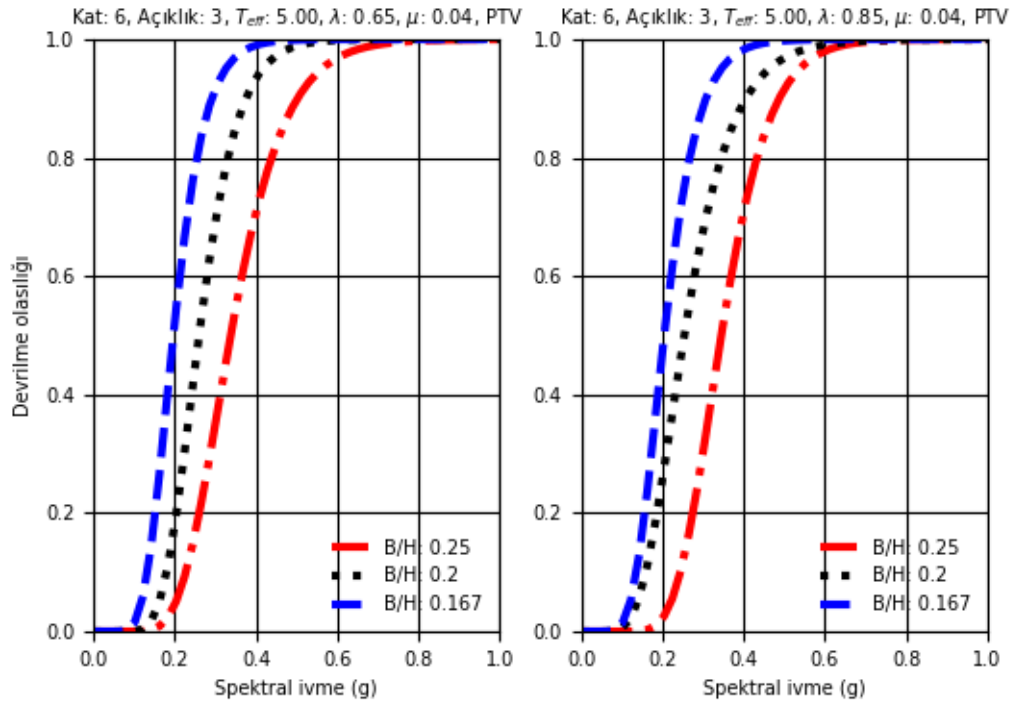
Şekil Ek. 9. 3 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



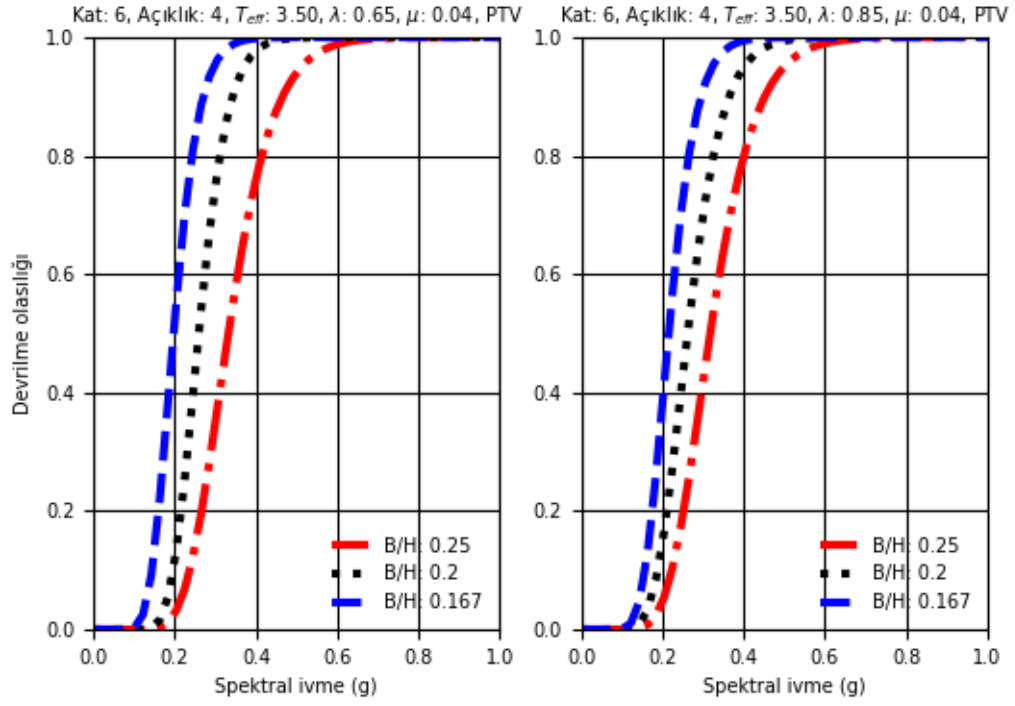
Şekil Ek. 10. 6 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



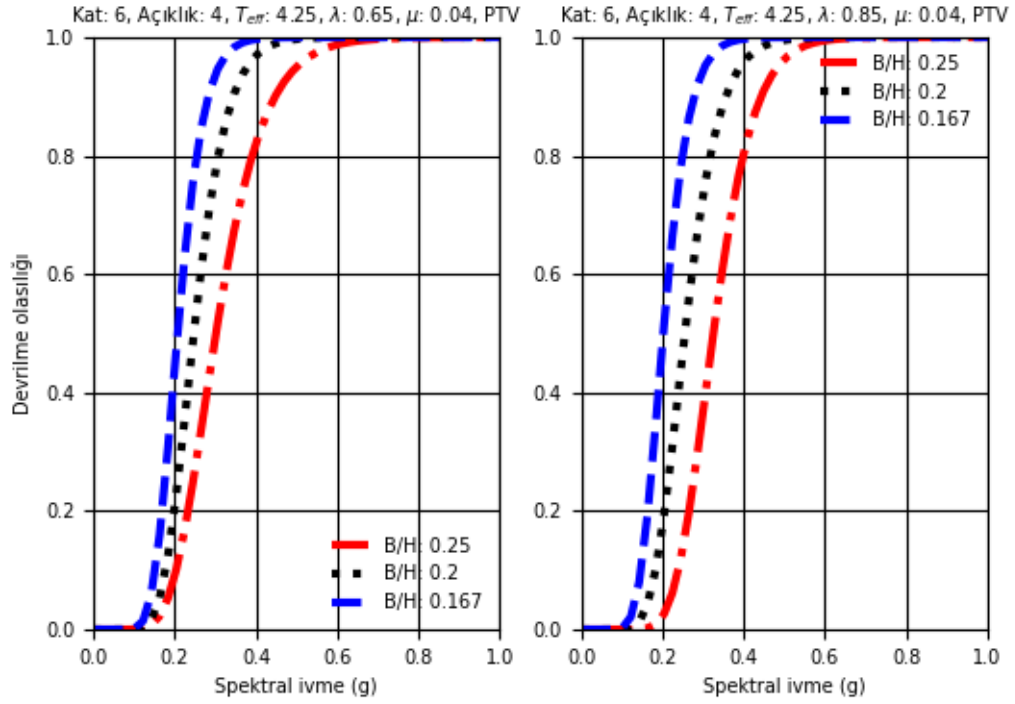
Şekil Ek. 11. 6 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



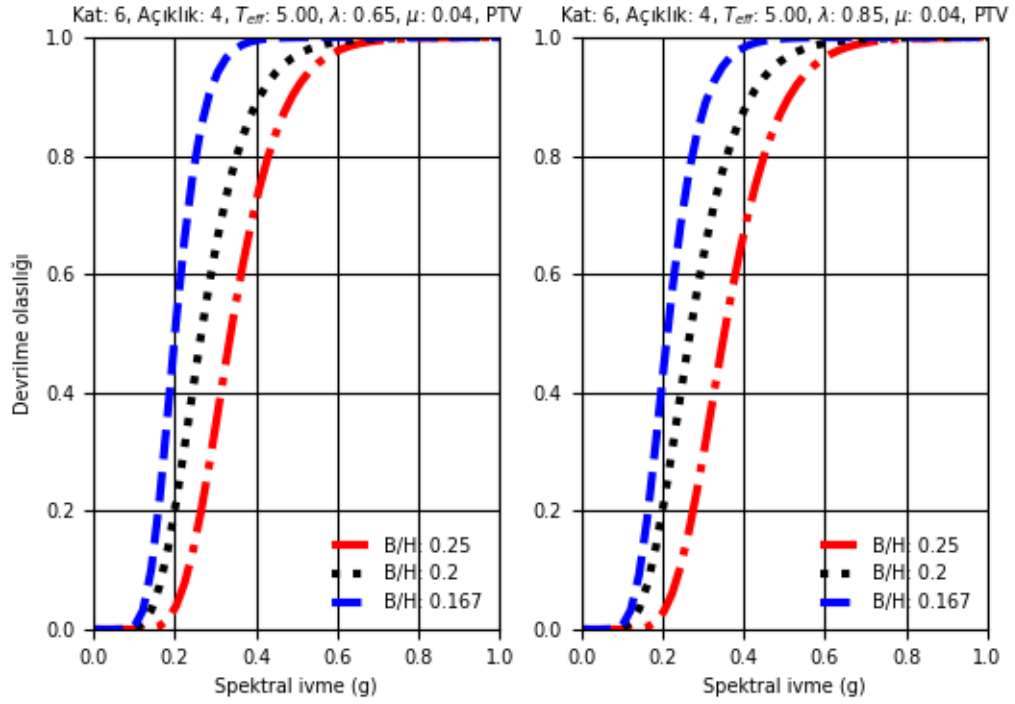
Şekil Ek. 12. 6 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



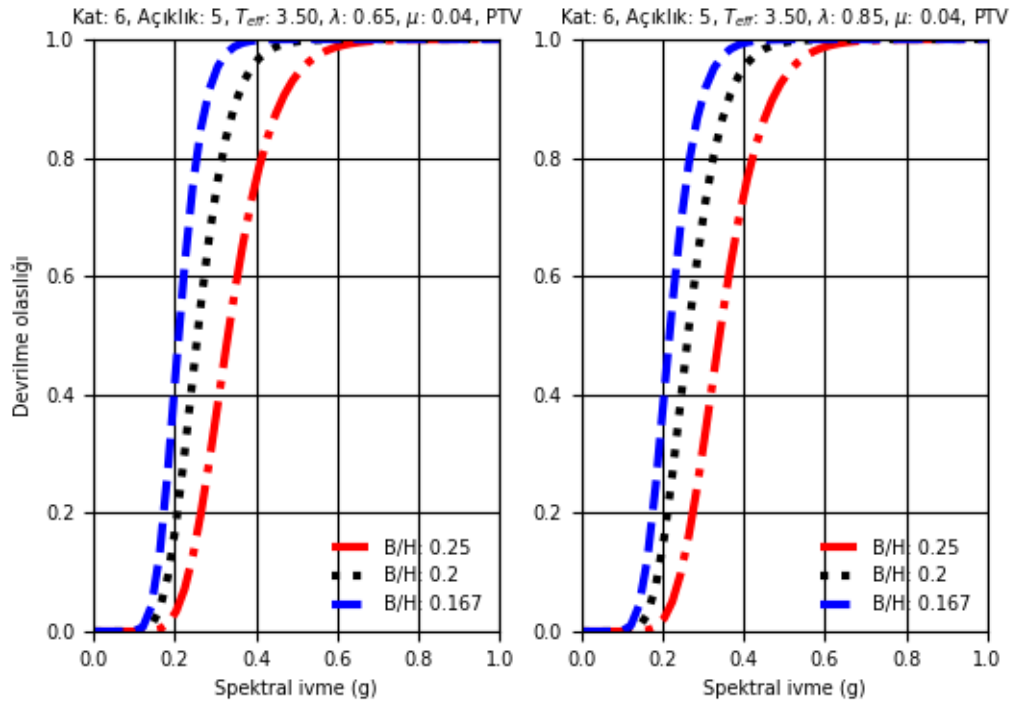
Şekil Ek. 13. 6 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



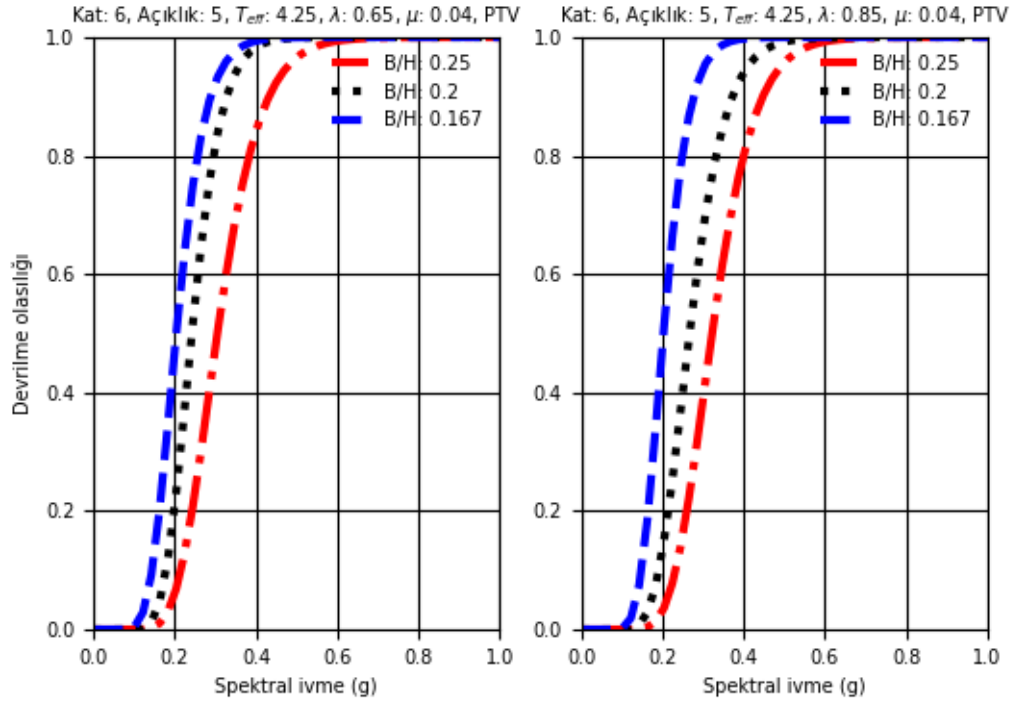
Şekil Ek. 14. 6 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



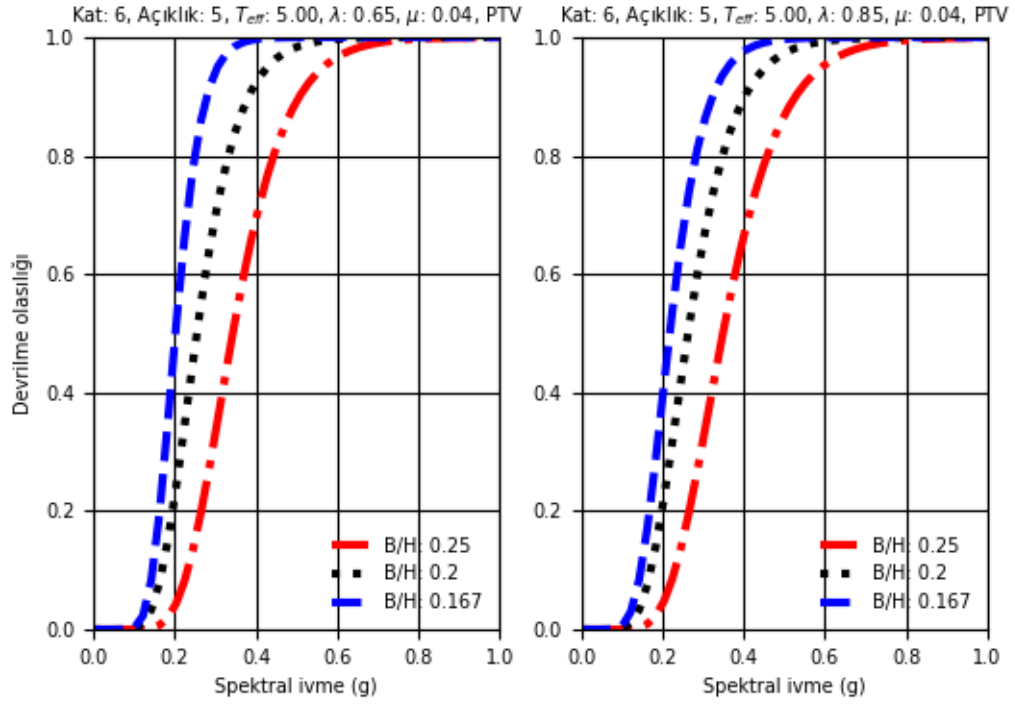
Şekil Ek. 15. 6 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılabilirlik eğrileri



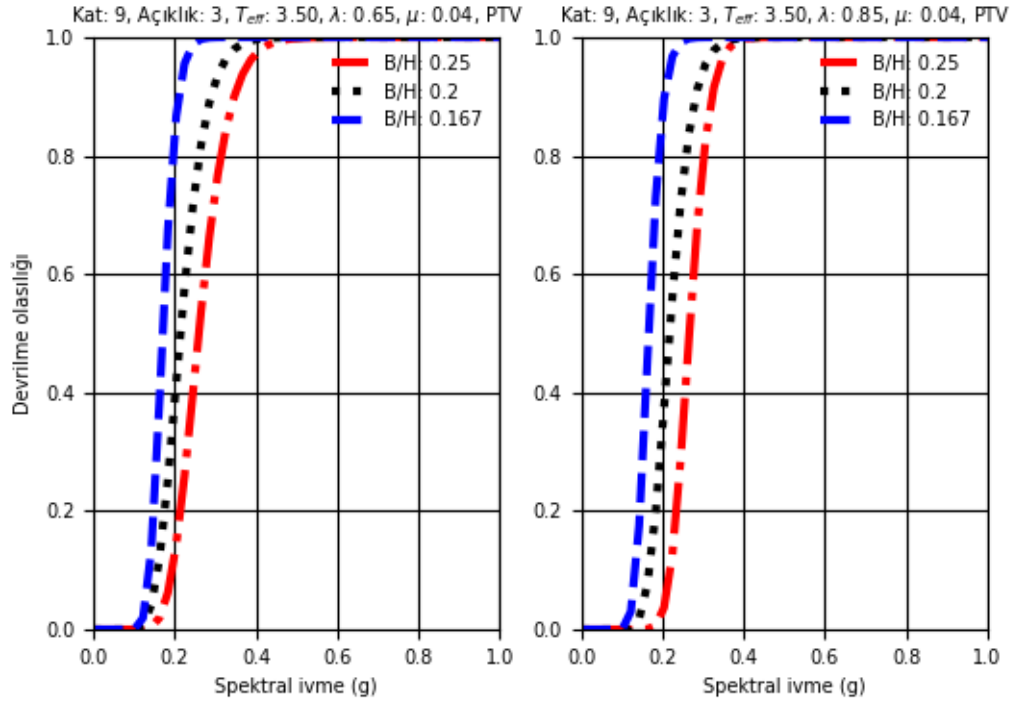
Şekil Ek. 16. 6 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılabilirlik eğrileri



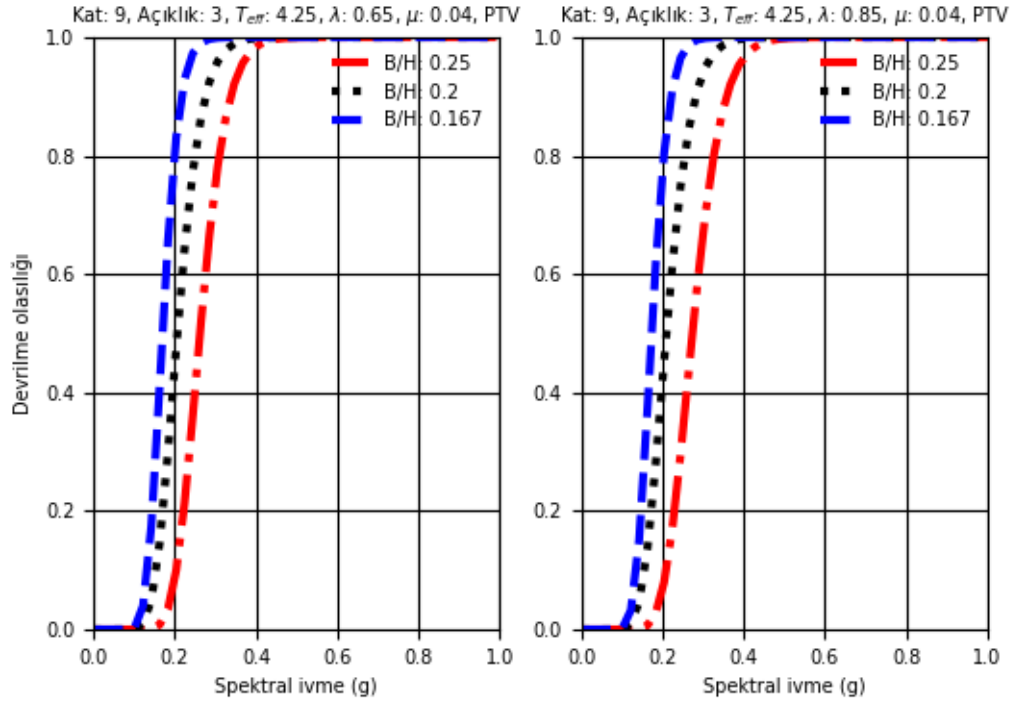
Şekil Ek. 17. 6 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



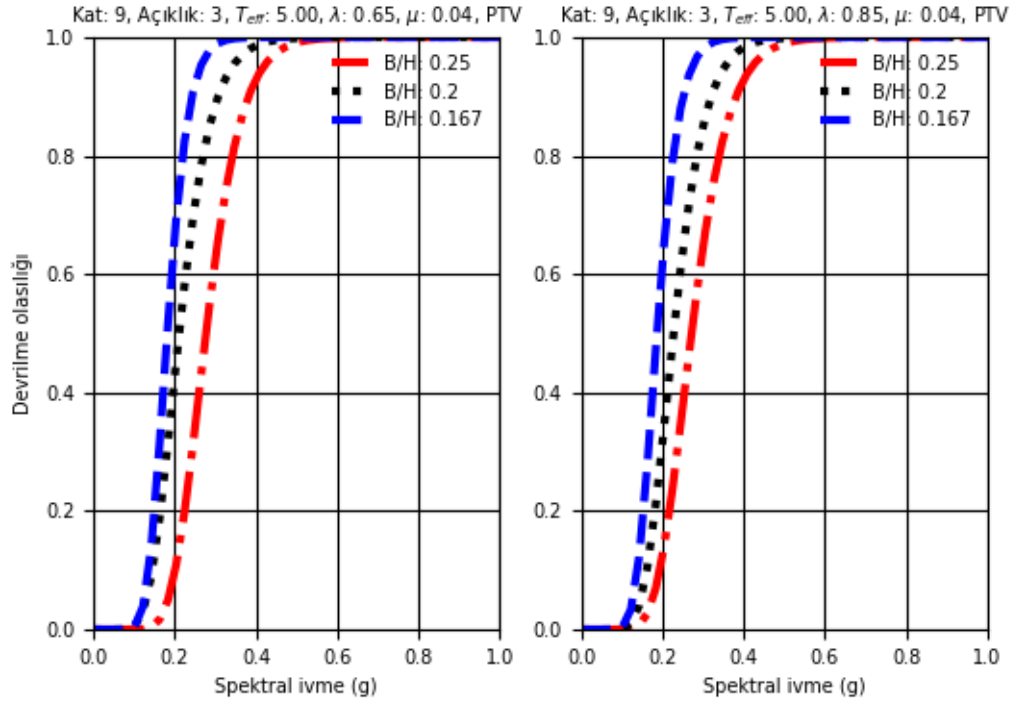
Şekil Ek. 18. 6 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



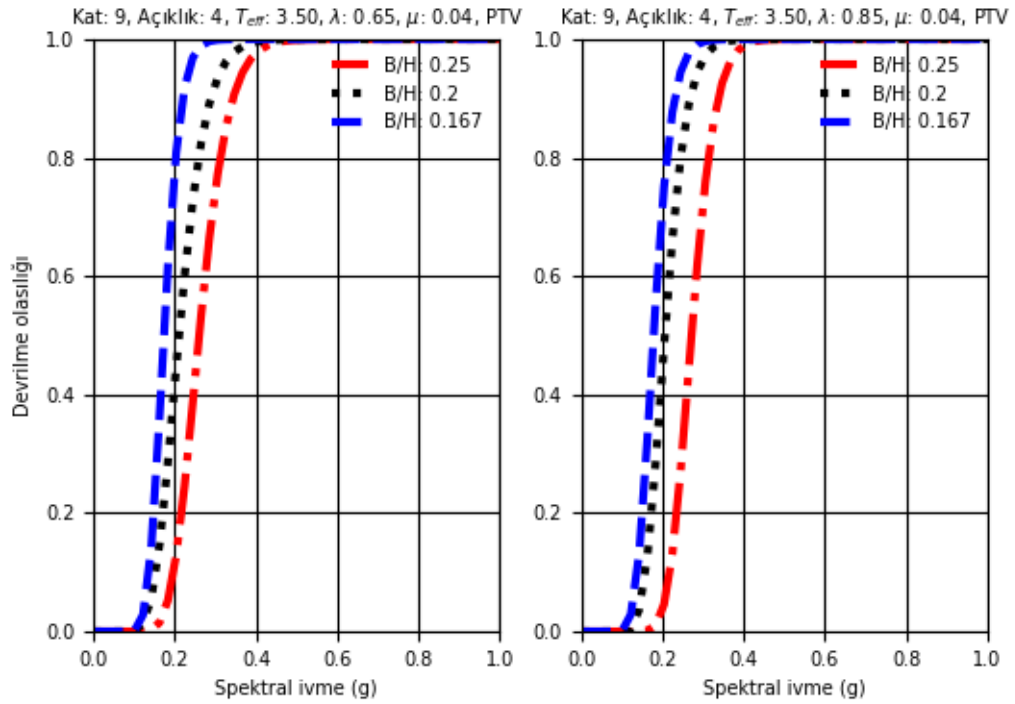
Şekil Ek. 19. 9 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



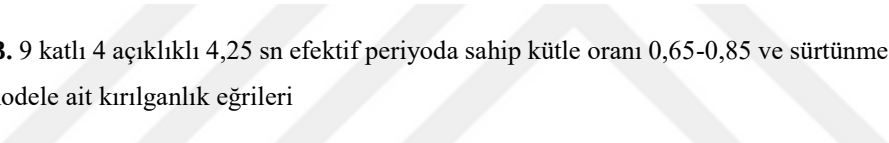
Şekil Ek. 20. 9 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



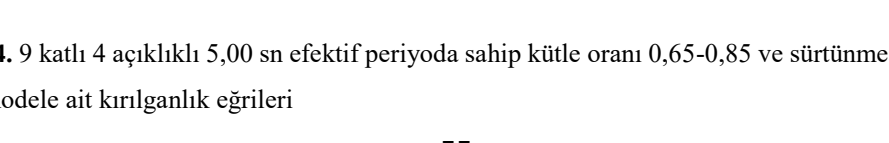
Şekil Ek. 21. 9 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri

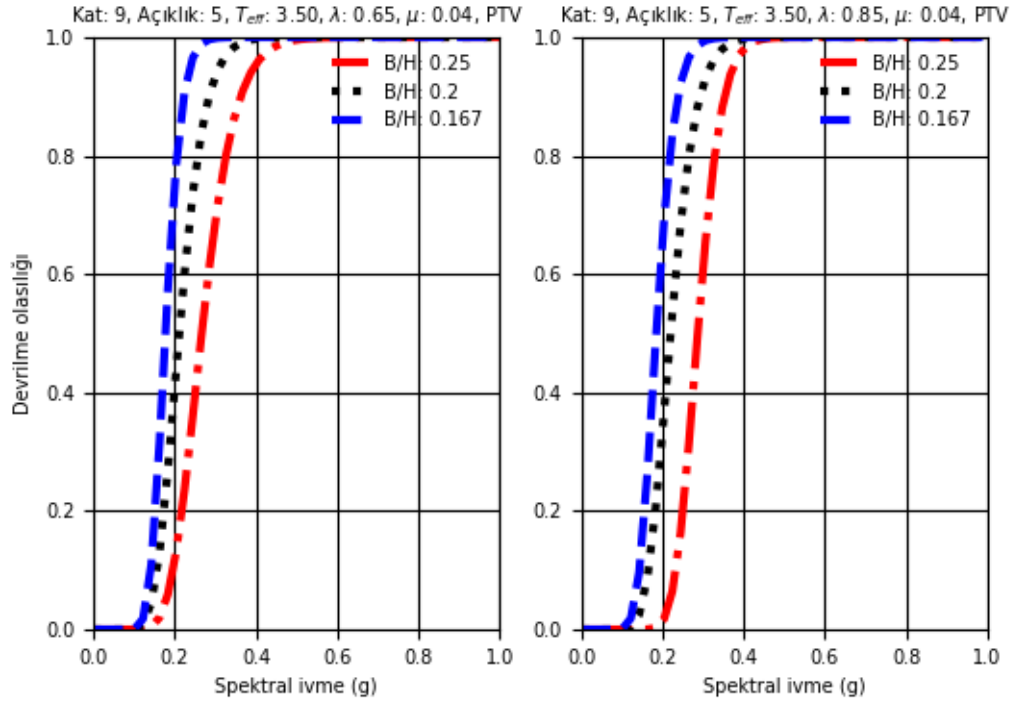


Şekil Ek. 22. 9 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri

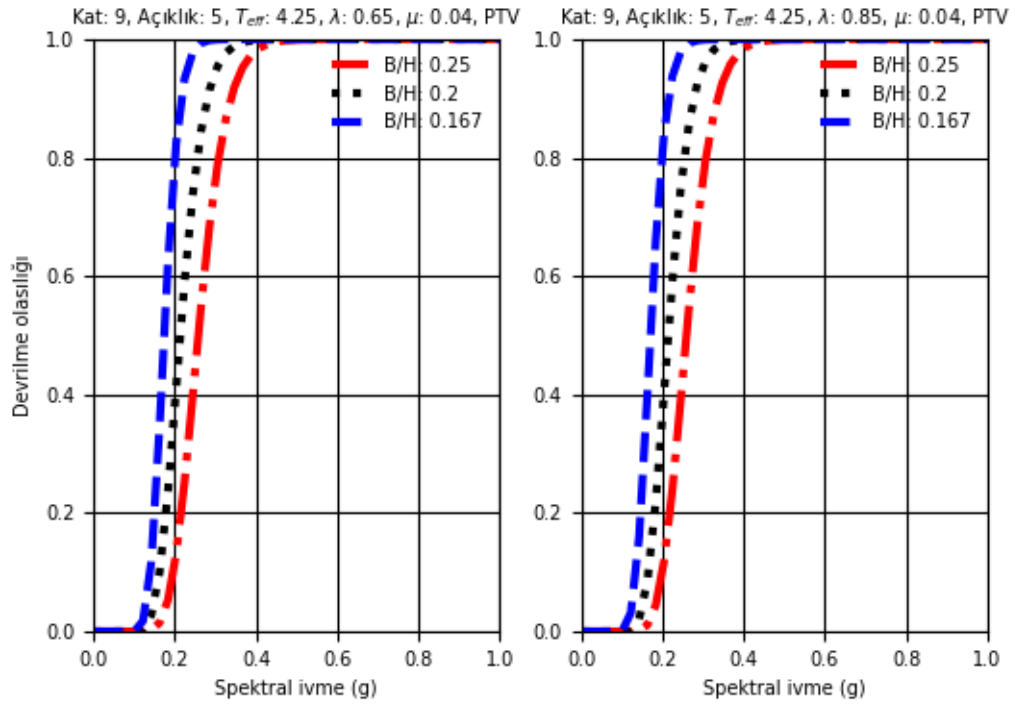


Kat: 9, Açıklık: 4, T_{er} : 5.00, λ : 0.65, μ : 0.04, PTV

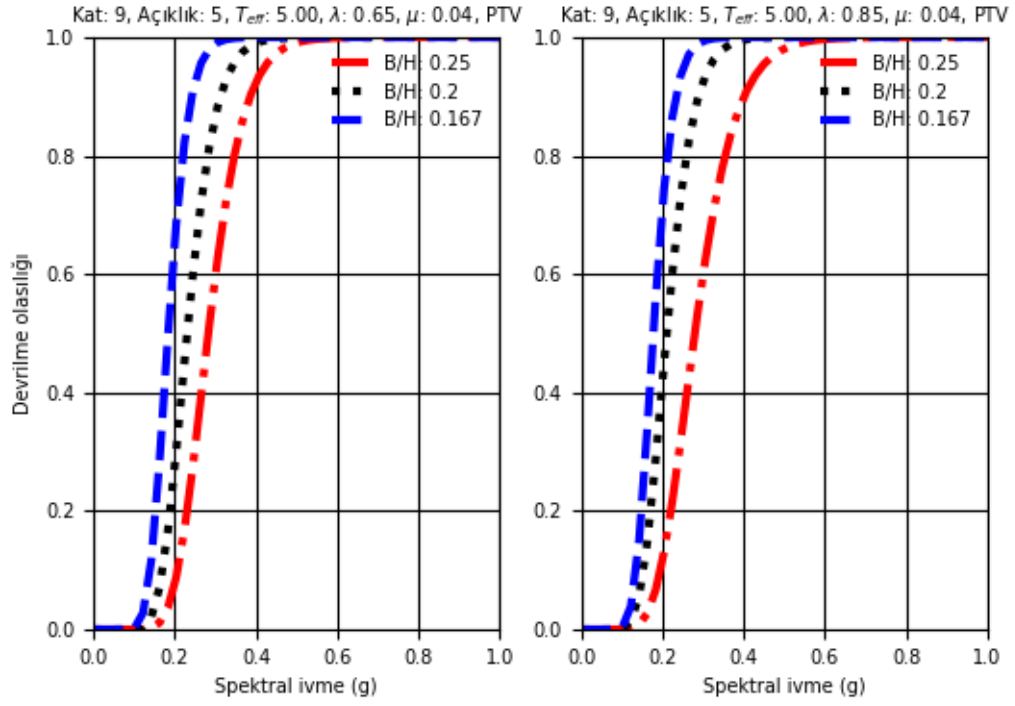




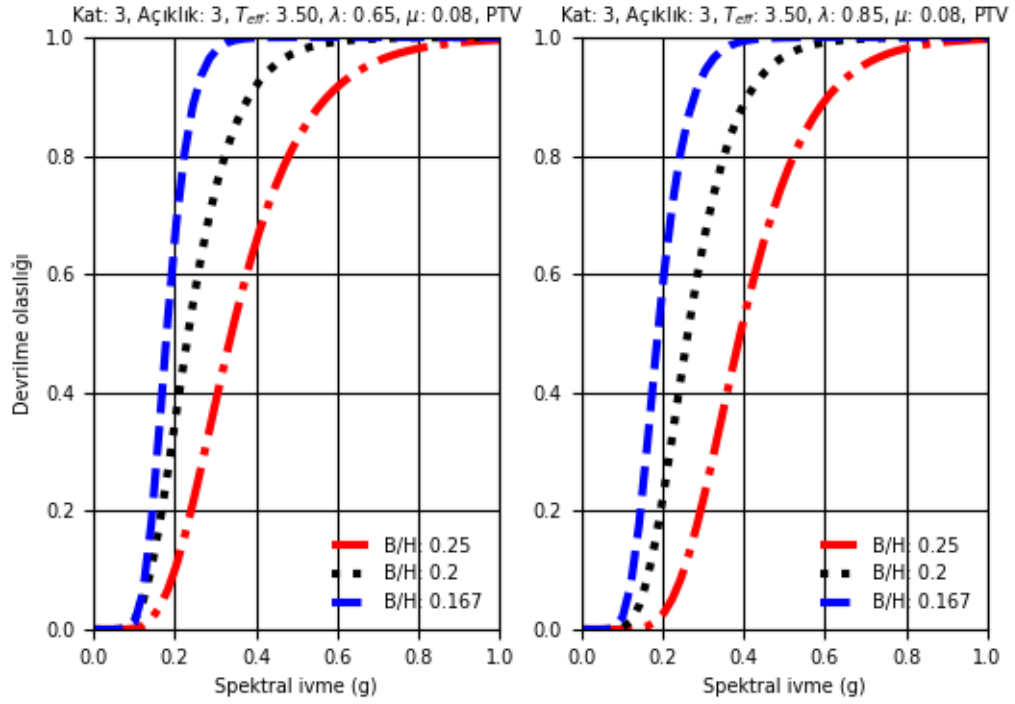
Şekil Ek. 25. 9 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



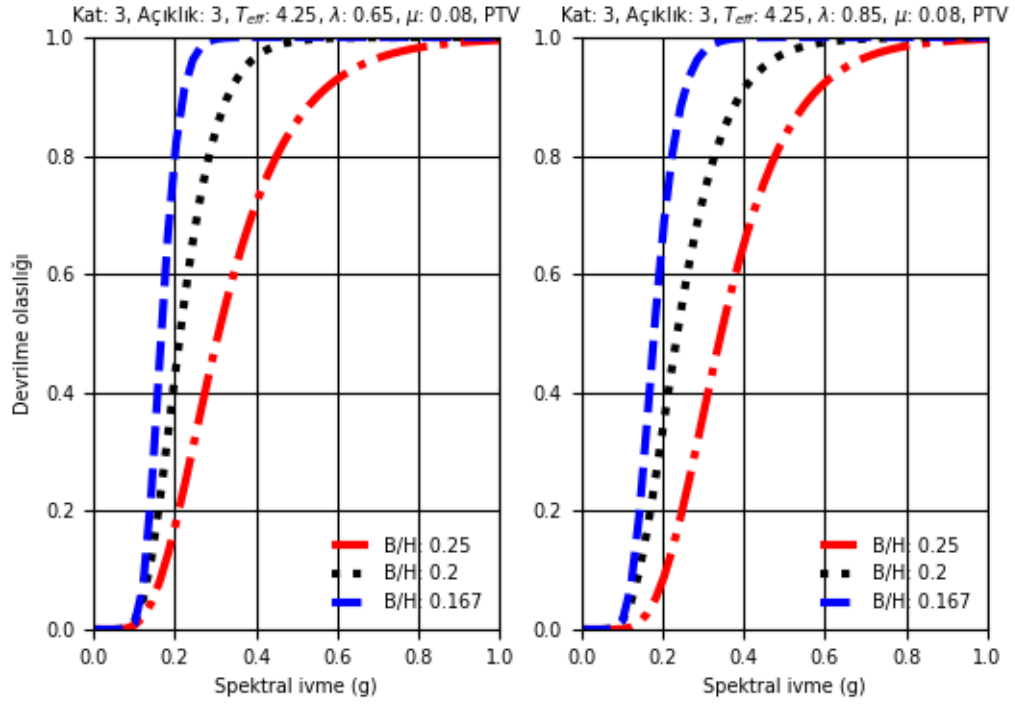
Şekil Ek. 26. 9 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



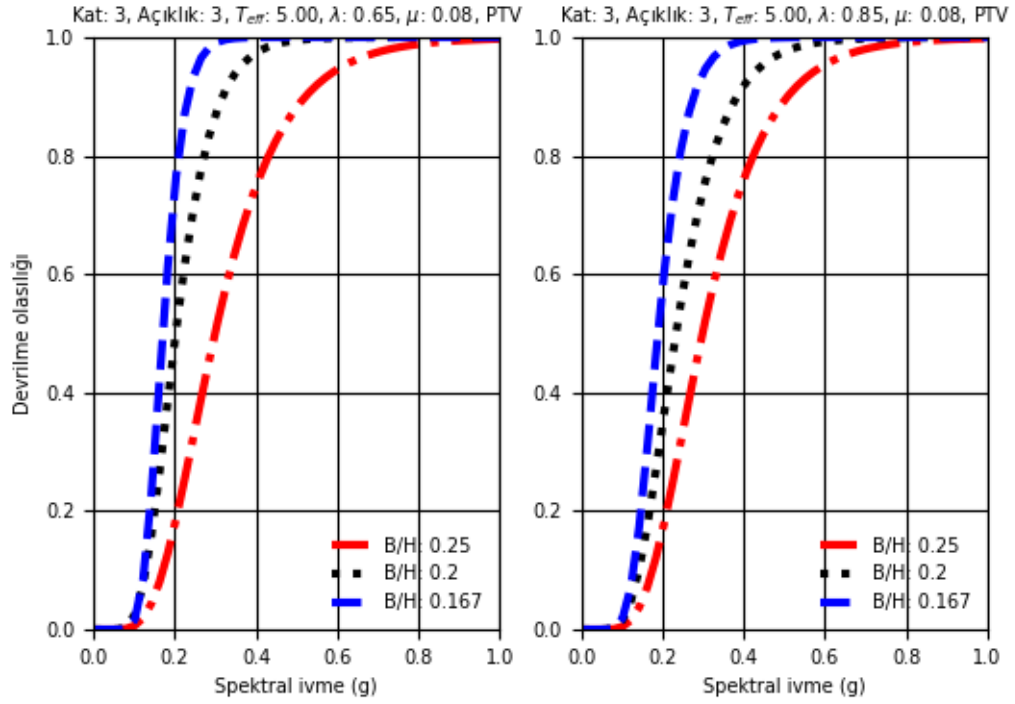
Şekil Ek. 27. 9 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



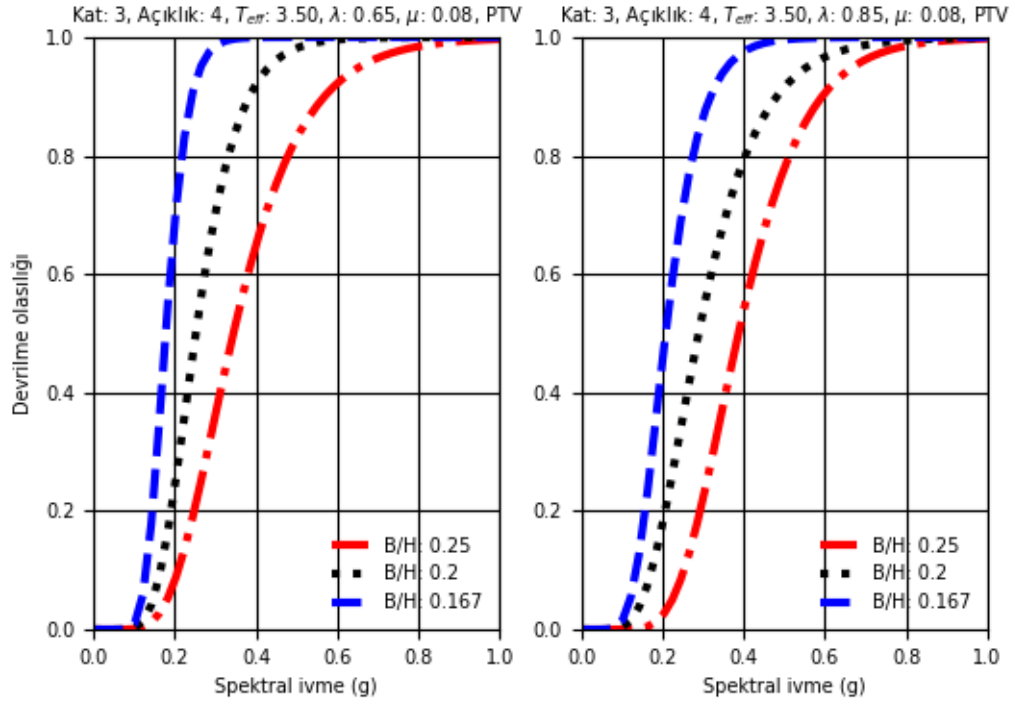
Şekil Ek. 28. 3 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



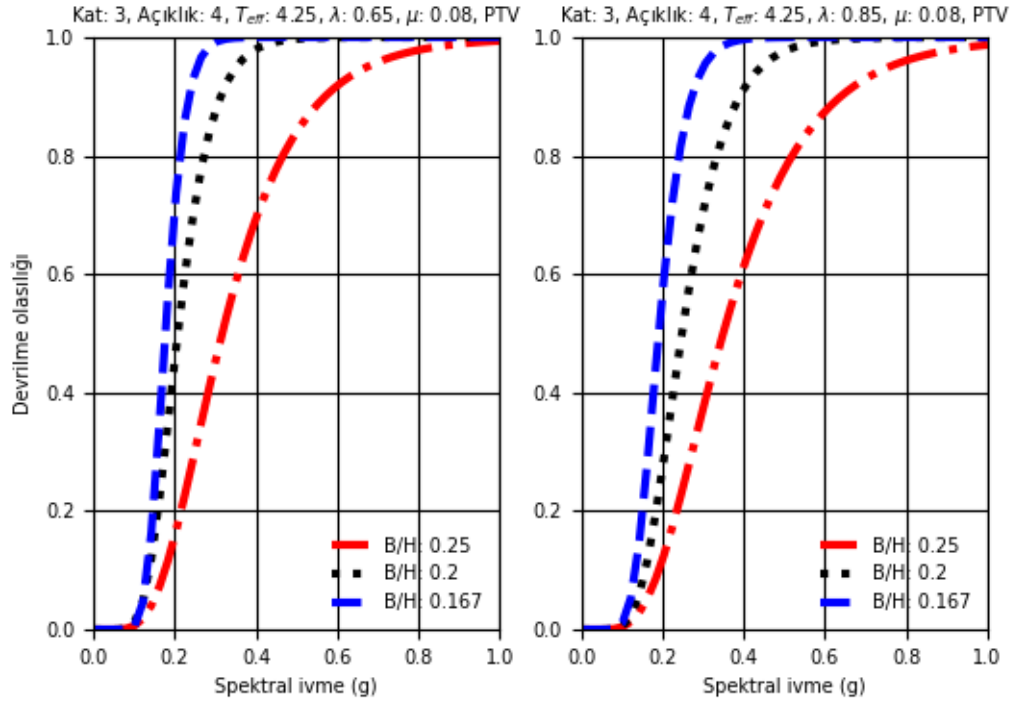
Şekil Ek. 29. 3 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



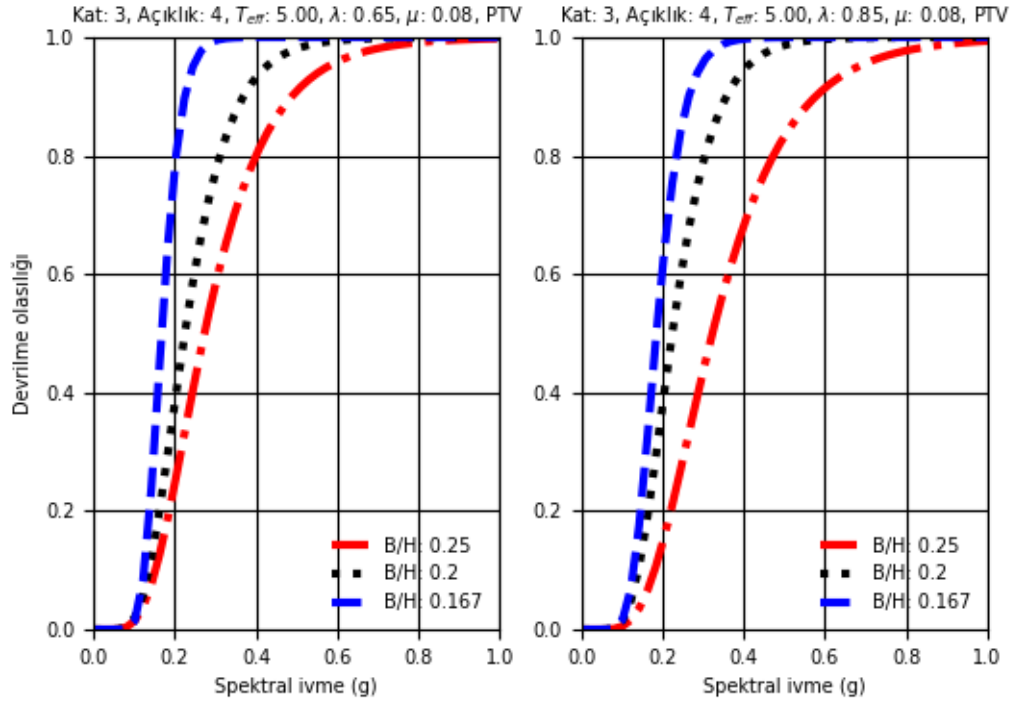
Şekil Ek. 30. 3 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



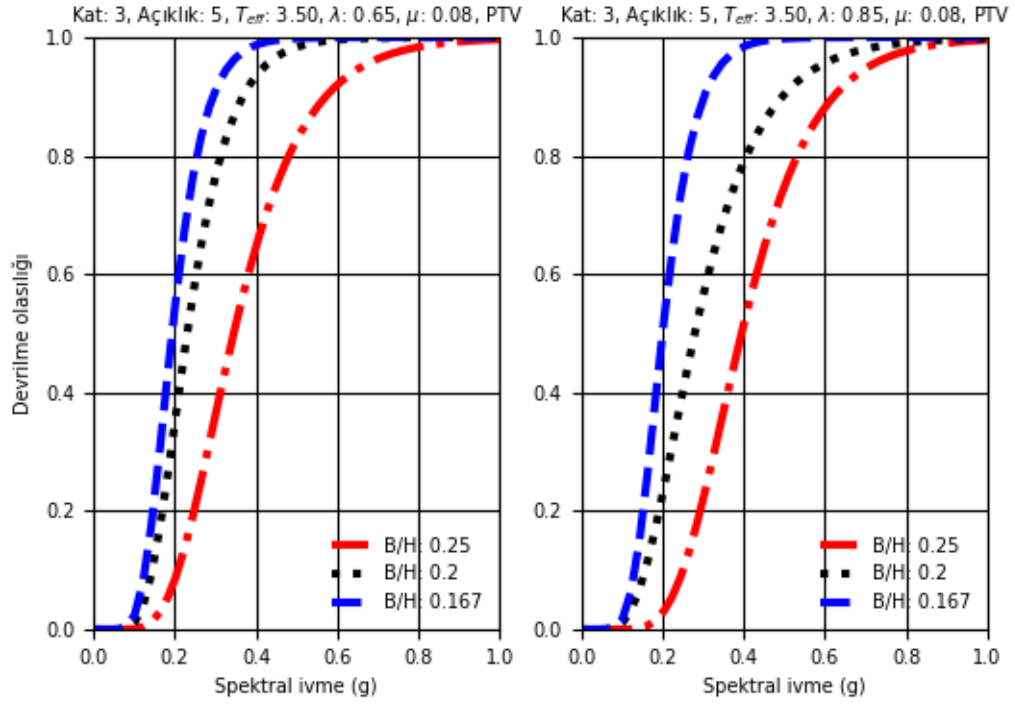
Şekil Ek. 31. 3 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



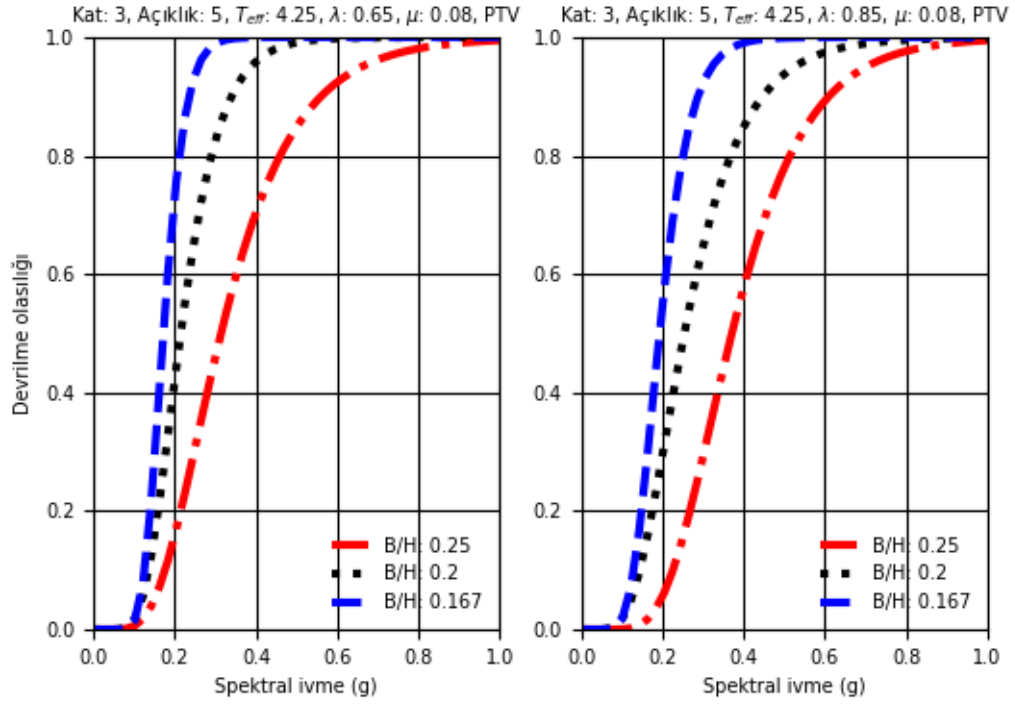
Şekil Ek. 32. 3 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



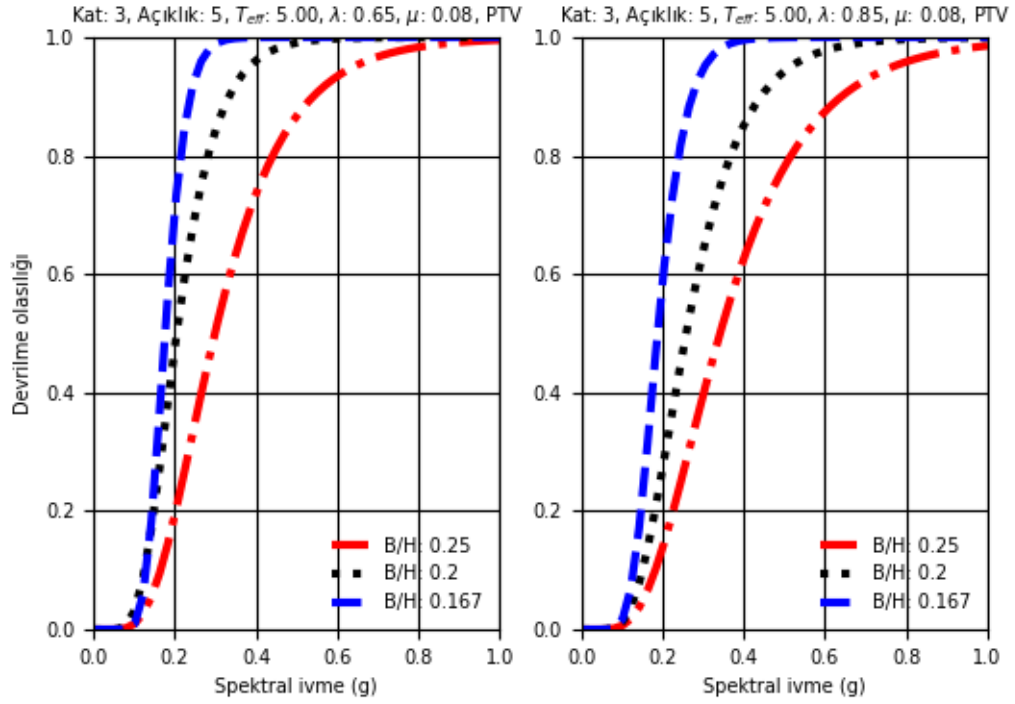
Şekil Ek. 33. 3 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



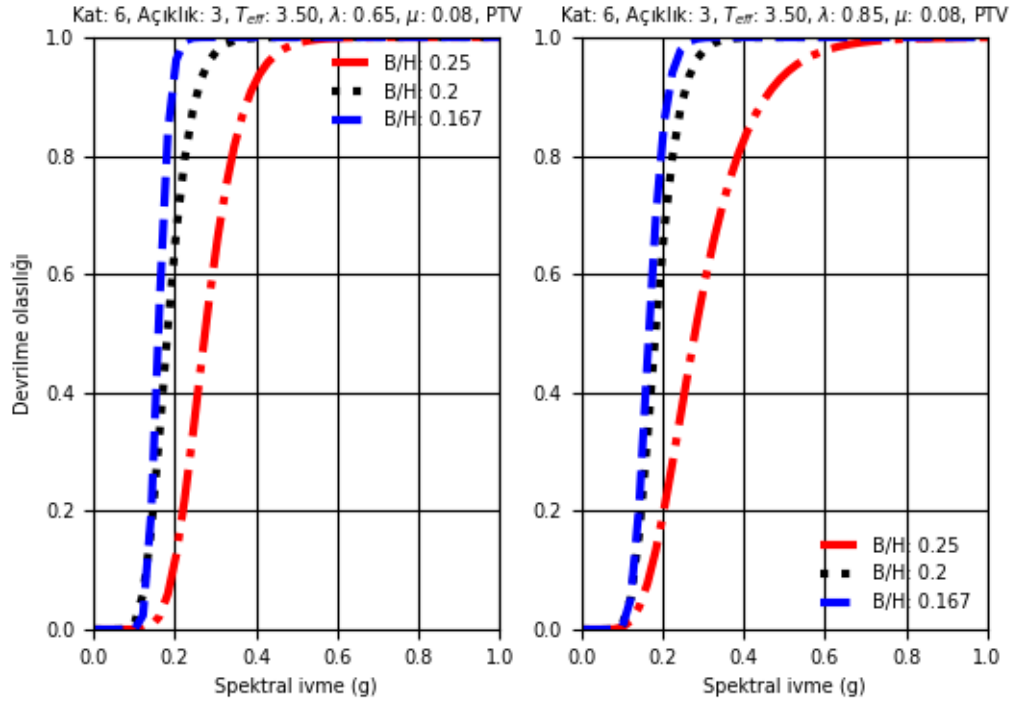
Şekil Ek. 34. 3 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



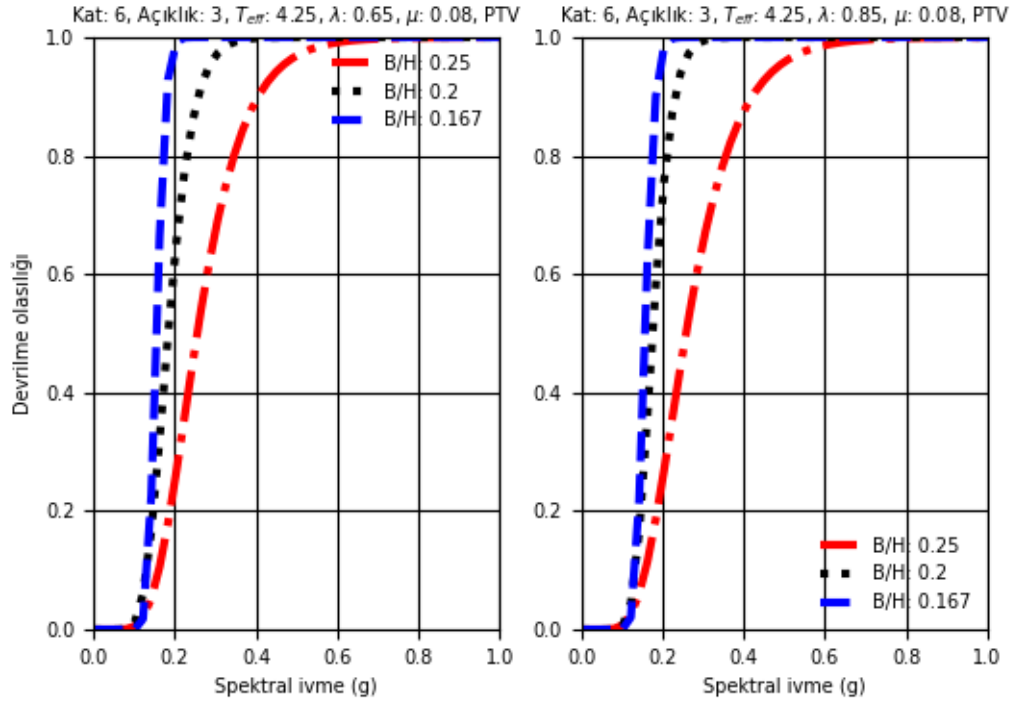
Şekil Ek. 35. 3 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



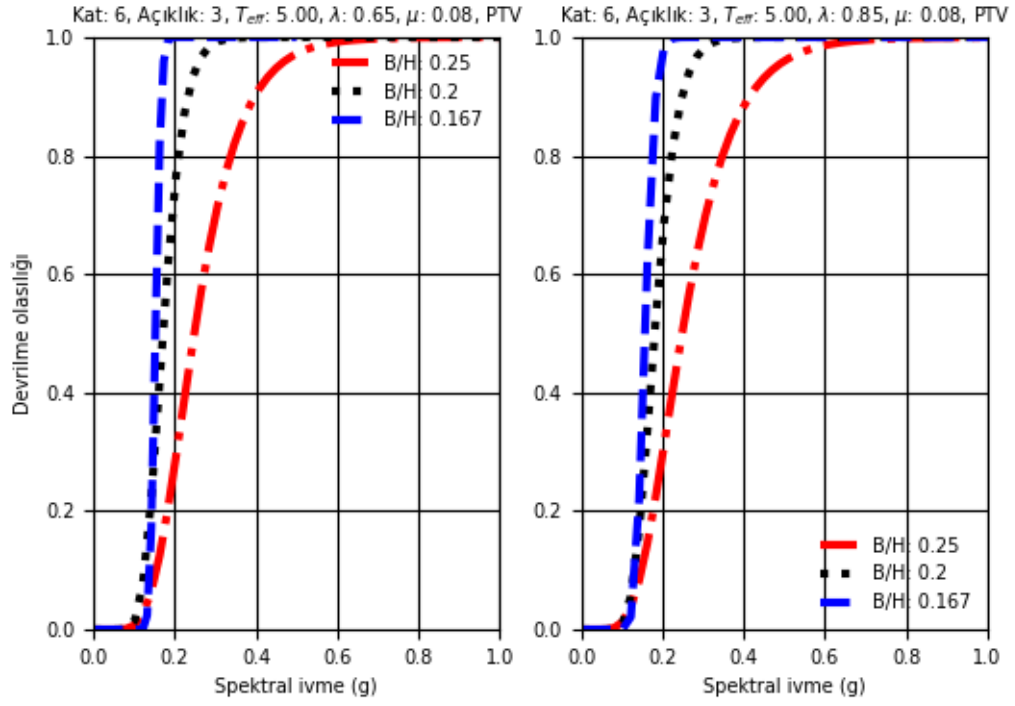
Şekil Ek. 36. 3 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



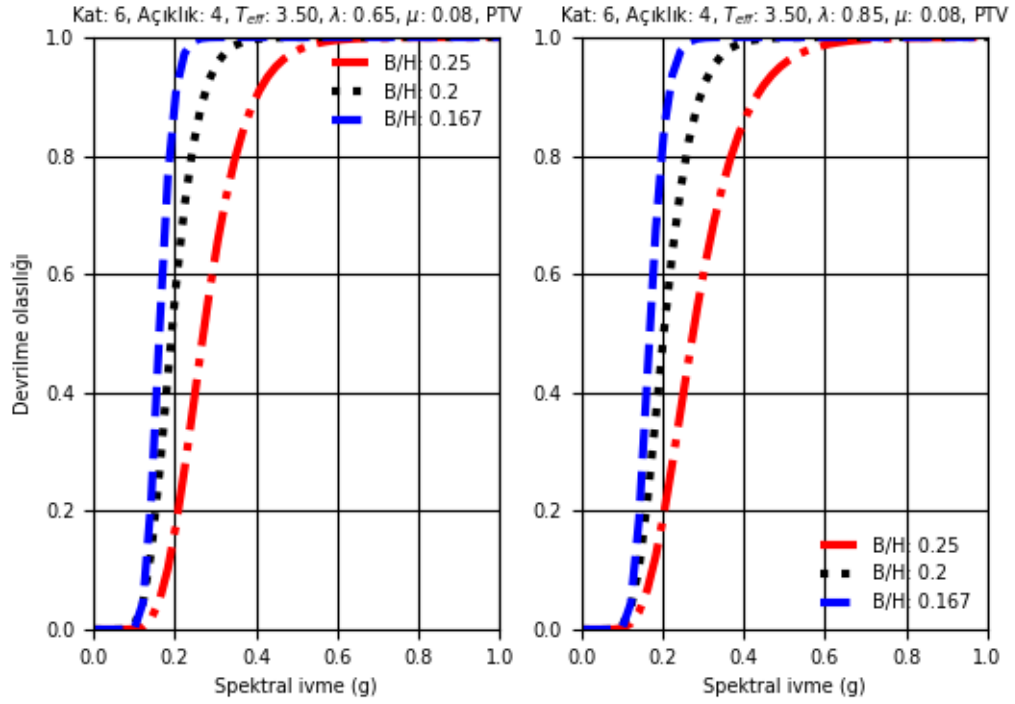
Şekil Ek. 37. 6 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



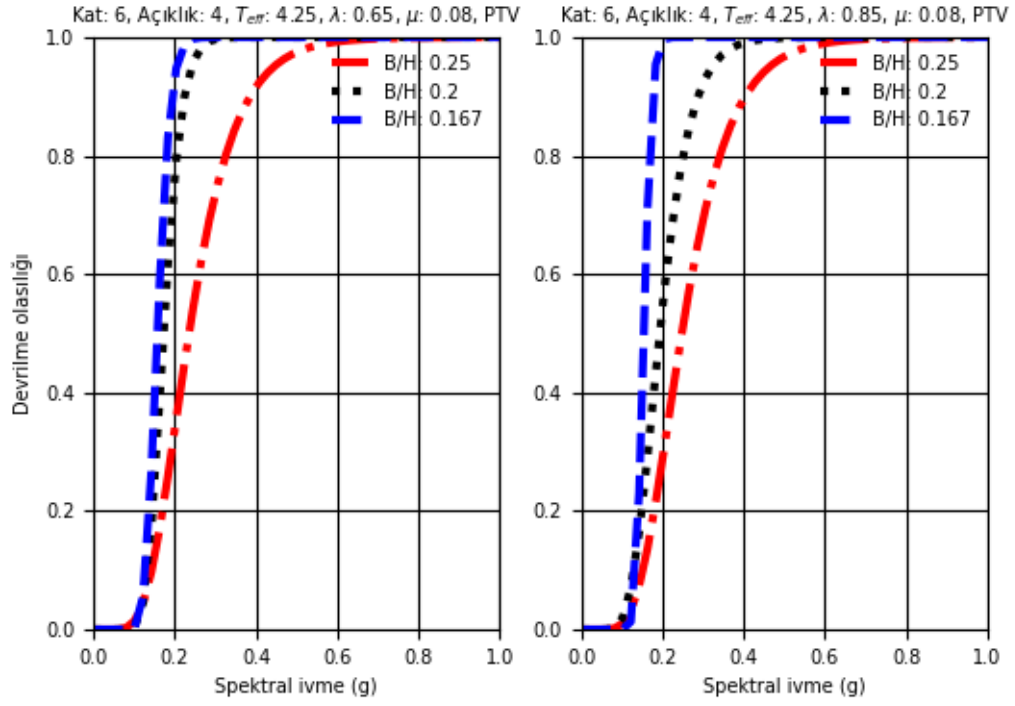
Şekil Ek. 38. 6 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



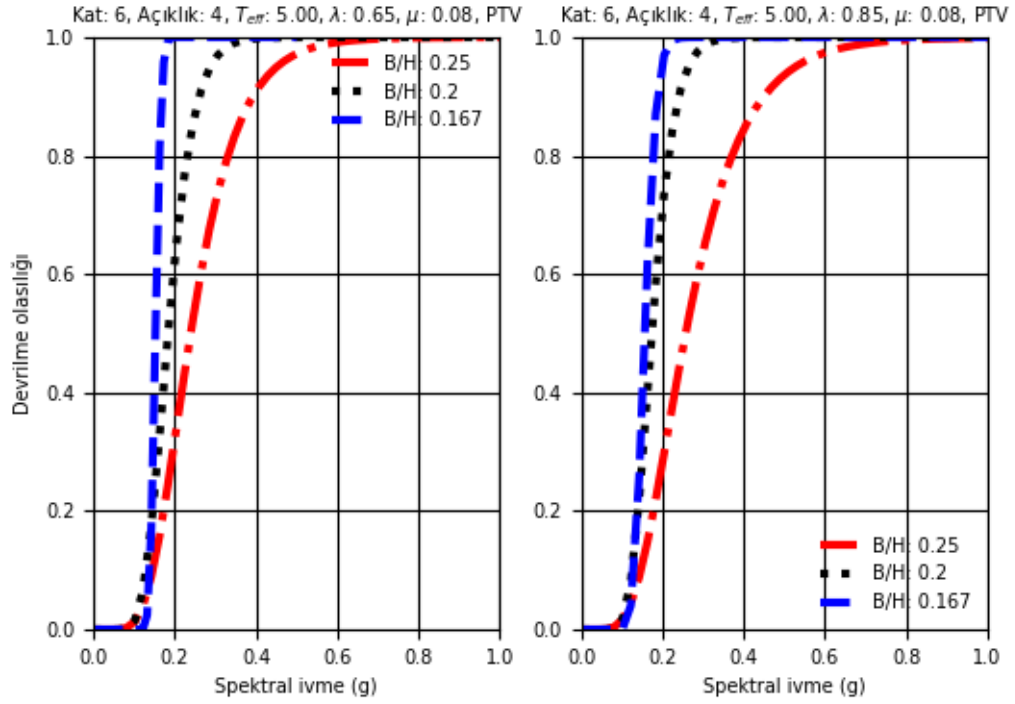
Şekil Ek. 39. 6 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



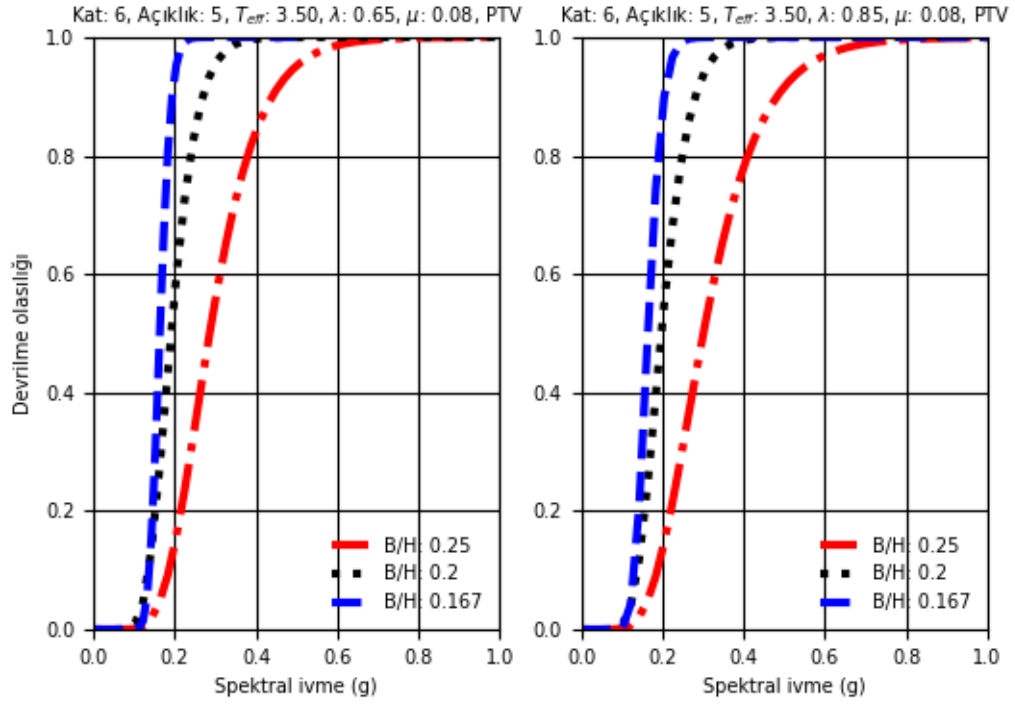
Şekil Ek. 40. 6 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



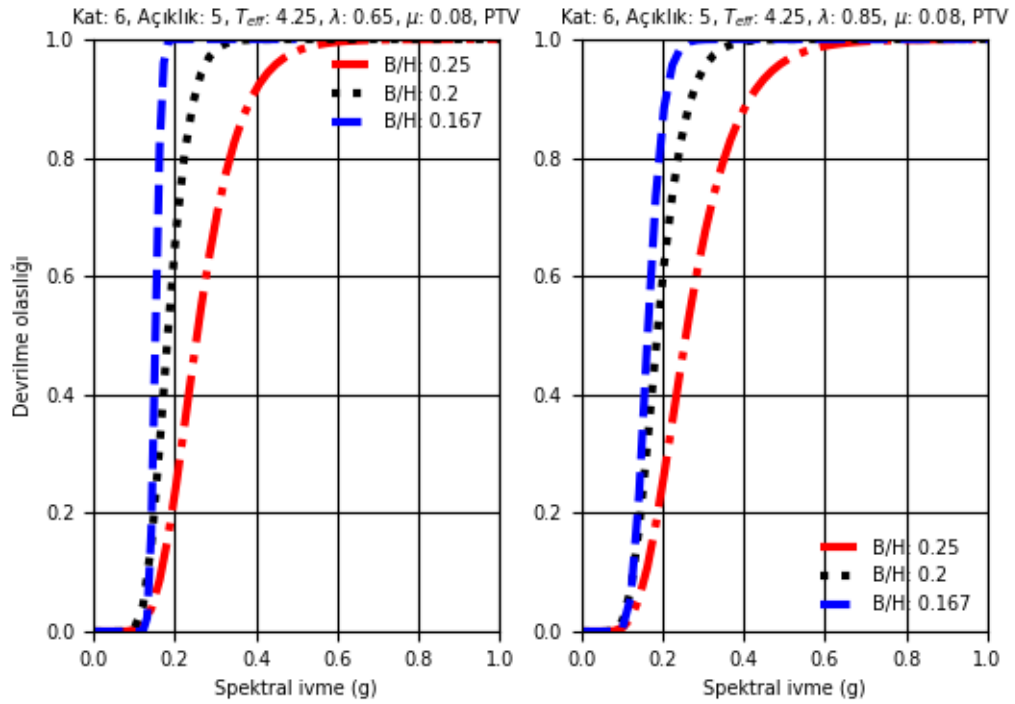
Şekil Ek. 41. 6 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



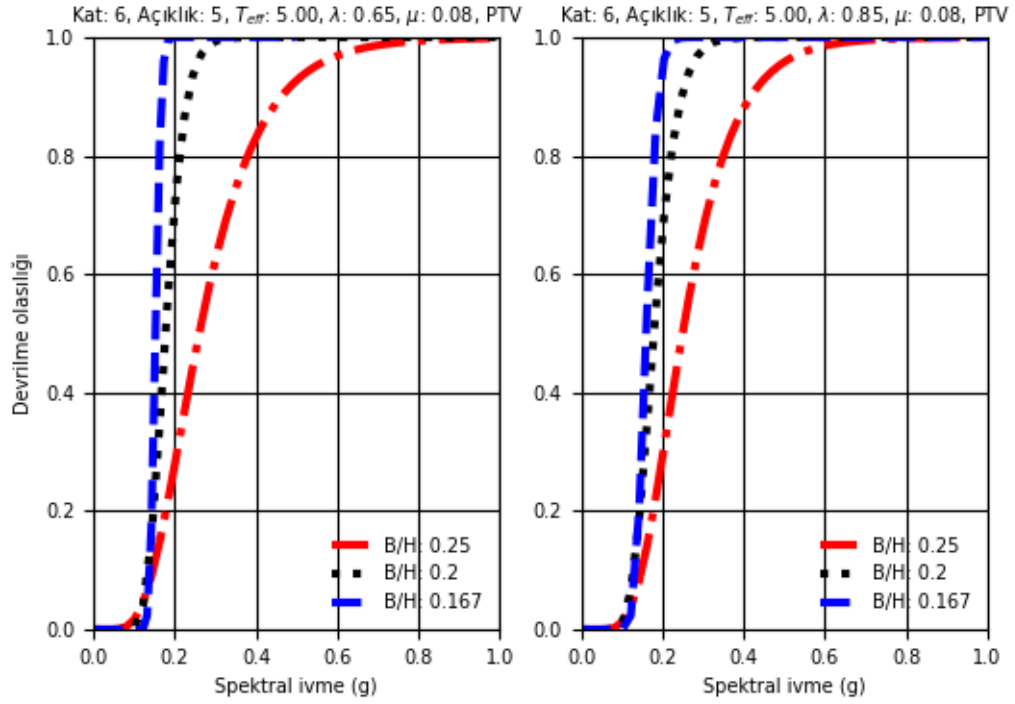
Şekil Ek. 42. 6 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



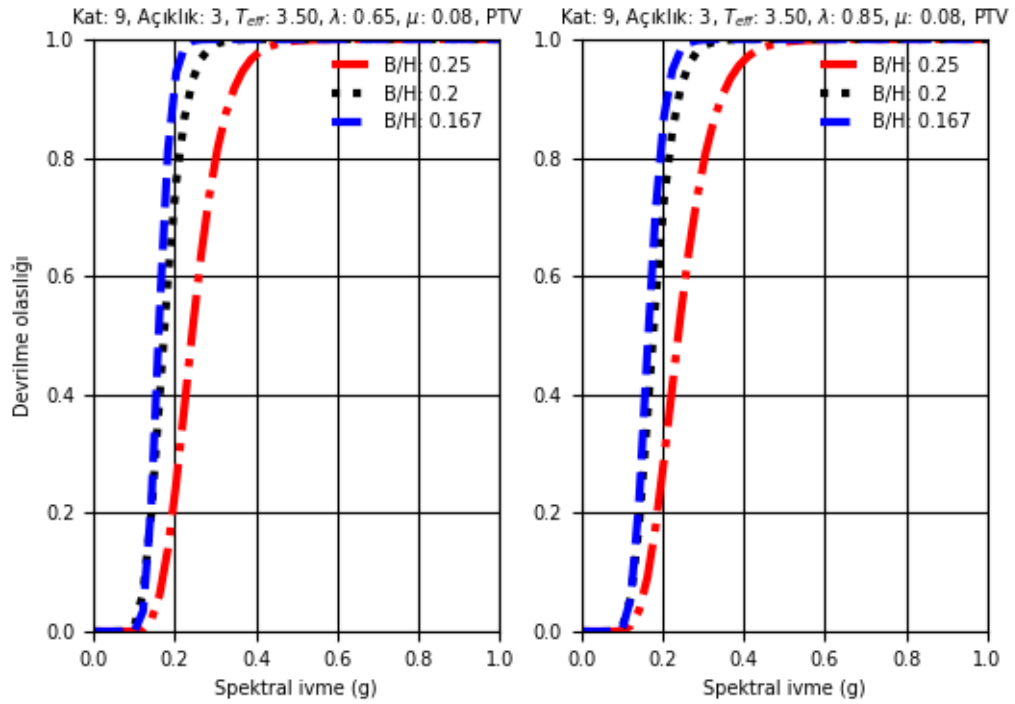
Şekil Ek. 43. 6 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



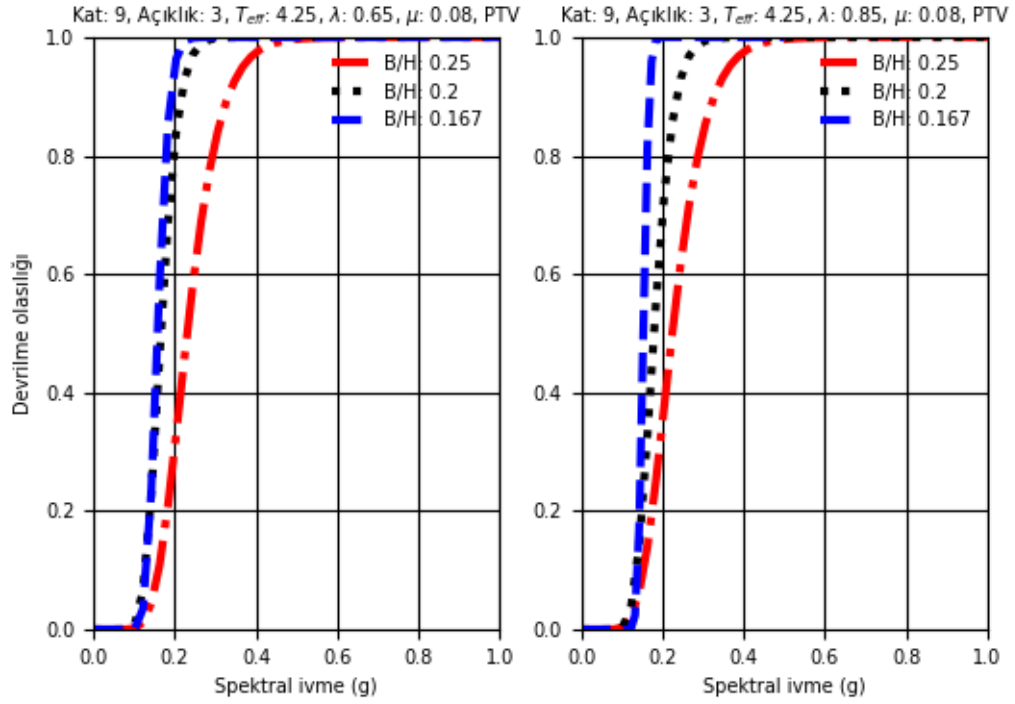
Şekil Ek. 44. 6 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



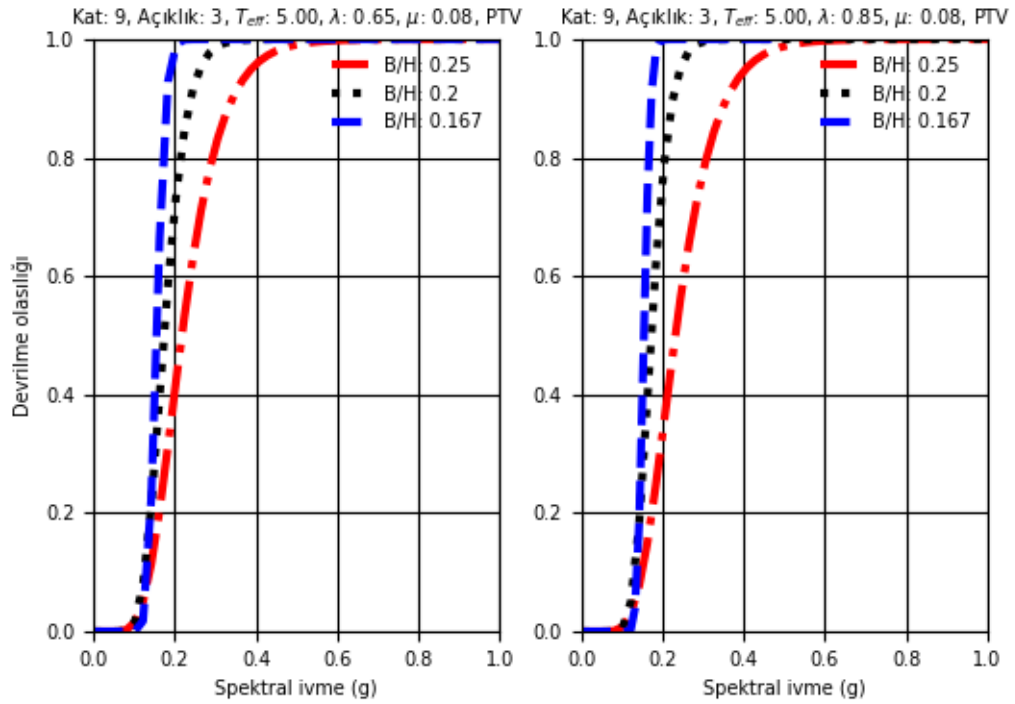
Şekil Ek. 45. 6 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılabilirlik eğrileri



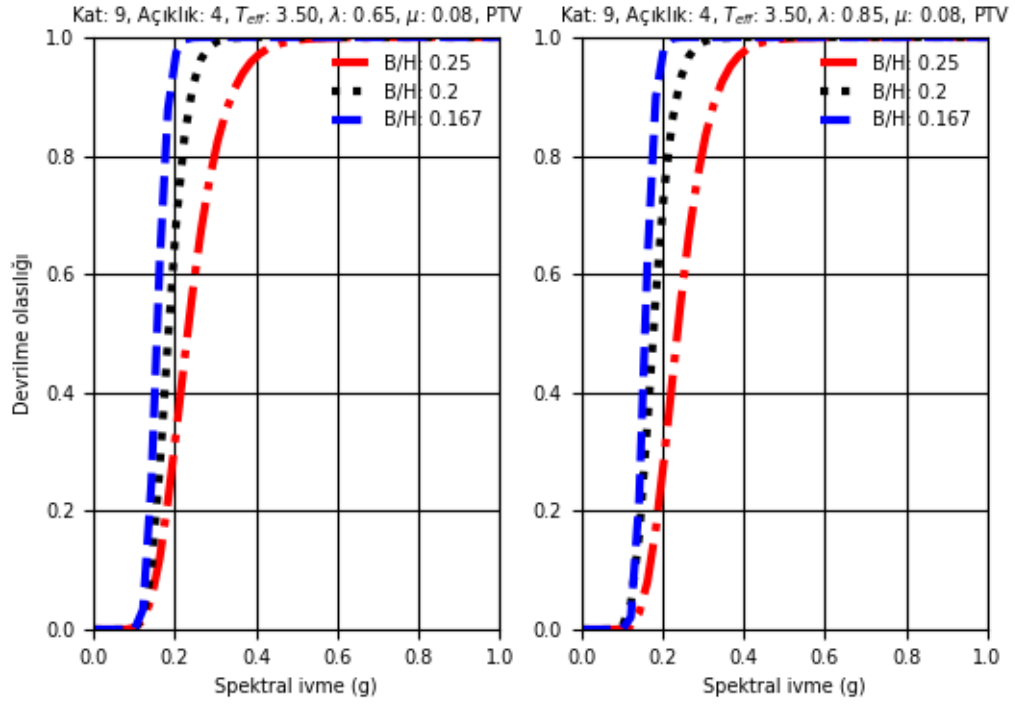
Şekil Ek. 46. 9 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılabilirlik eğrileri



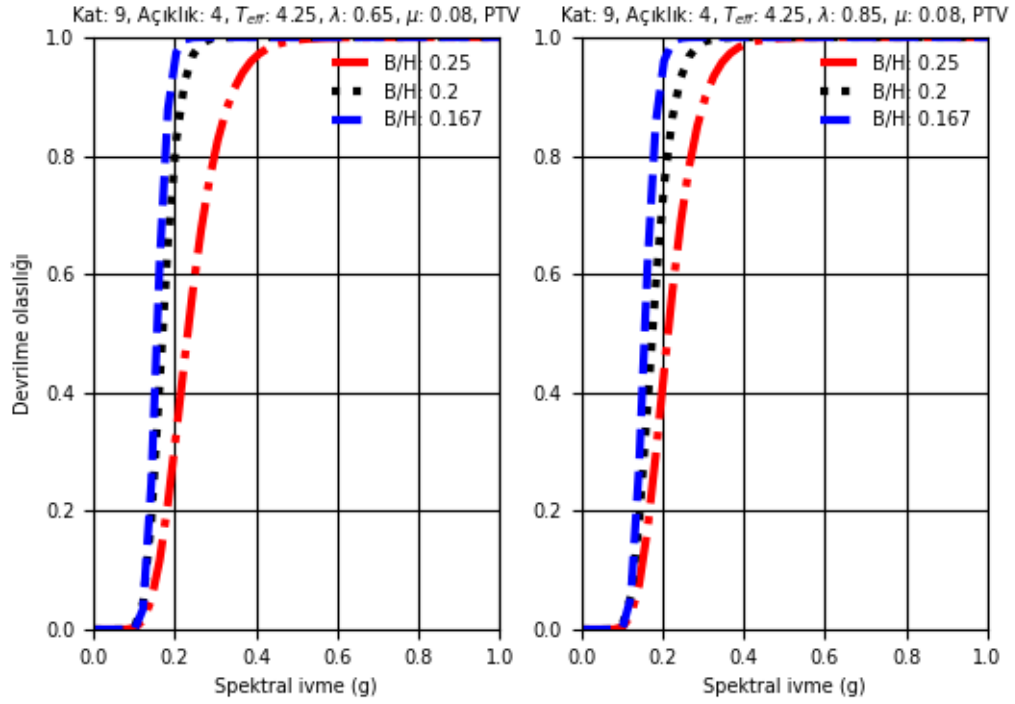
Şekil Ek. 47. 9 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



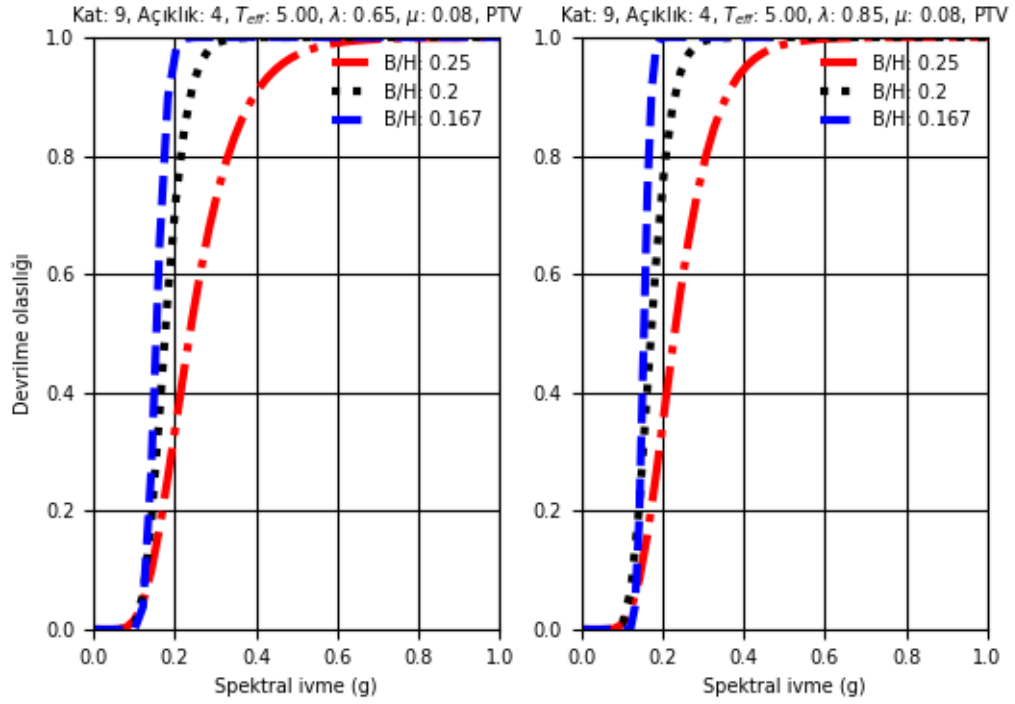
Şekil Ek. 48. 9 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



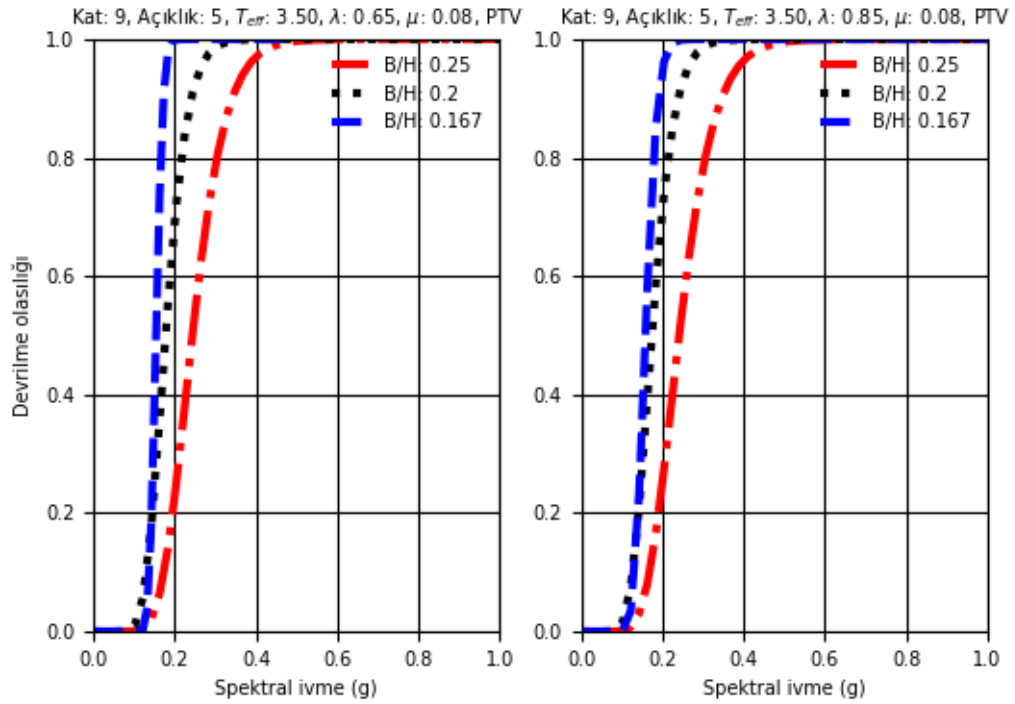
Şekil Ek. 49. 9 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



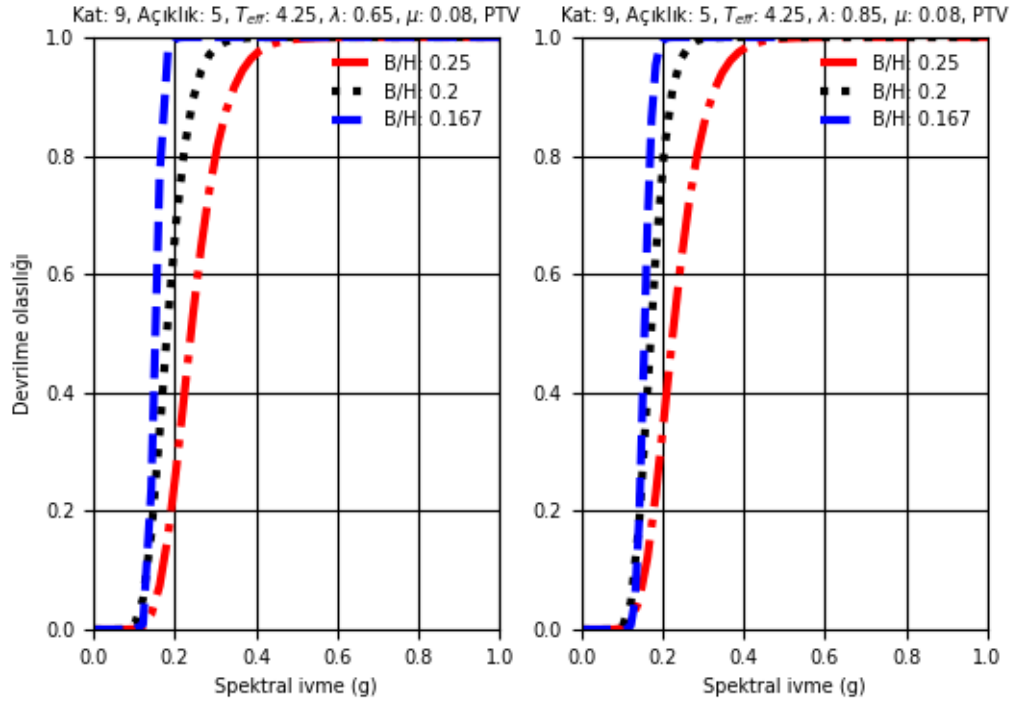
Şekil Ek. 50. 9 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



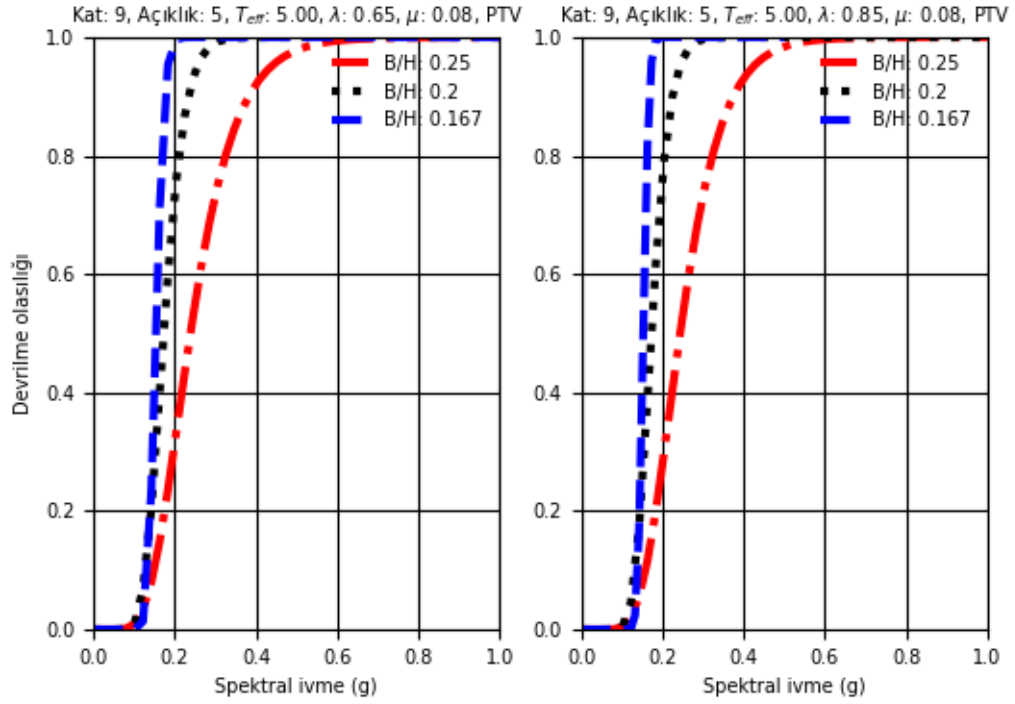
Şekil Ek. 51. 9 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



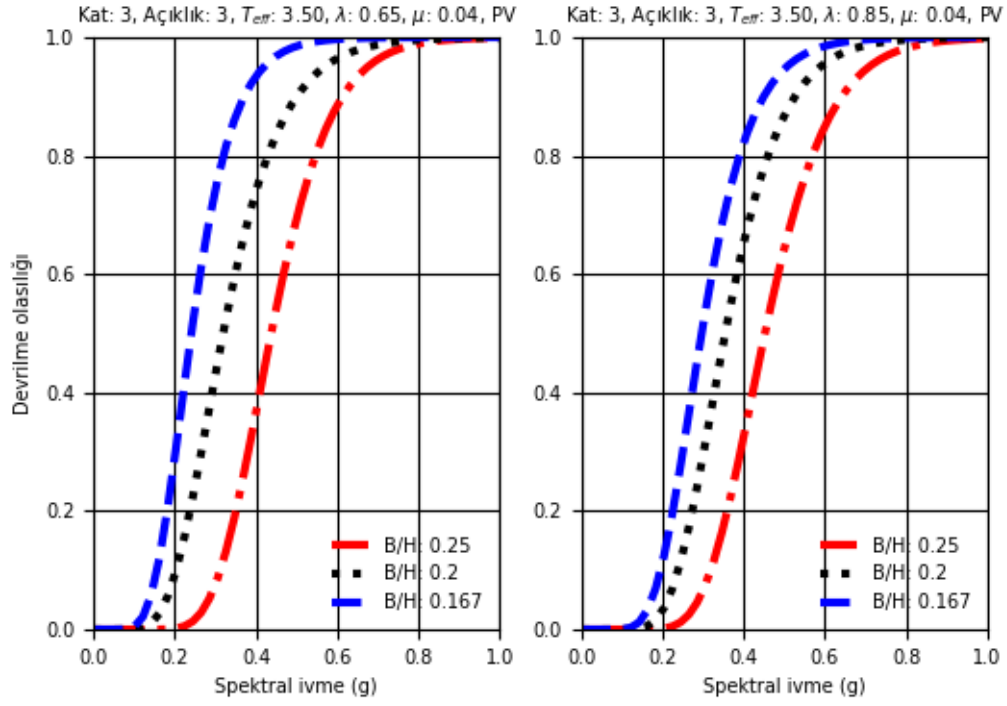
Şekil Ek. 52. 9 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



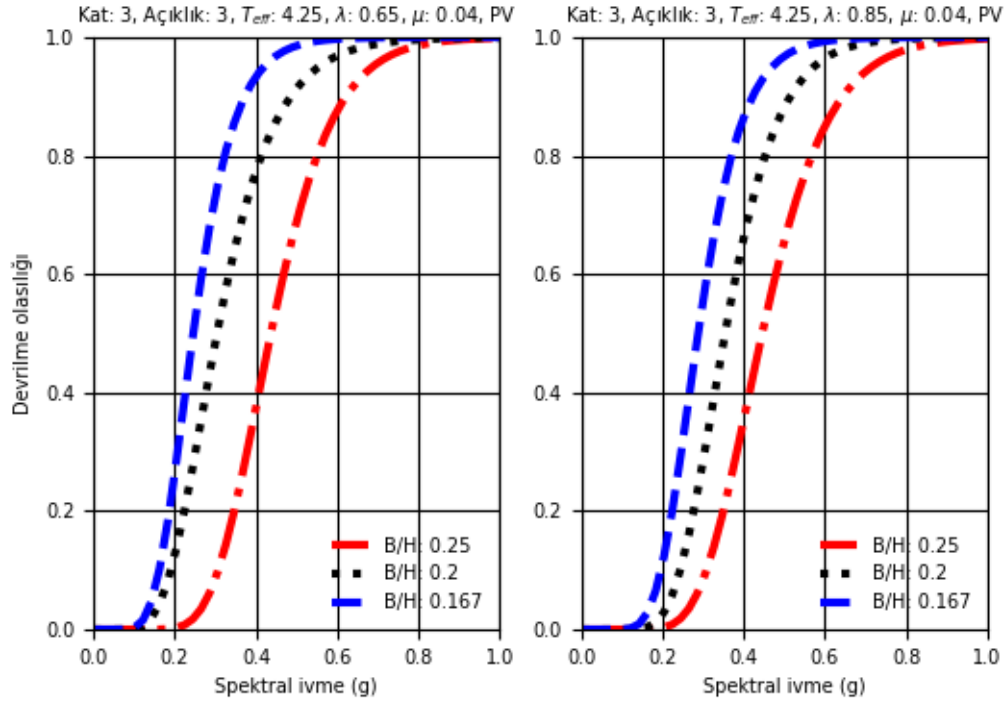
Şekil Ek. 53. 9 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



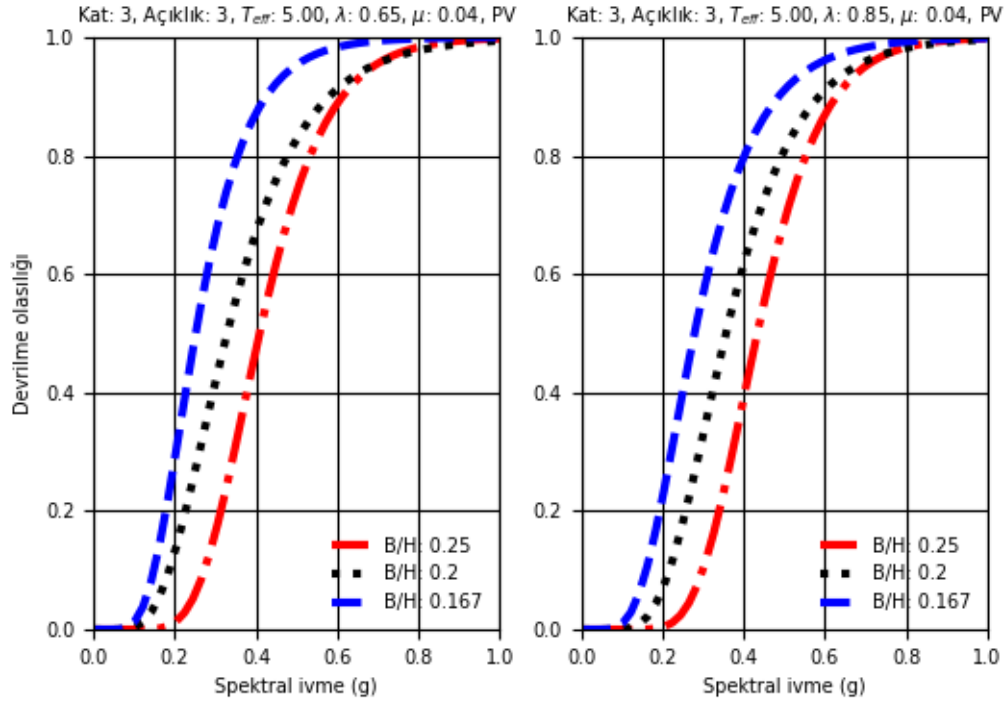
Şekil Ek. 54. 9 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PTV modele ait kırılma eğrileri



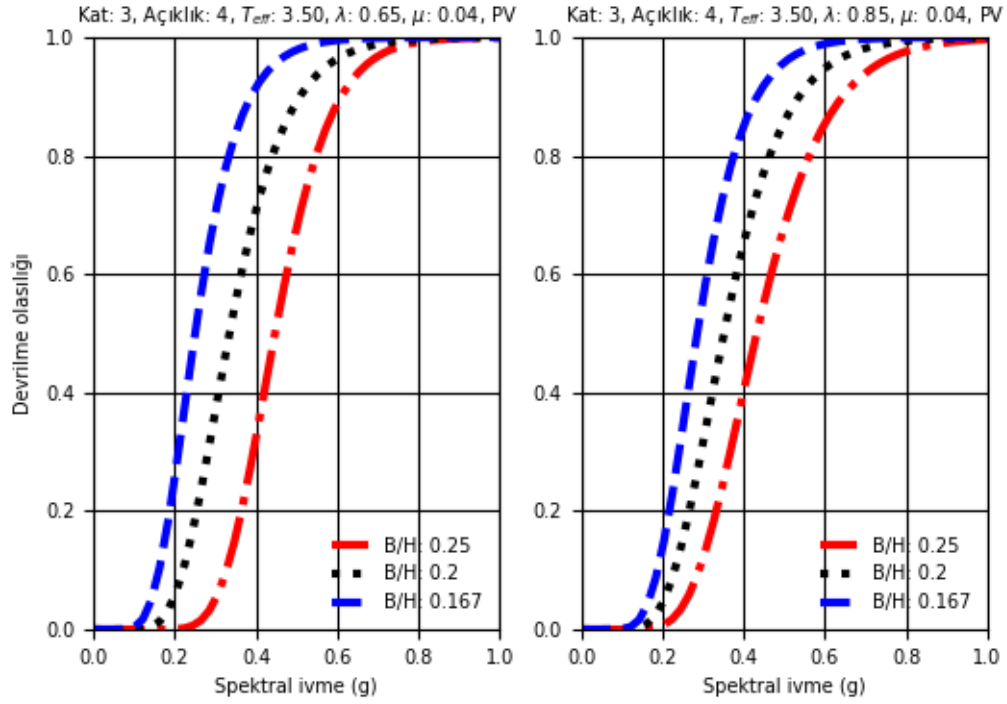
Şekil Ek. 55. 3 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sirtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



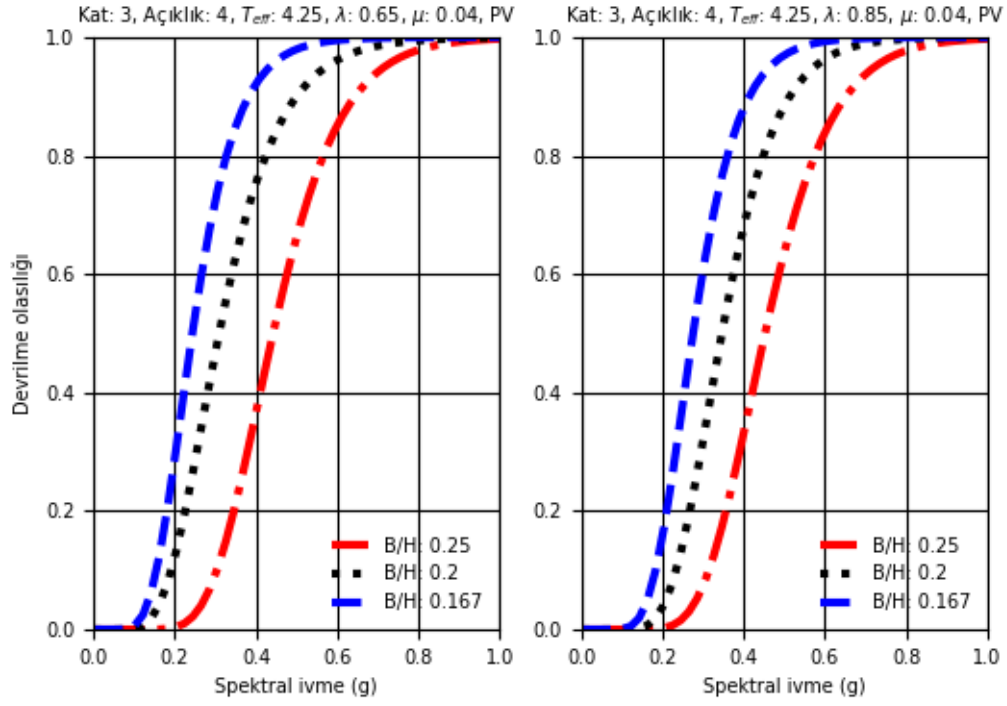
Şekil Ek. 56. 3 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sirtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



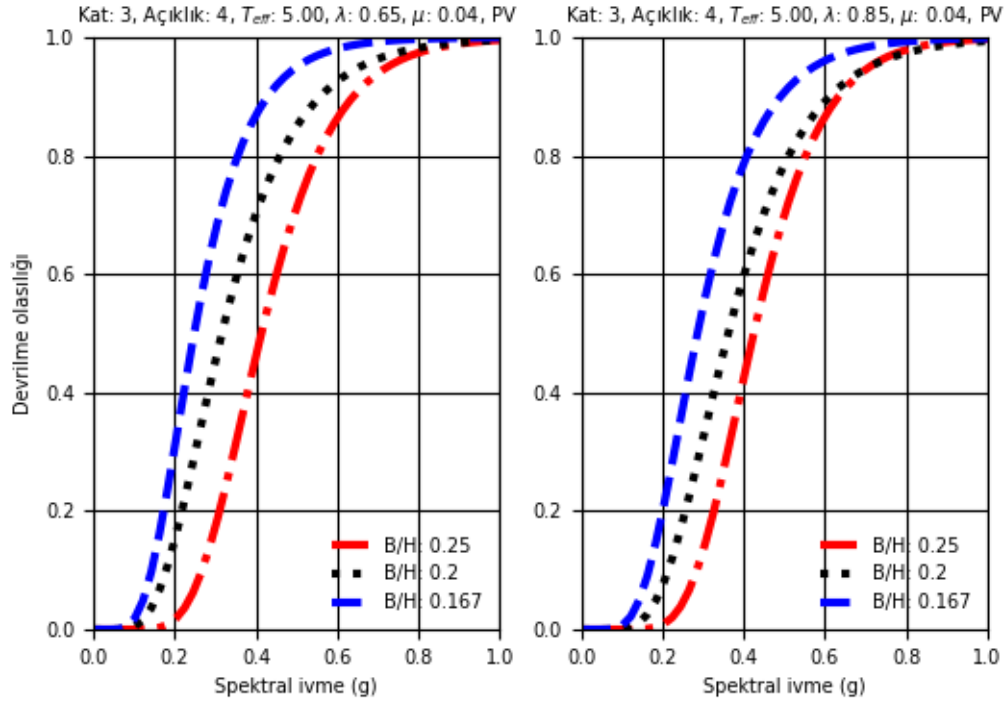
Şekil Ek. 57. 3 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



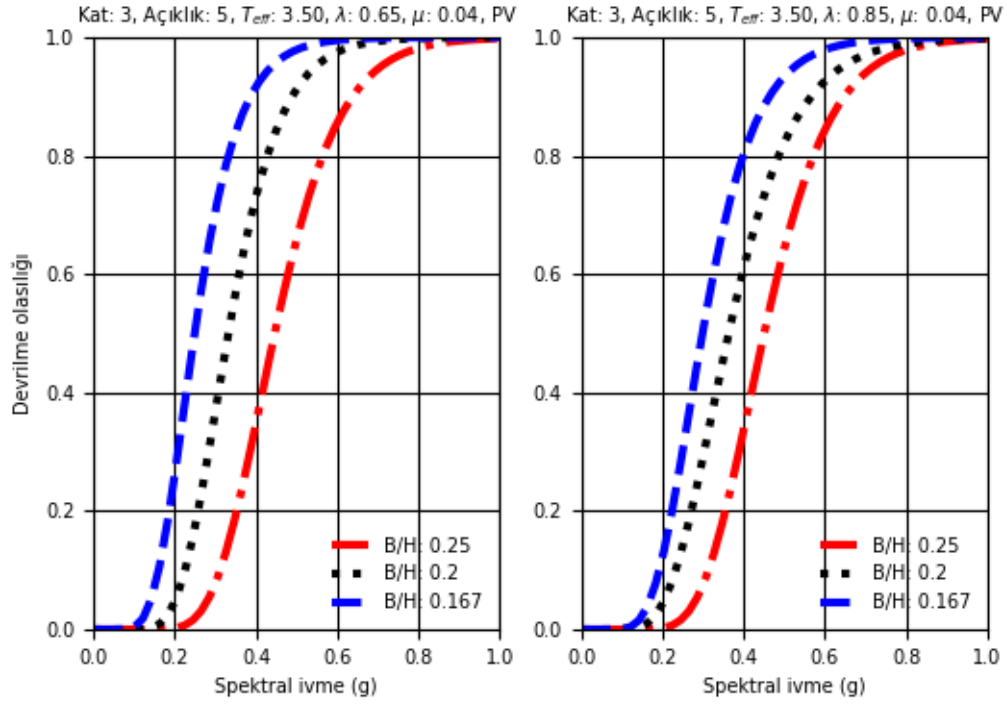
Şekil Ek. 58. 3 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



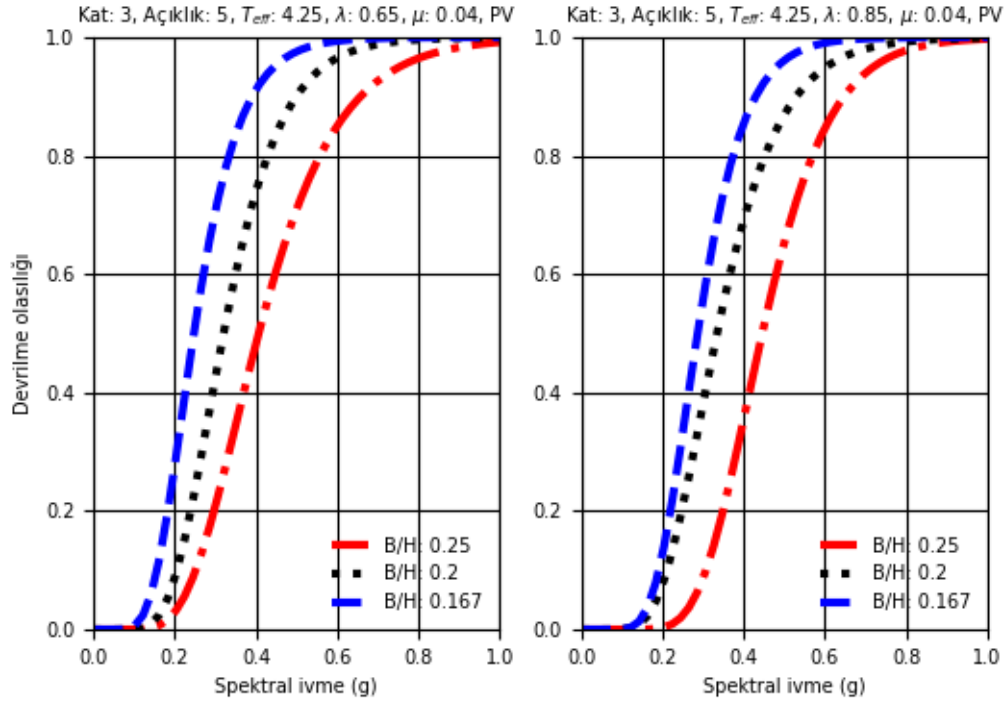
Şekil Ek. 59. 3 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



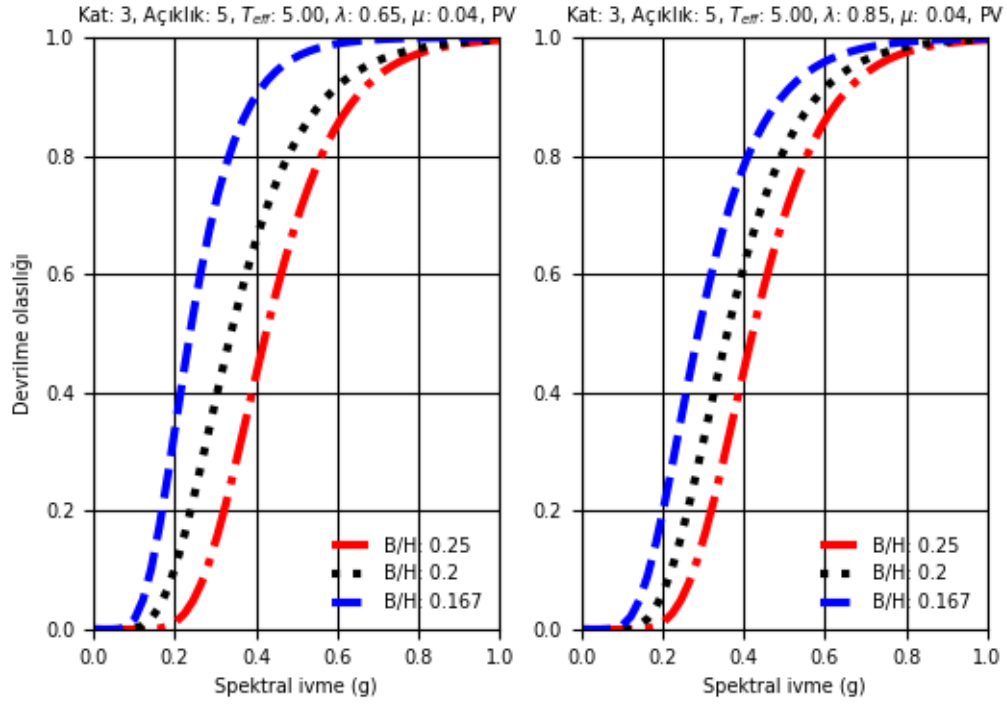
Şekil Ek. 60. 3 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sönümleme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



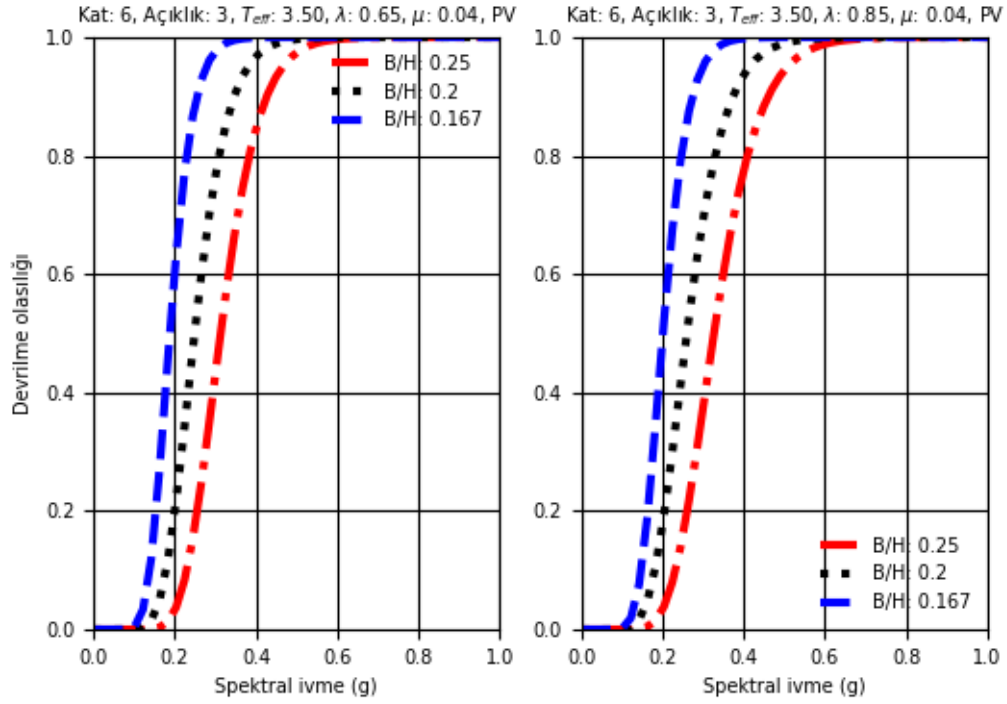
Şekil Ek. 61. 3 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sirtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



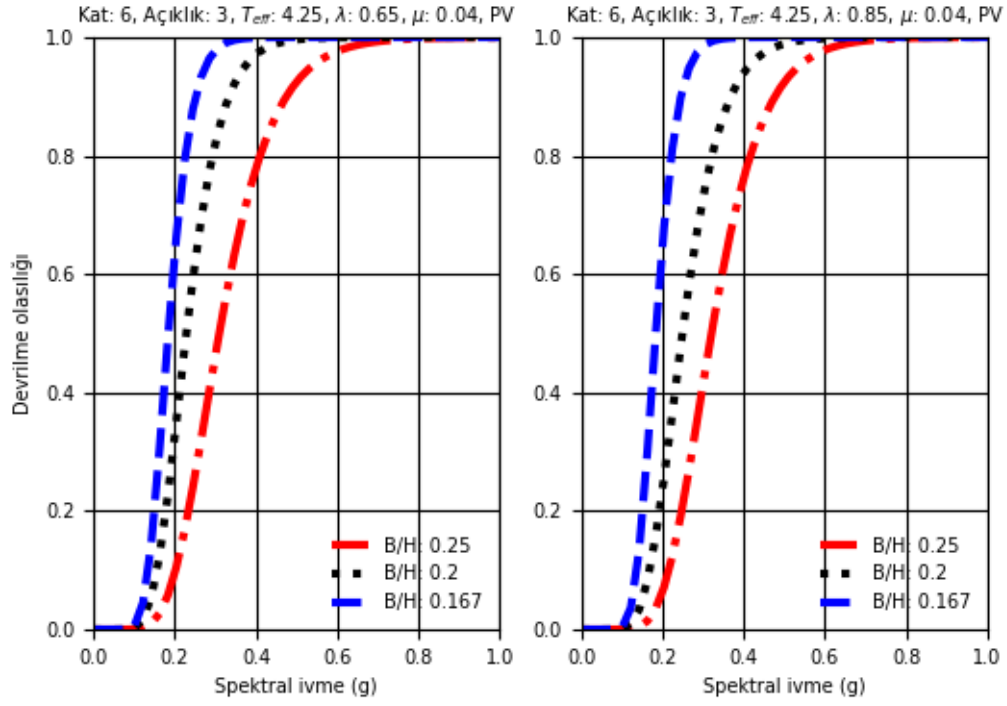
Şekil Ek. 62. 3 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sirtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



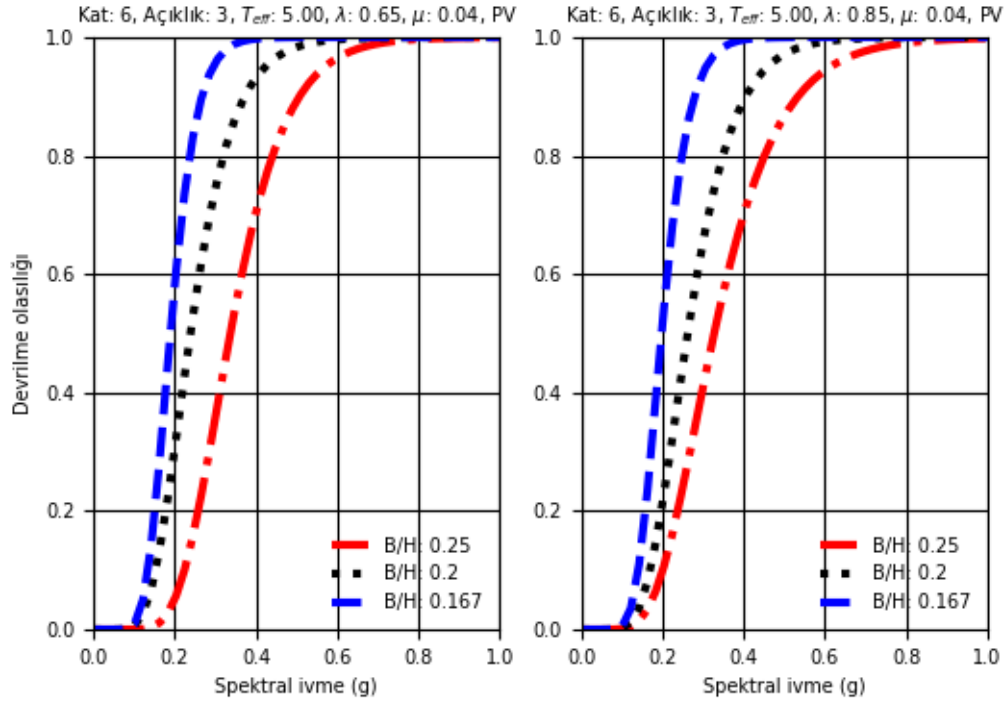
Şekil Ek. 63. 3 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



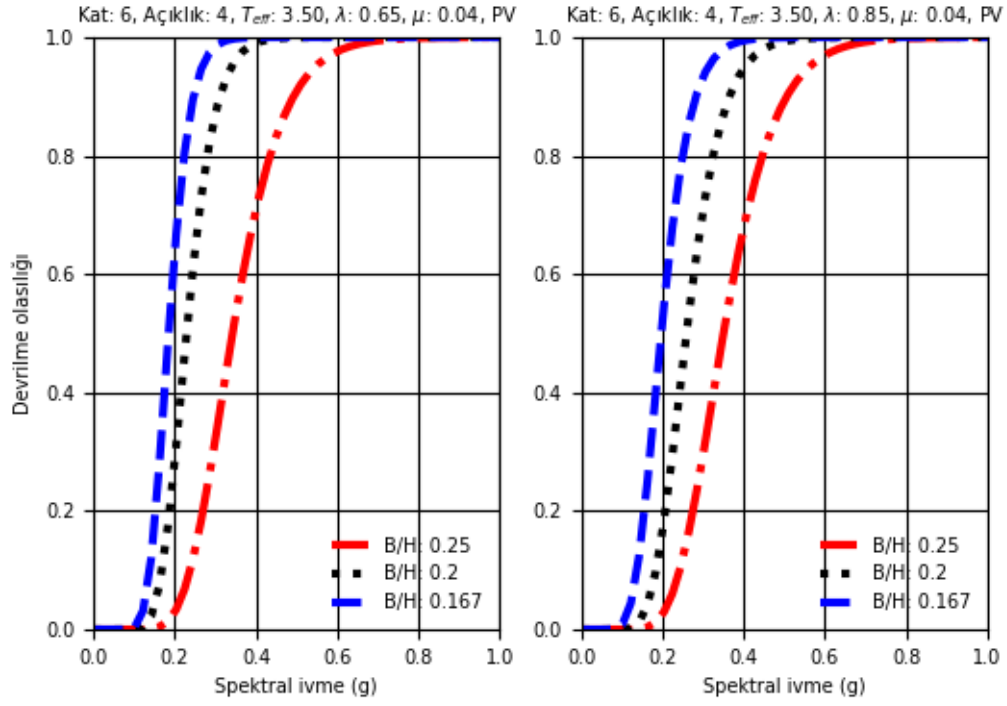
Şekil Ek. 64. 6 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



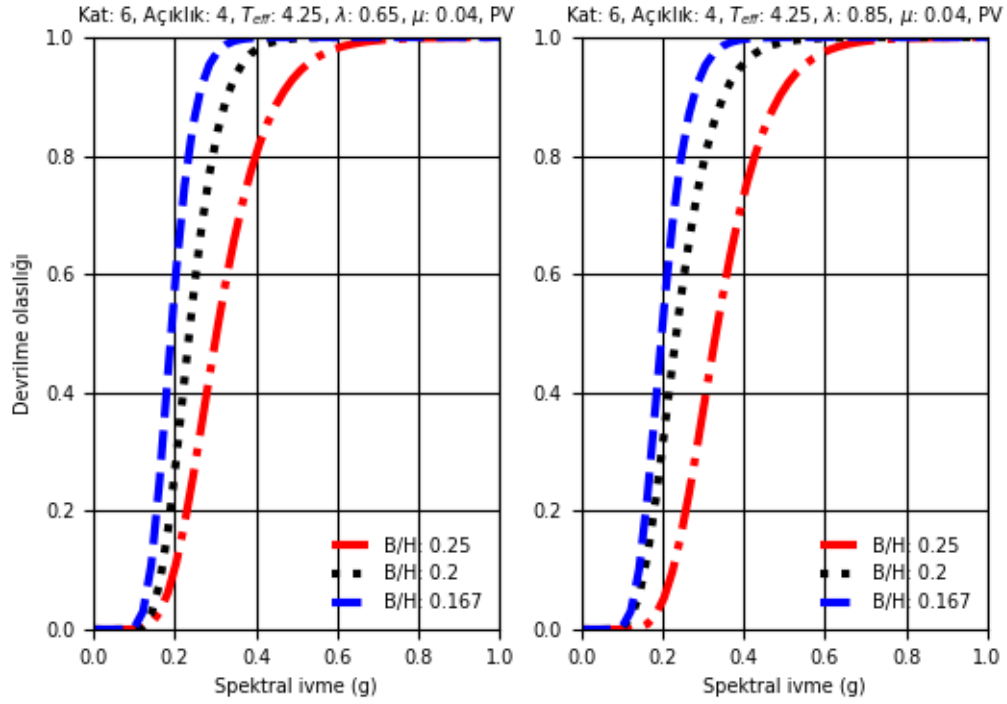
Şekil Ek. 65. 6 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



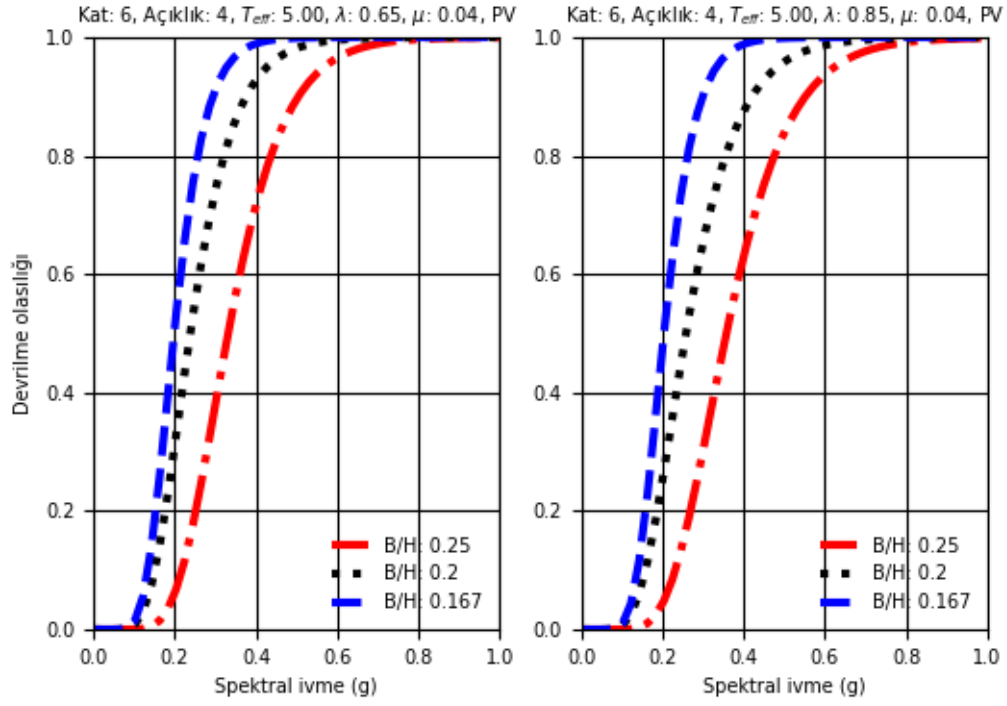
Şekil Ek. 66. 6 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



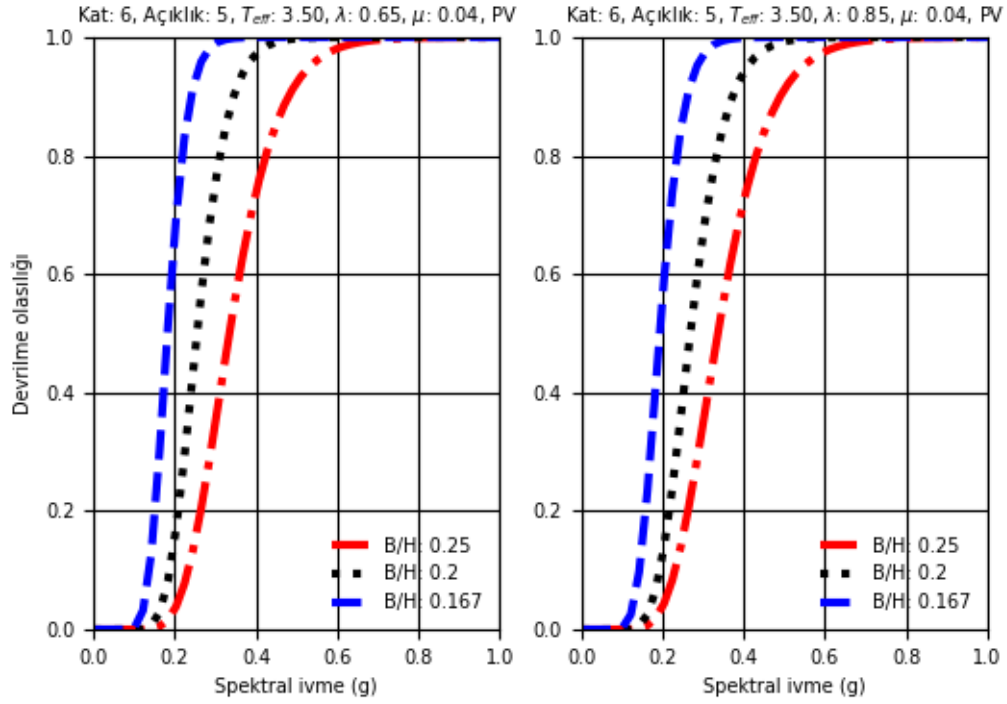
Şekil Ek. 67. 6 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



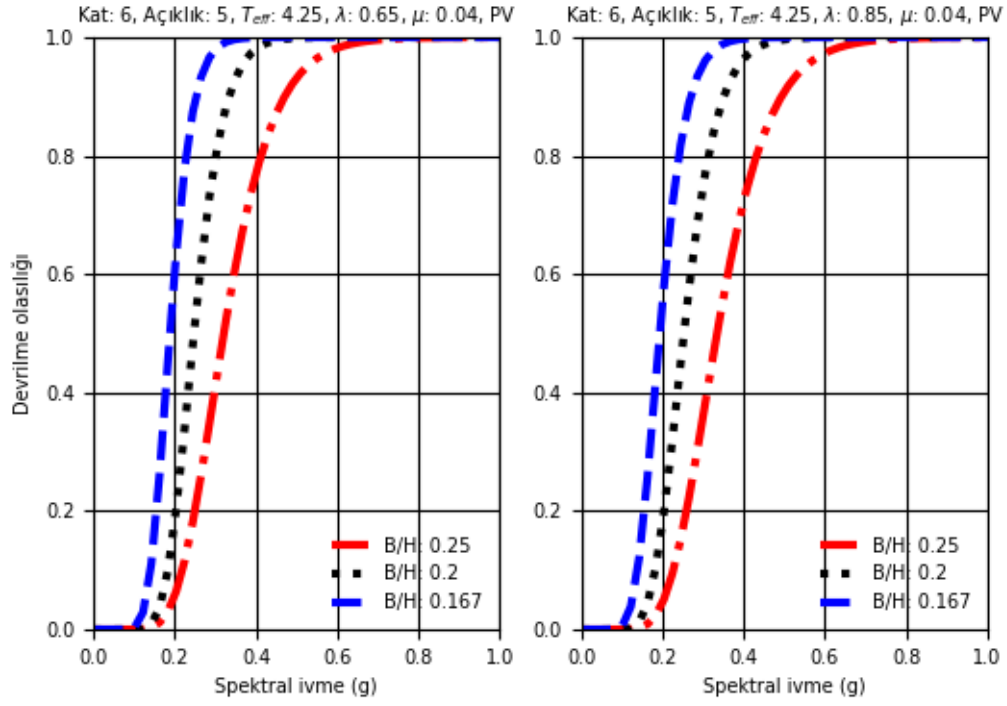
Şekil Ek. 68. 6 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



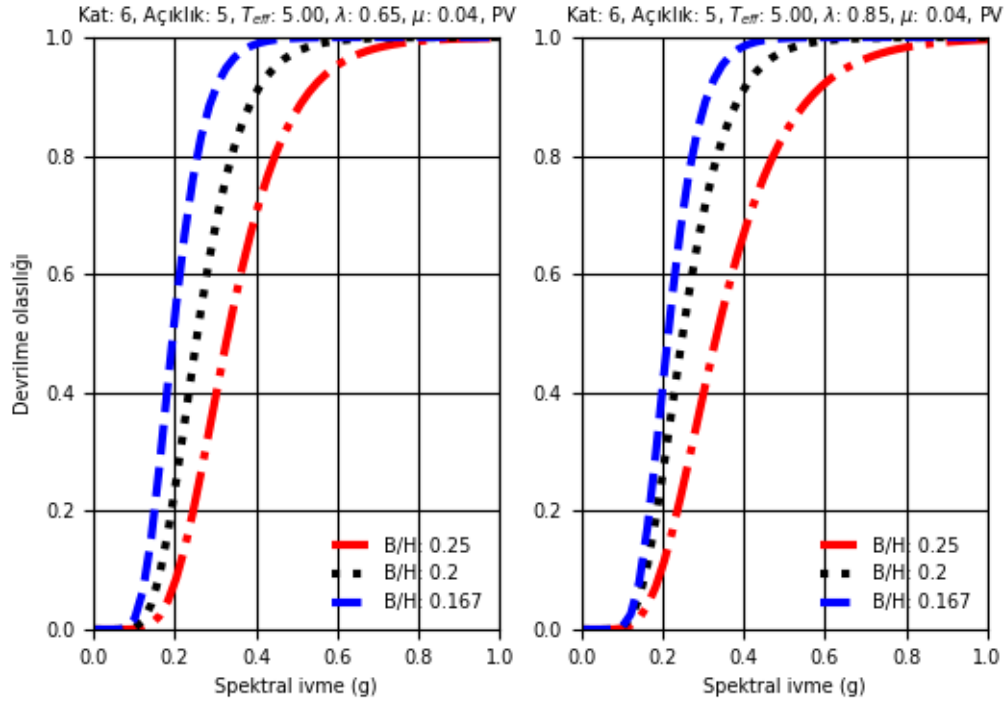
Şekil Ek. 69. 6 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



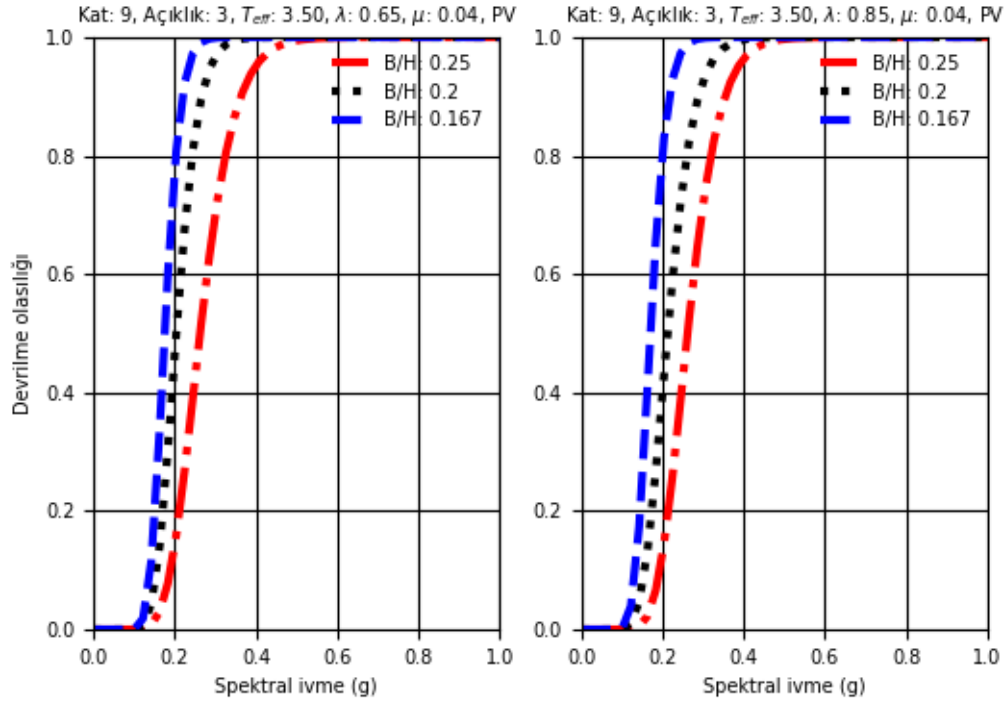
Şekil Ek. 70. 6 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



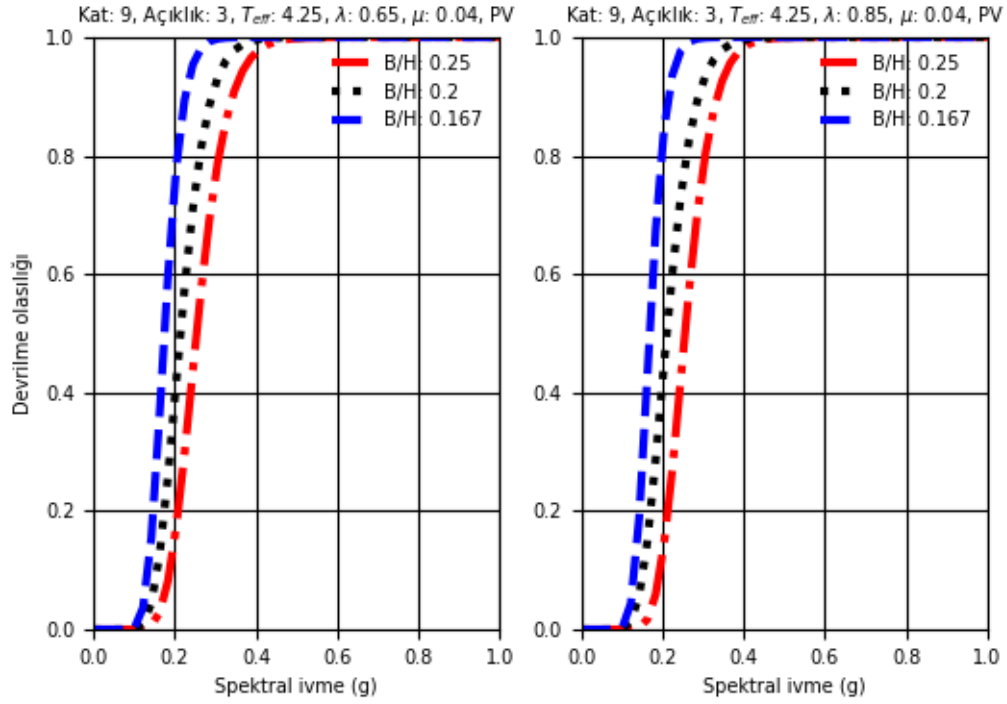
Şekil Ek. 71. 6 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



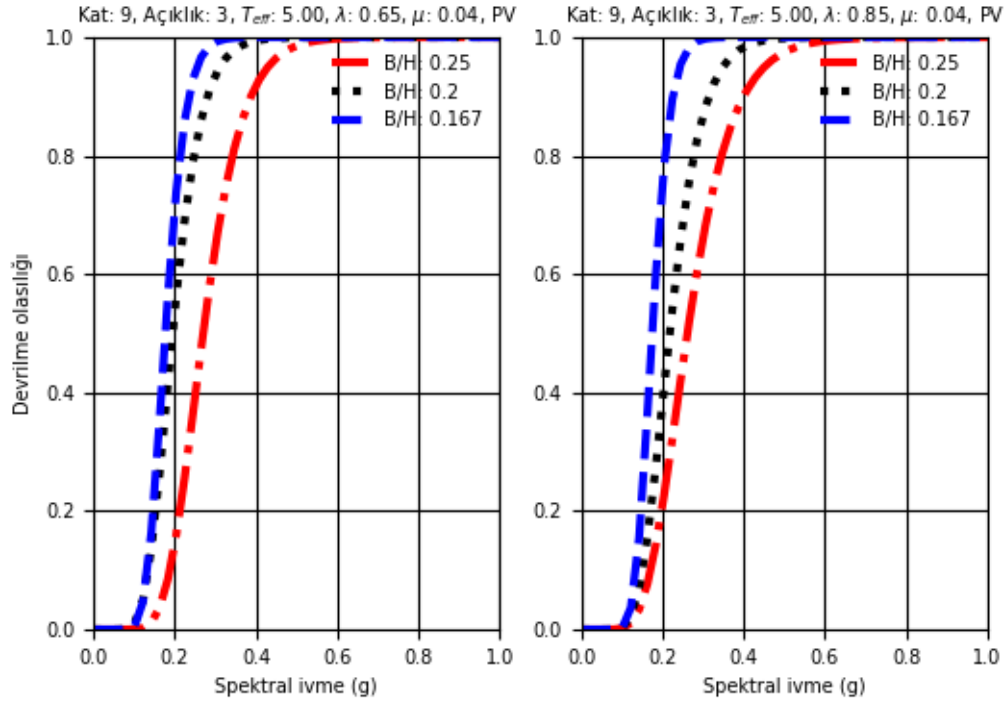
Şekil Ek. 72. 6 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



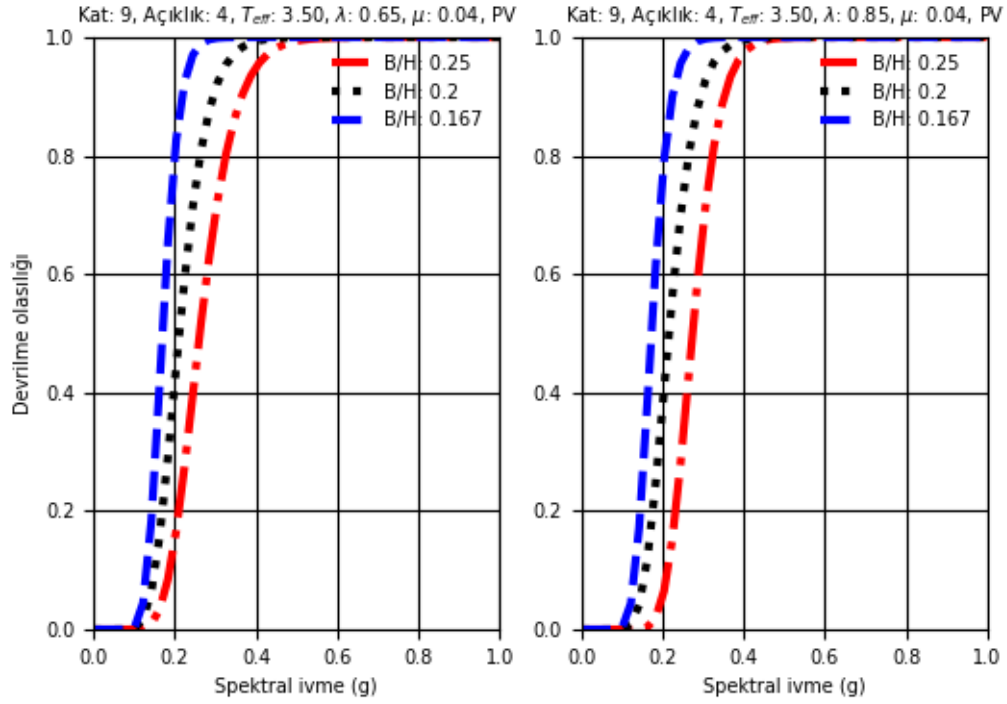
Şekil Ek. 73. 9 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



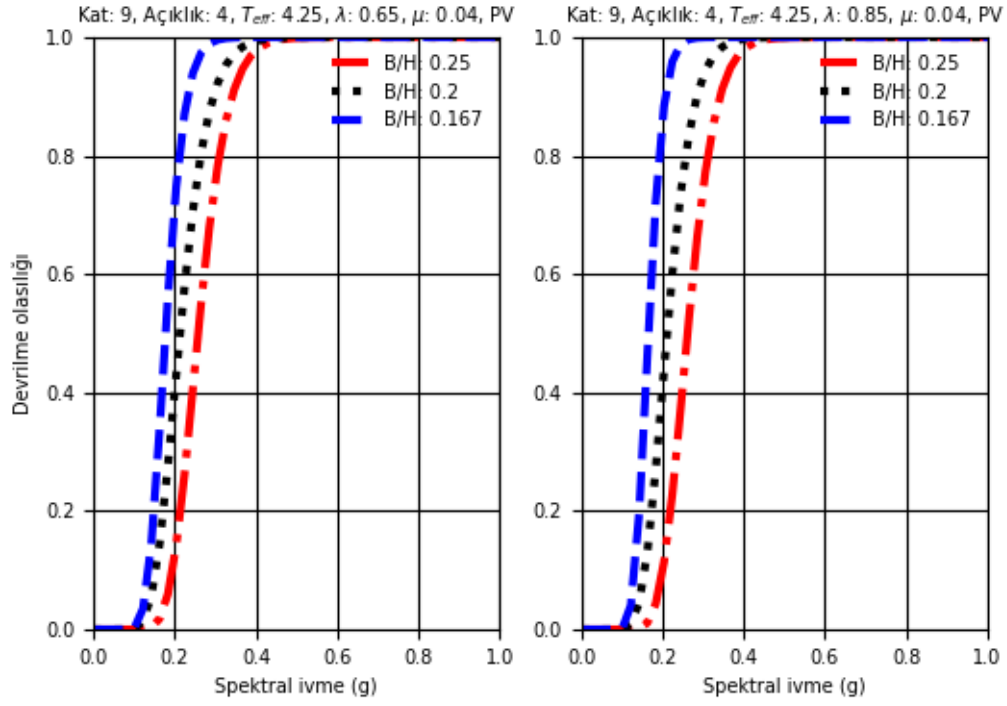
Şekil Ek. 74. 9 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



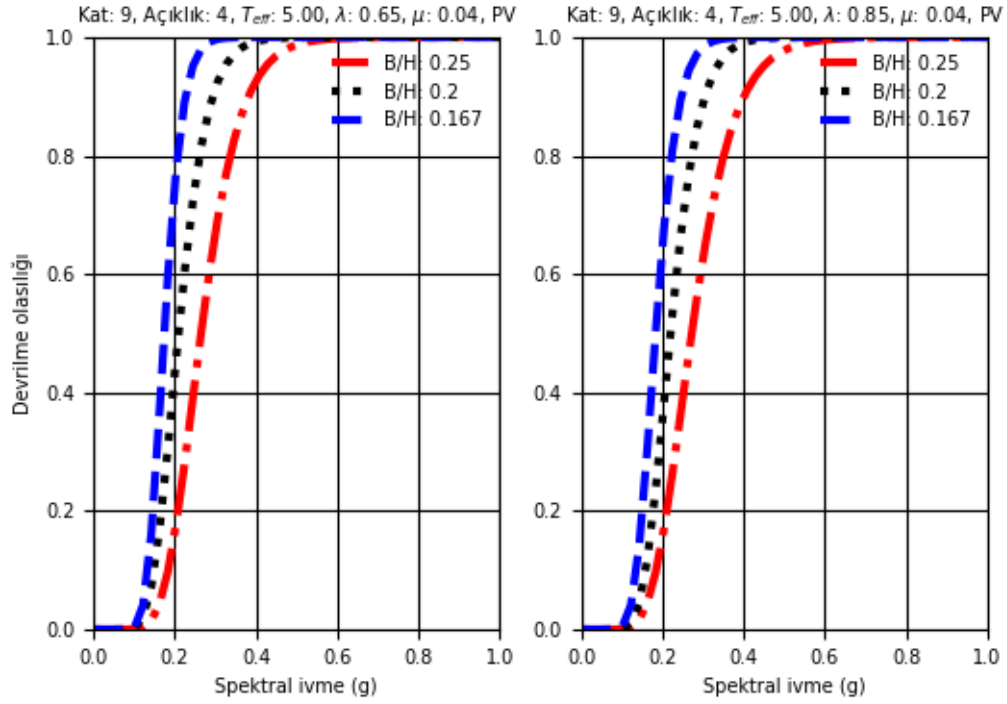
Şekil Ek. 75. 9 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



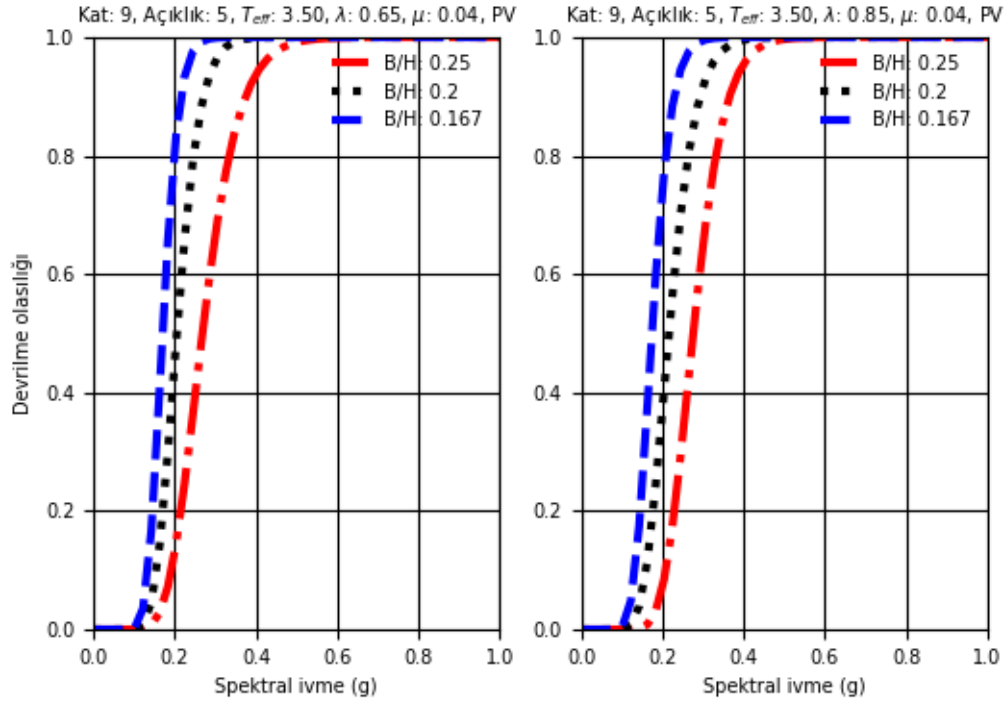
Şekil Ek. 76. 9 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



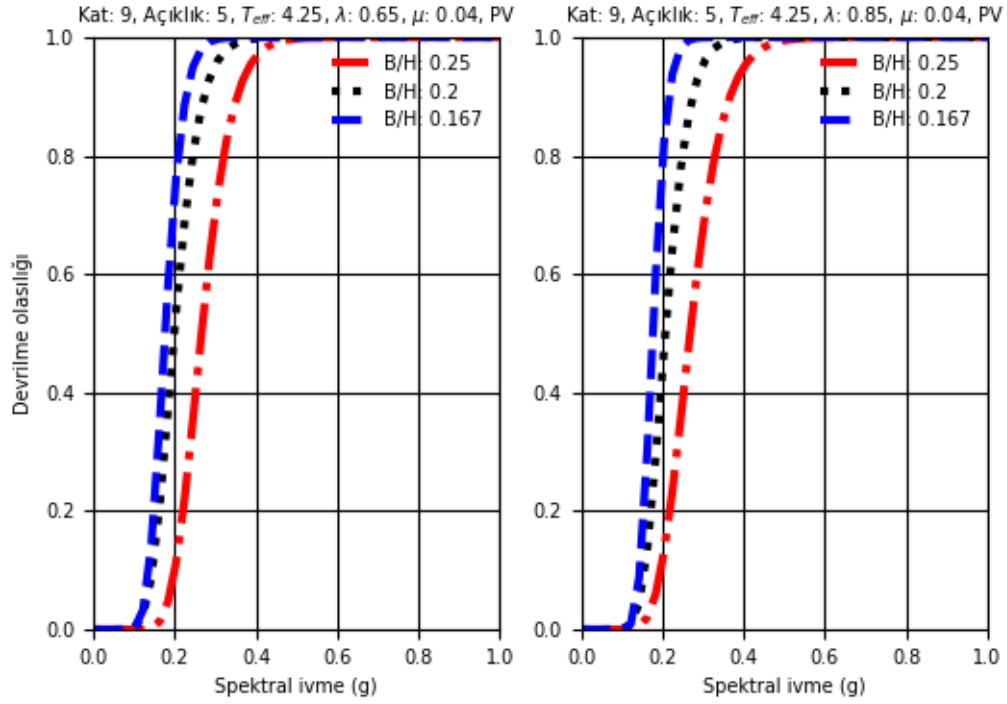
Şekil Ek. 77. 9 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



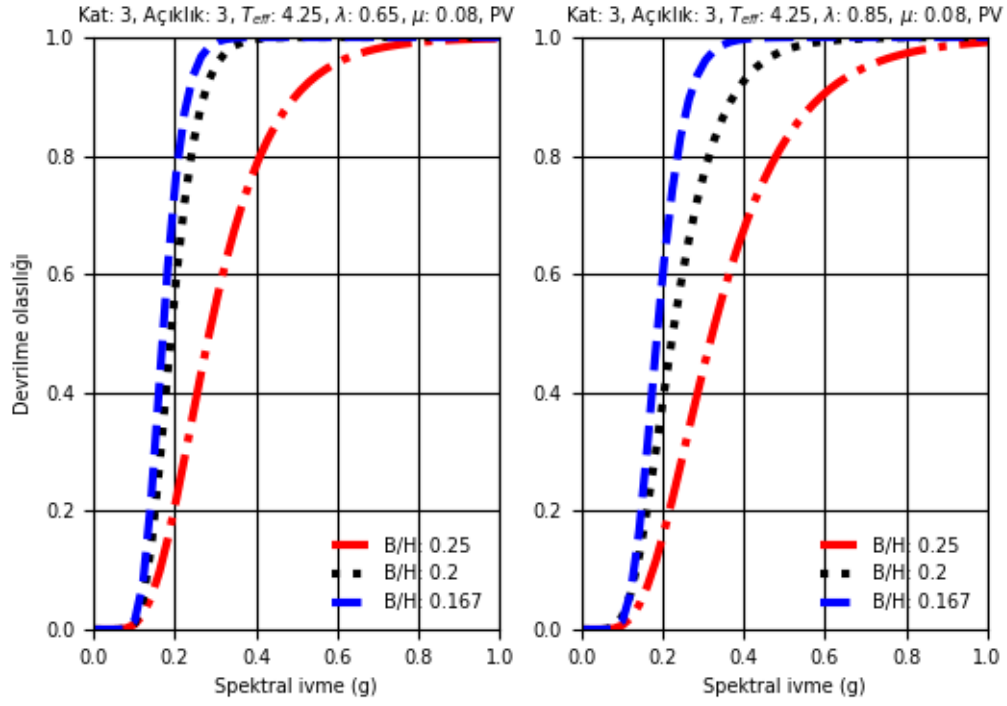
Şekil Ek. 78. 9 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılma eğrileri



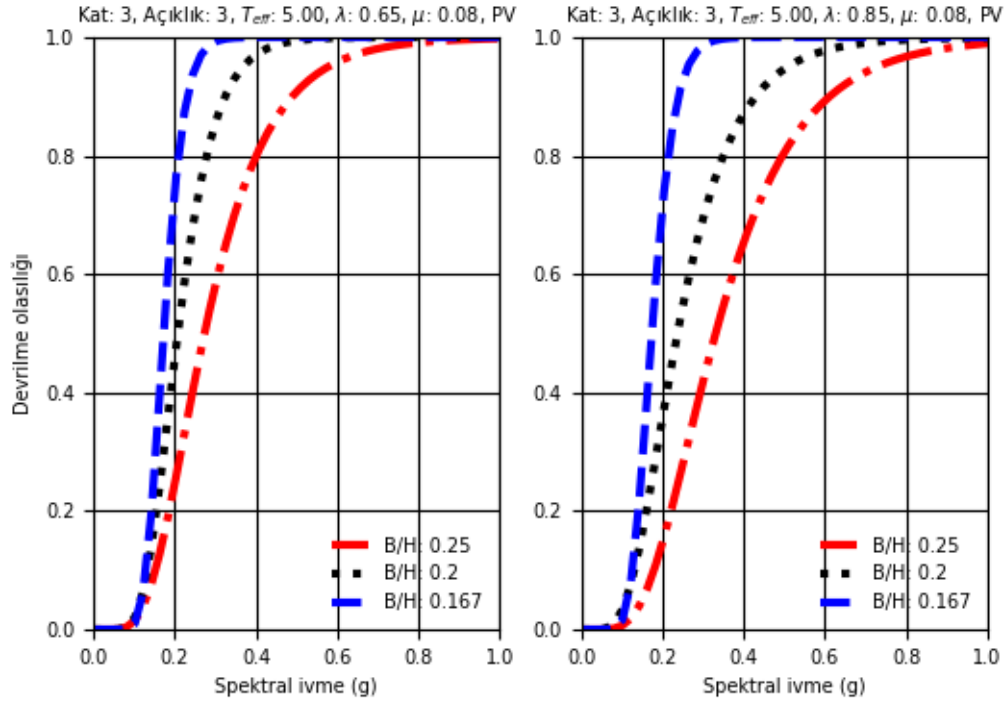
Şekil Ek. 79. 9 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



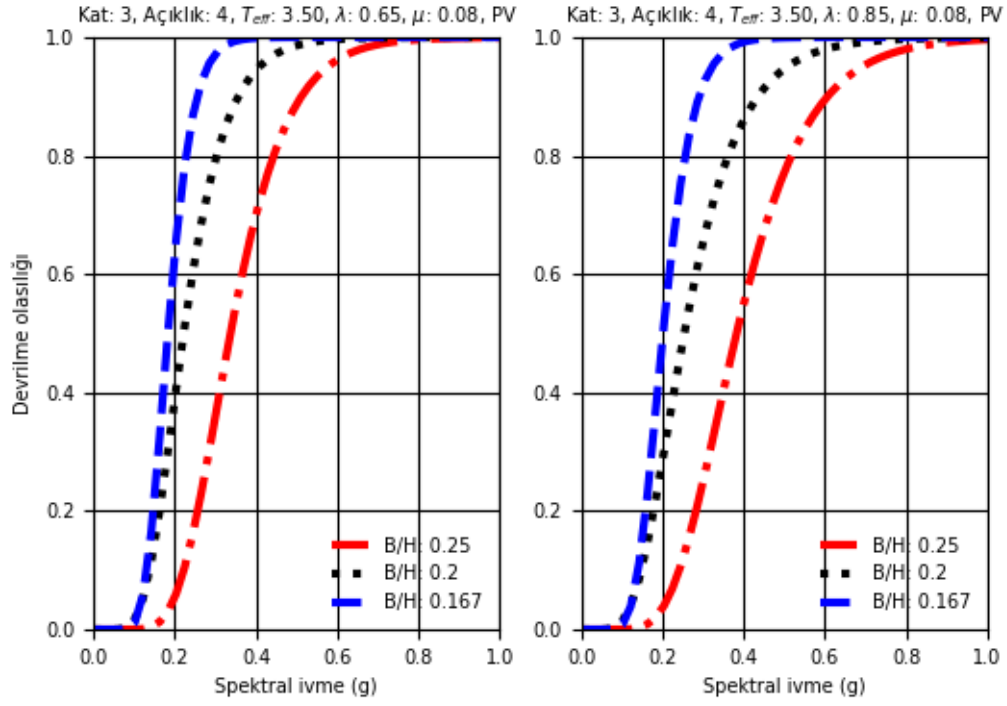
Şekil Ek. 80. 9 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,04 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



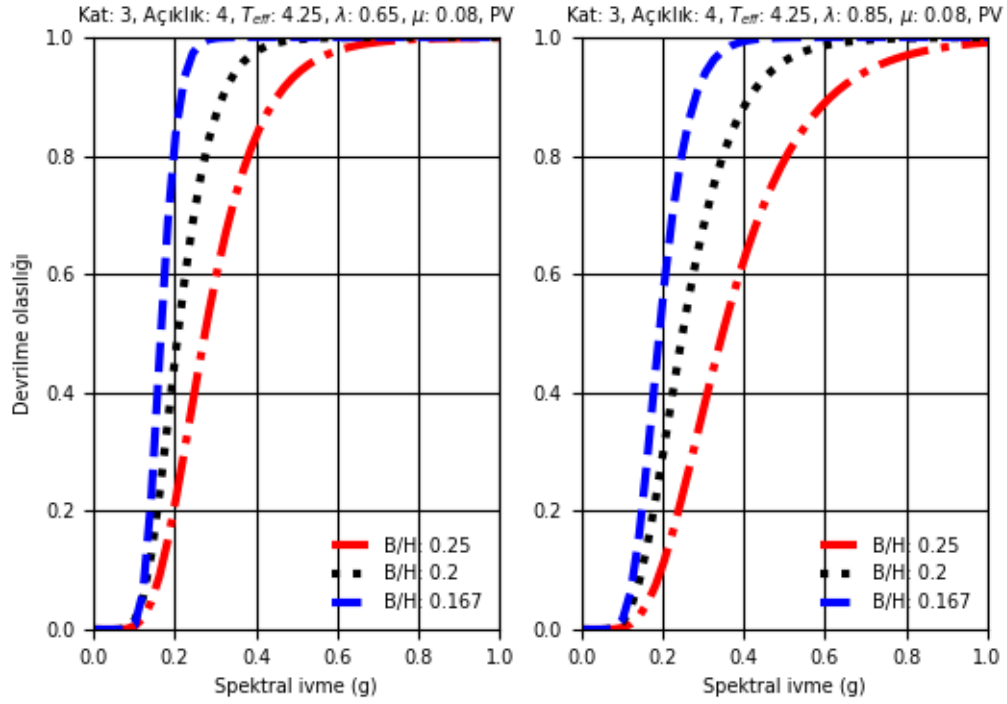
Şekil Ek. 83. 3 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



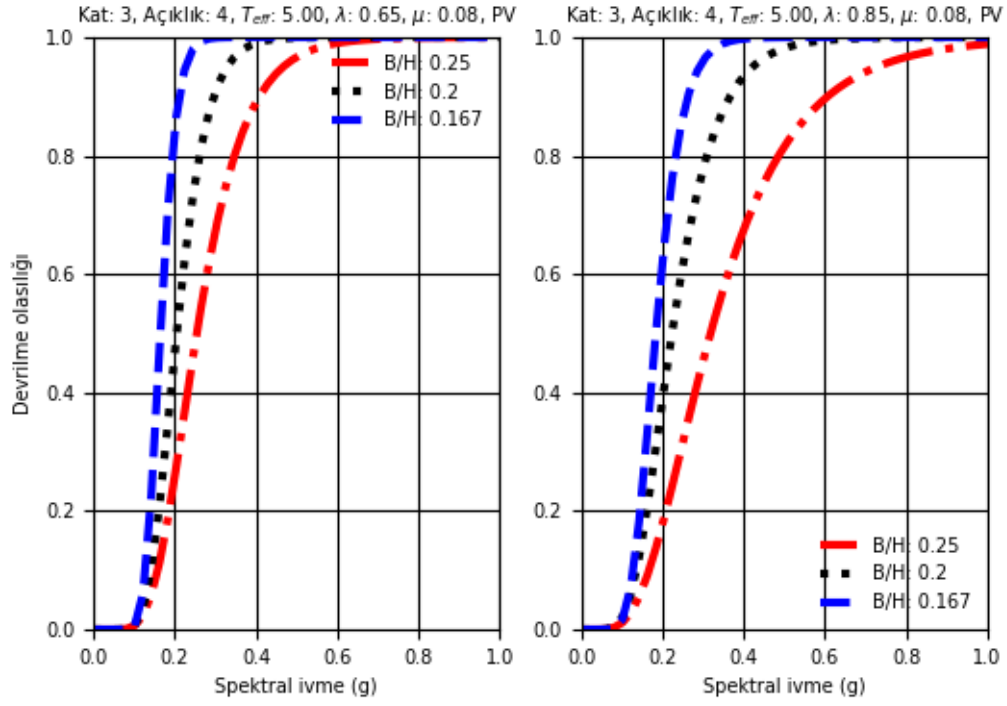
Şekil Ek. 84. 3 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



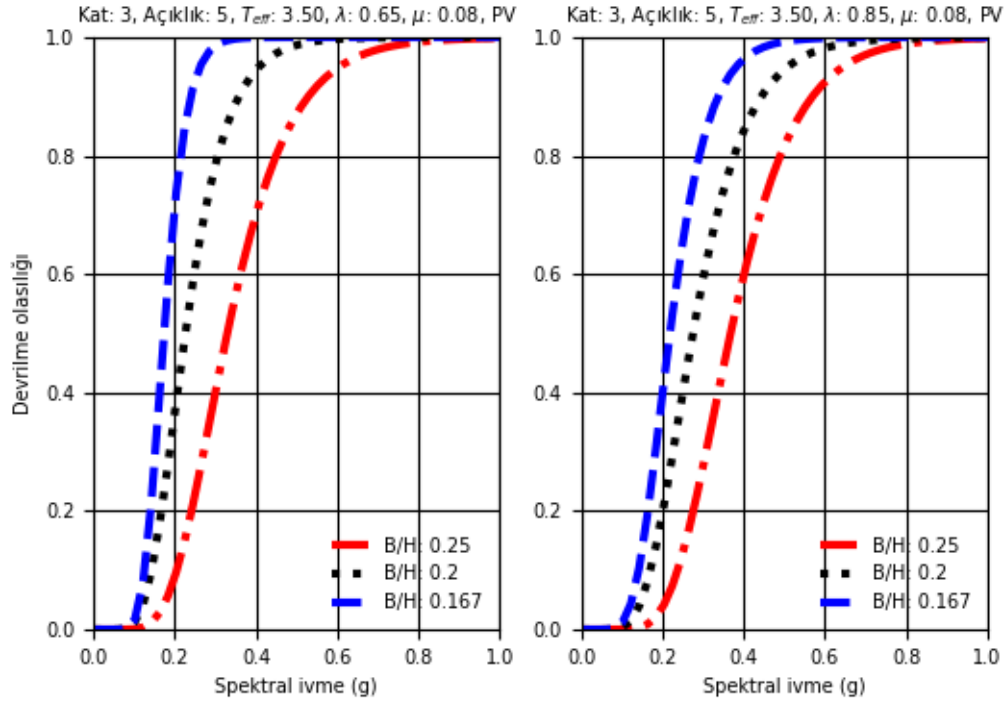
Şekil Ek. 85. 3 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



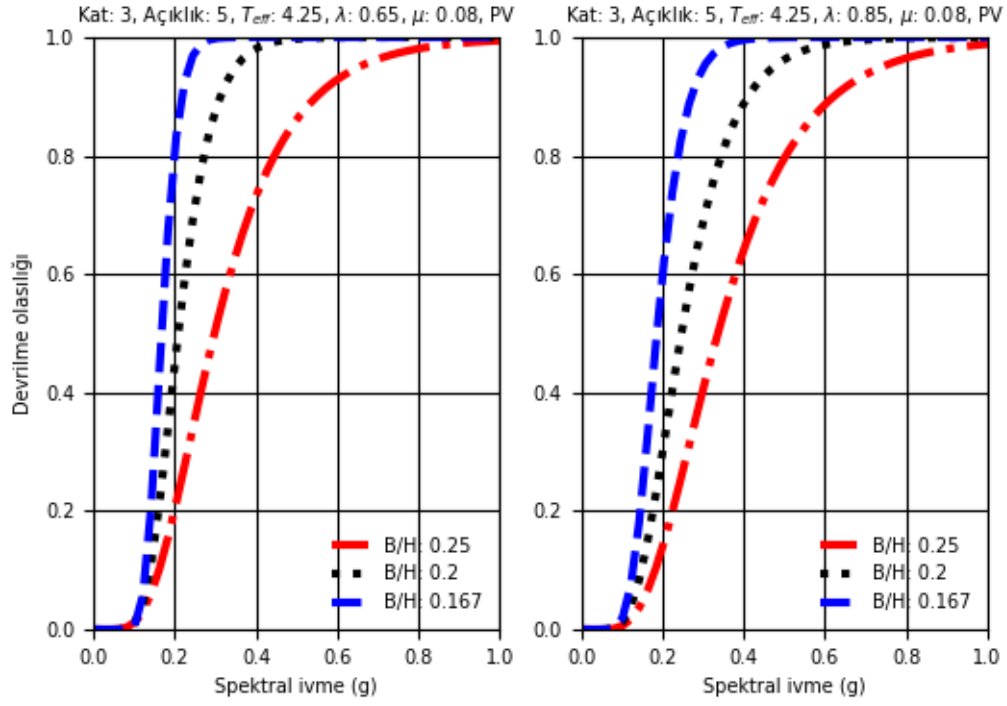
Şekil Ek. 86. 3 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



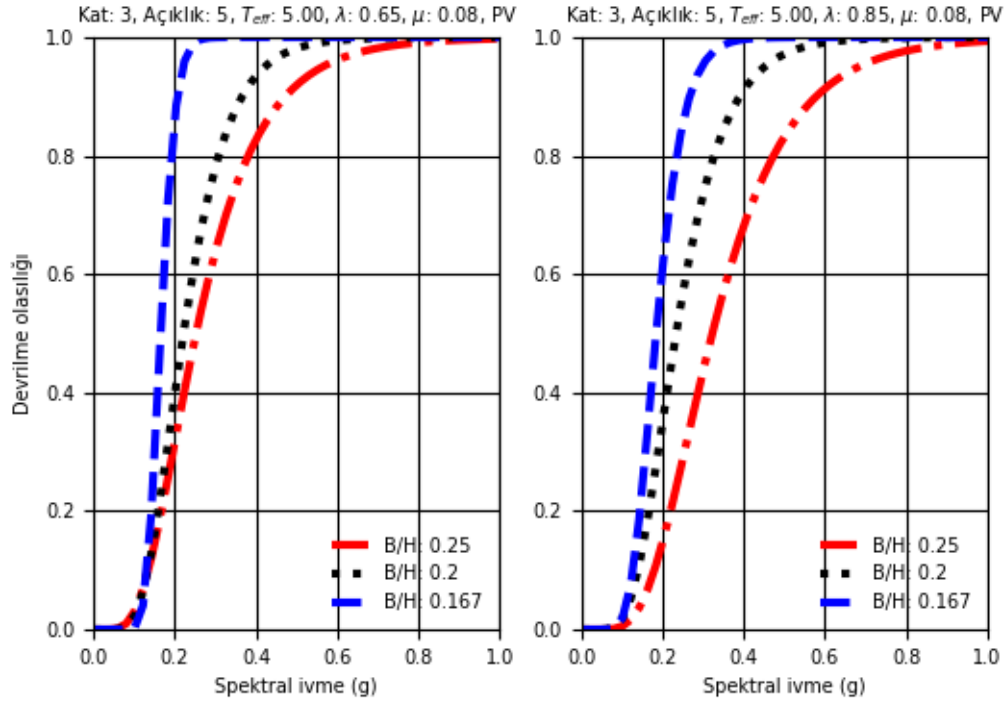
Şekil Ek. 87. 3 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



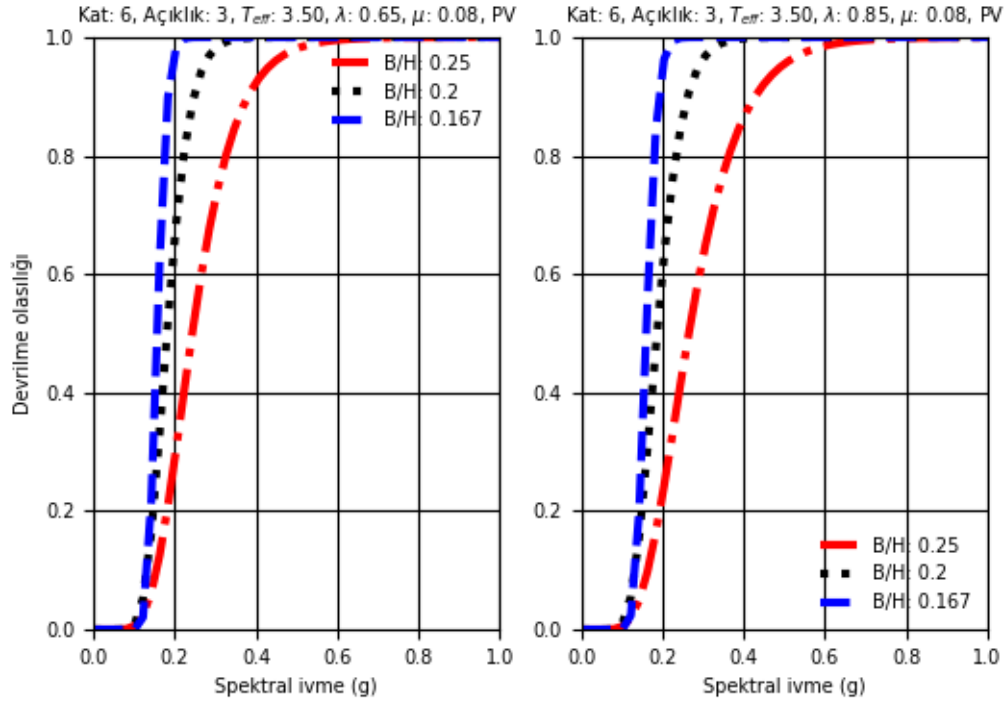
Şekil Ek. 88. 3 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



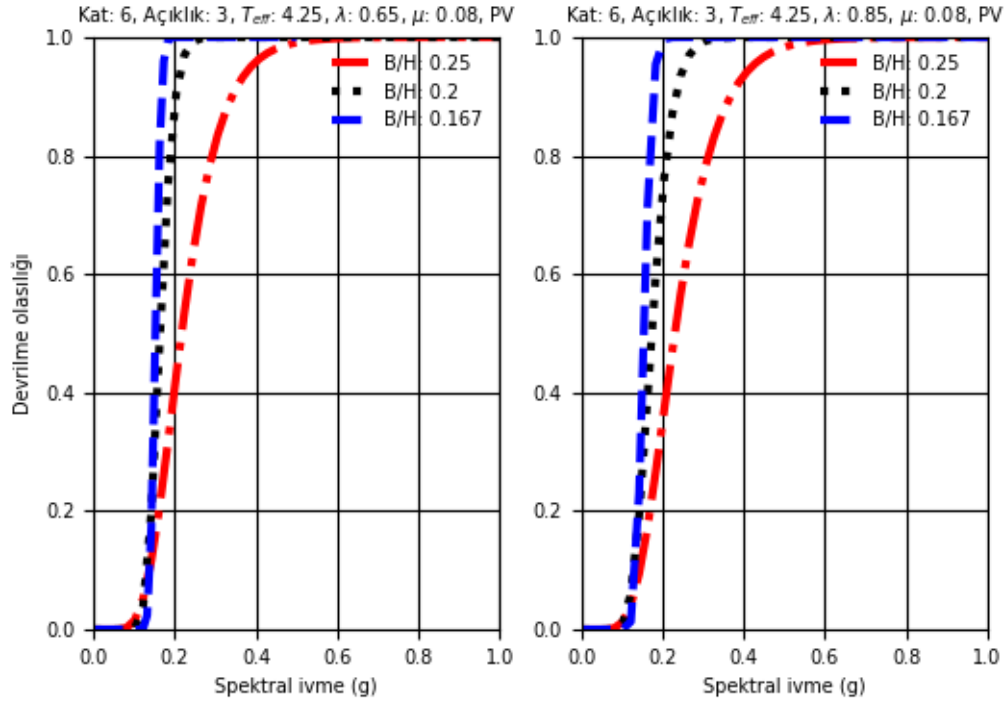
Şekil Ek. 89. 3 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



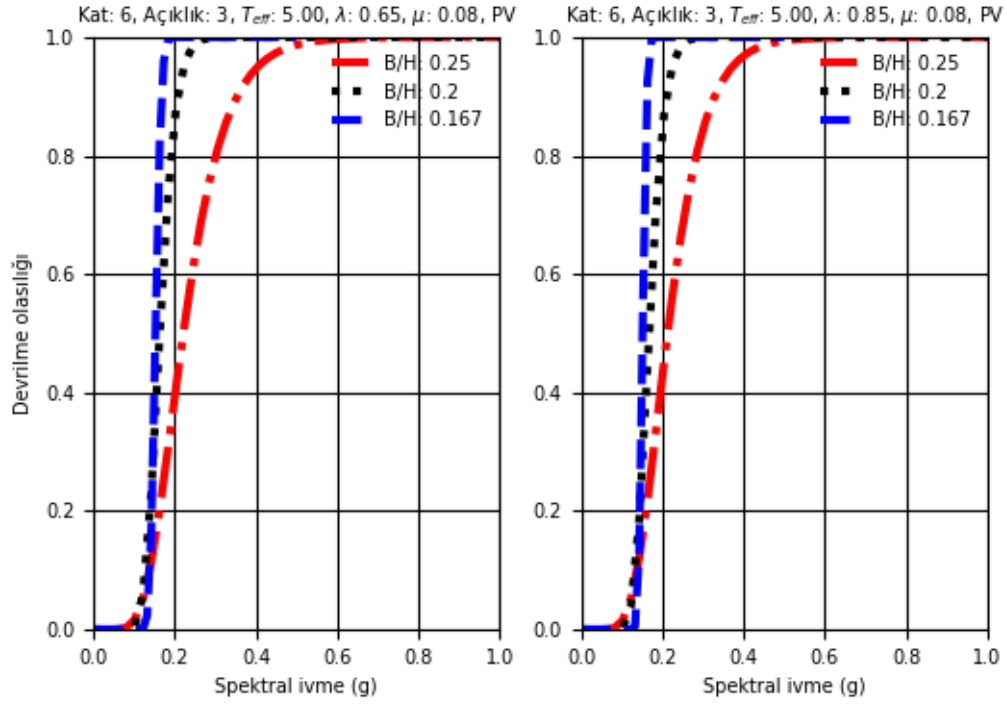
Şekil Ek. 90. 3 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



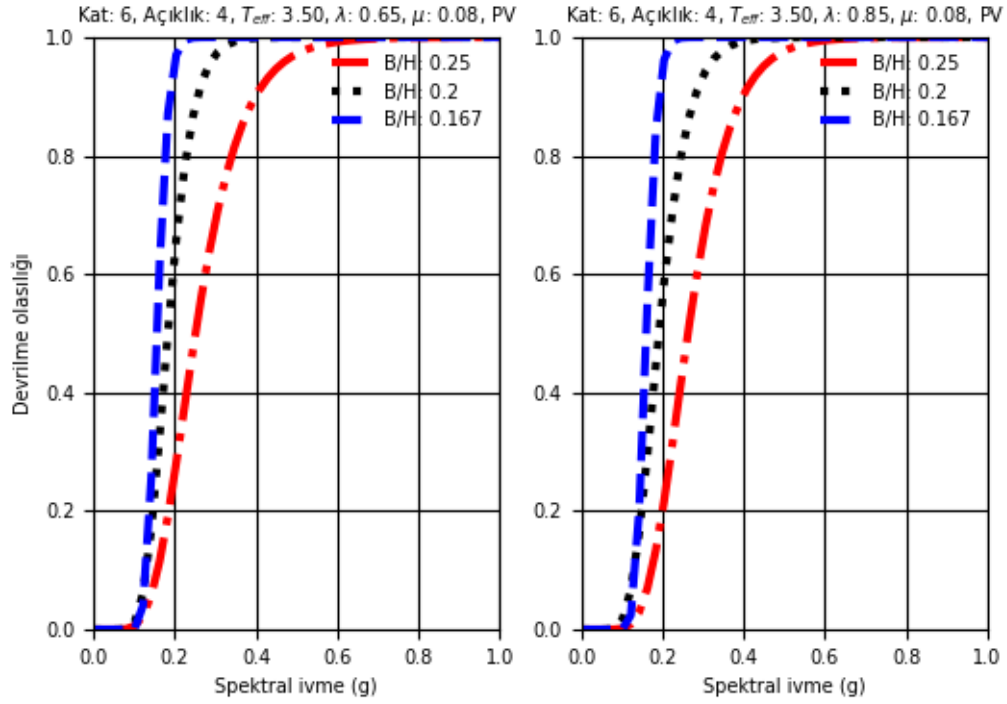
Şekil Ek. 91. 6 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



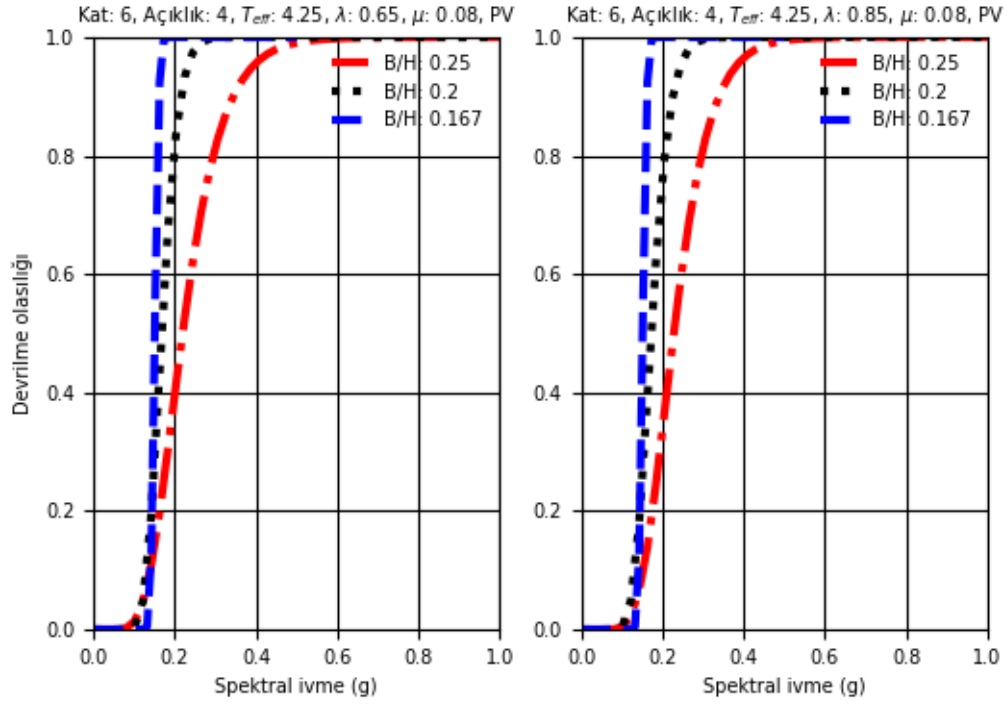
Şekil Ek. 92. 6 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



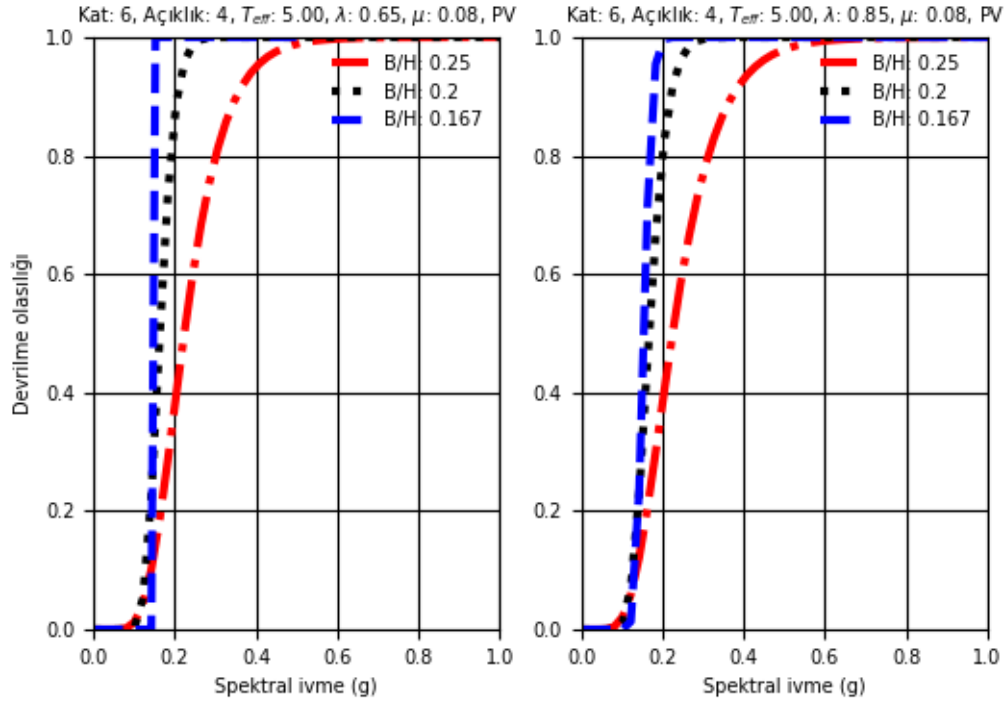
Şekil Ek. 93. 6 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



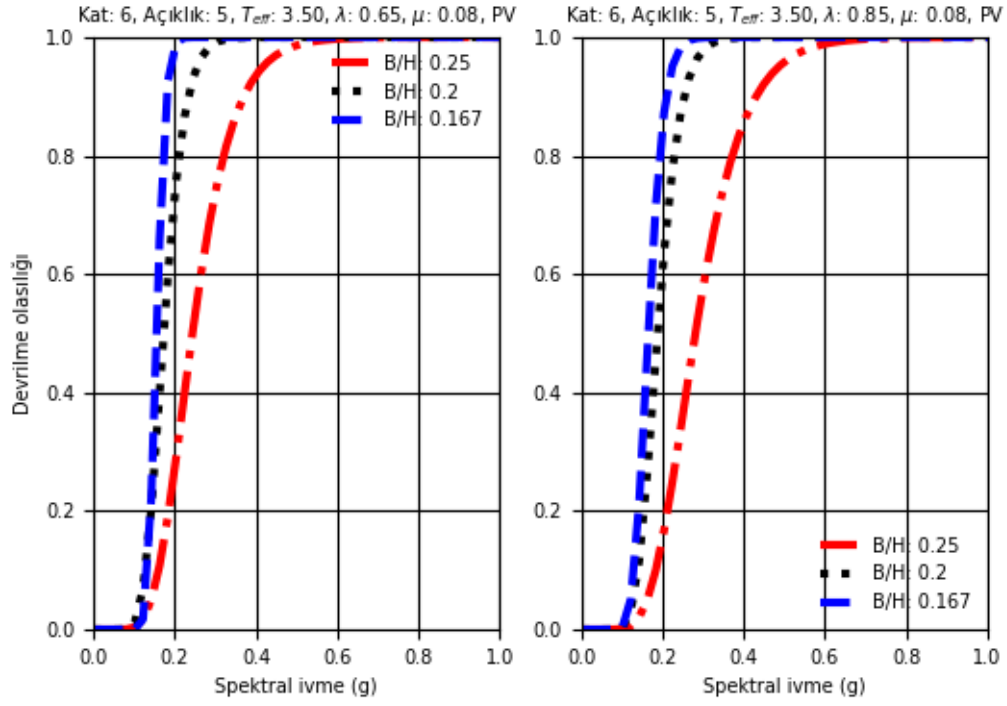
Şekil Ek. 94. 6 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılabilirlik eğrileri



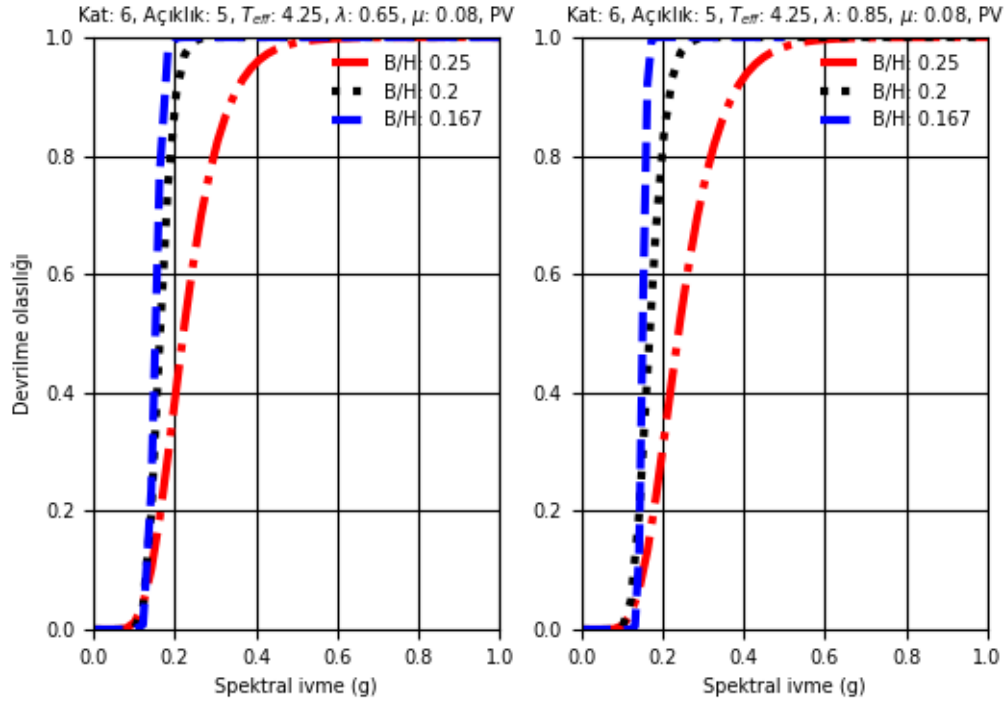
Şekil Ek. 95. 6 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



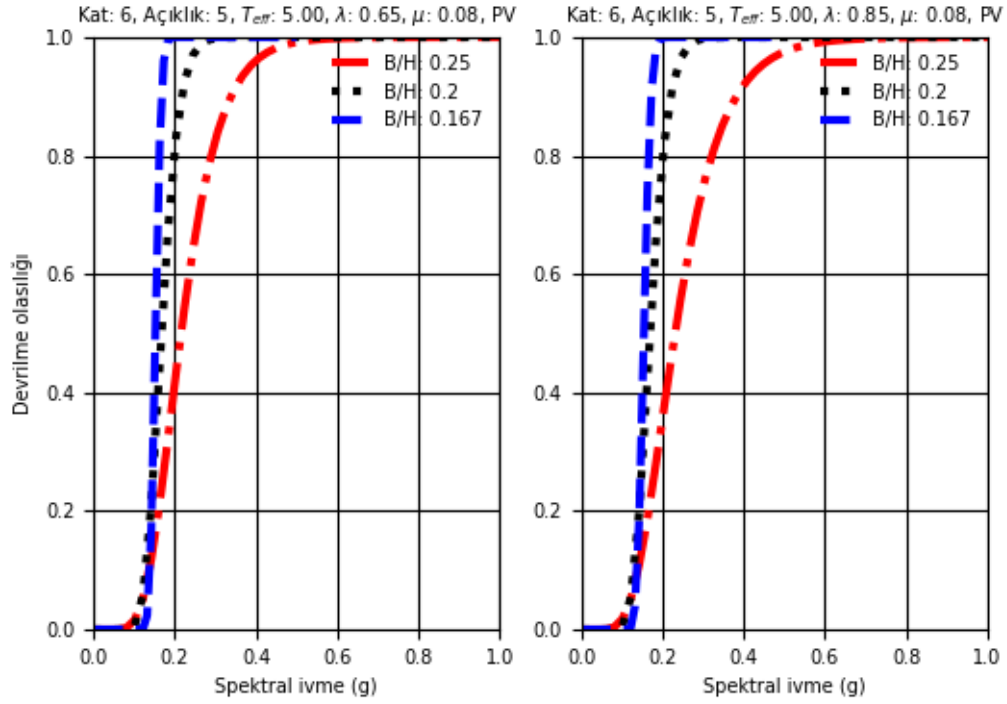
Şekil Ek. 96. 6 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



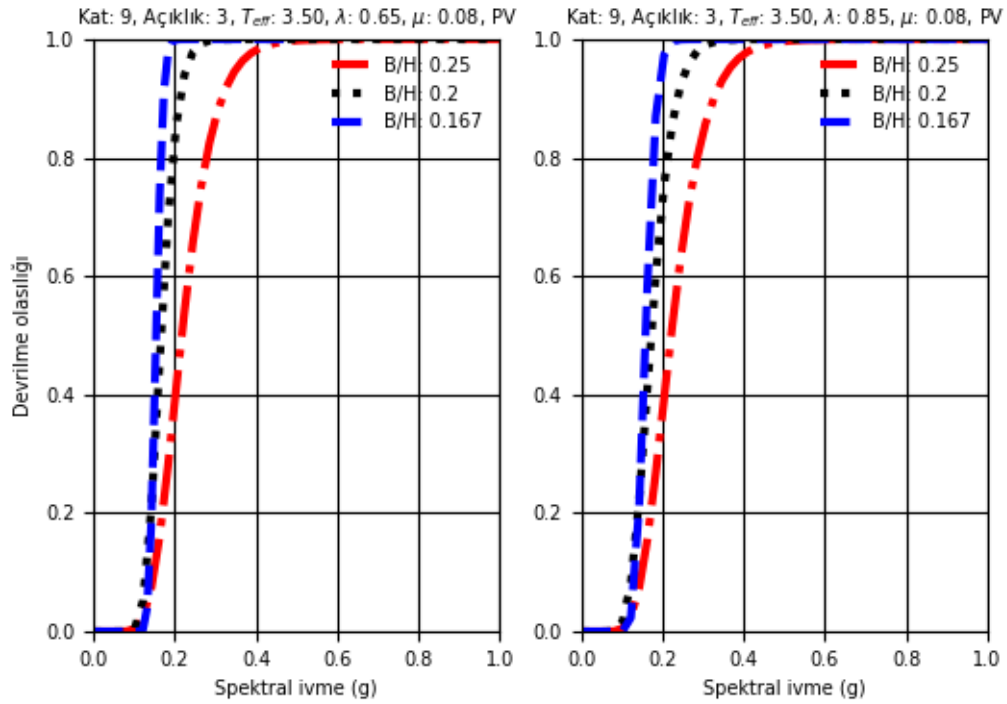
Şekil Ek. 97. 6 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



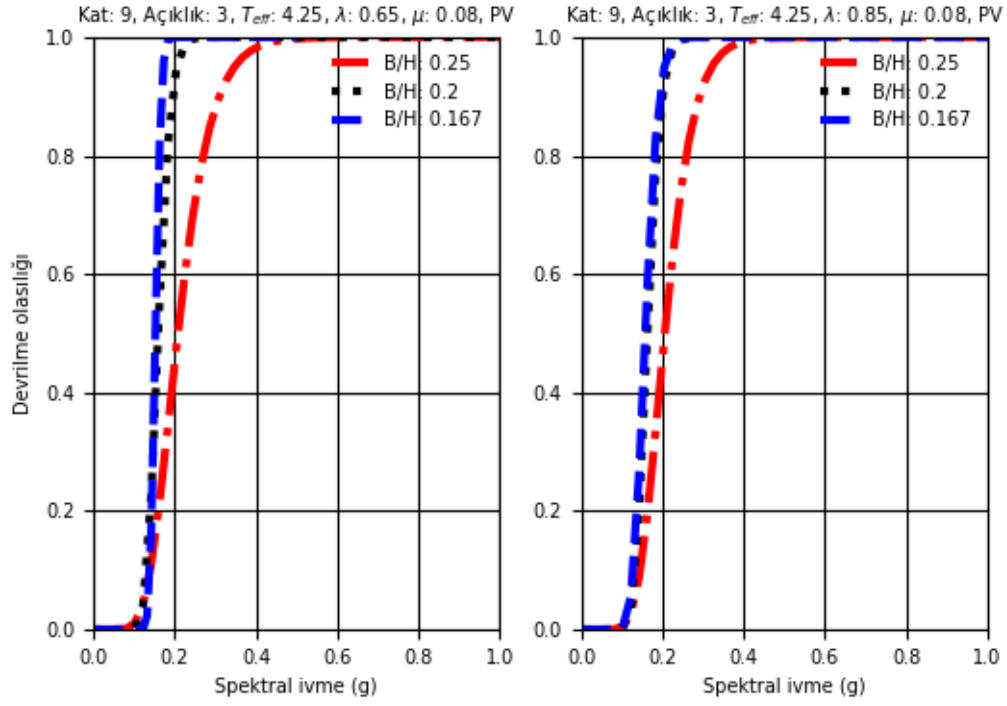
Şekil Ek. 98. 6 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



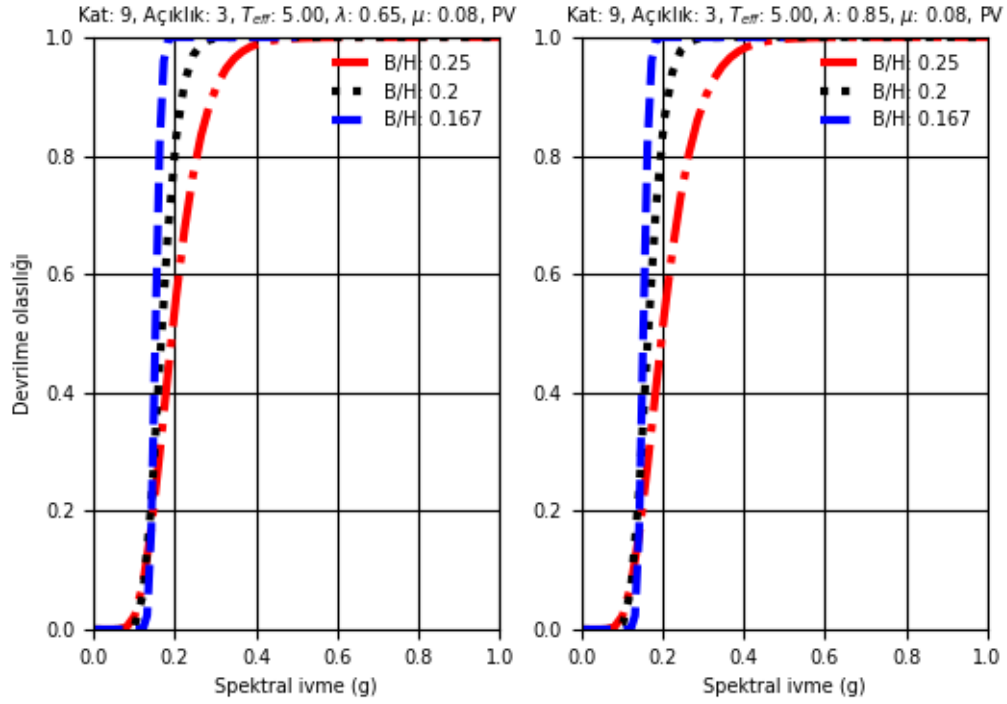
Şekil Ek. 99. 6 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



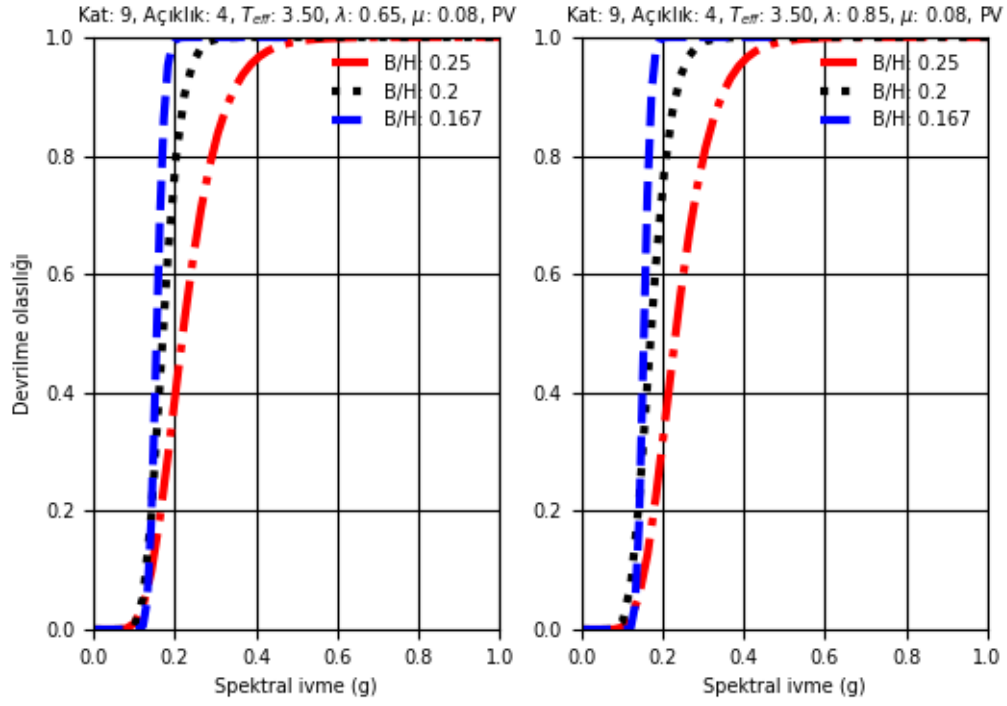
Şekil Ek. 100. 9 katlı 3 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



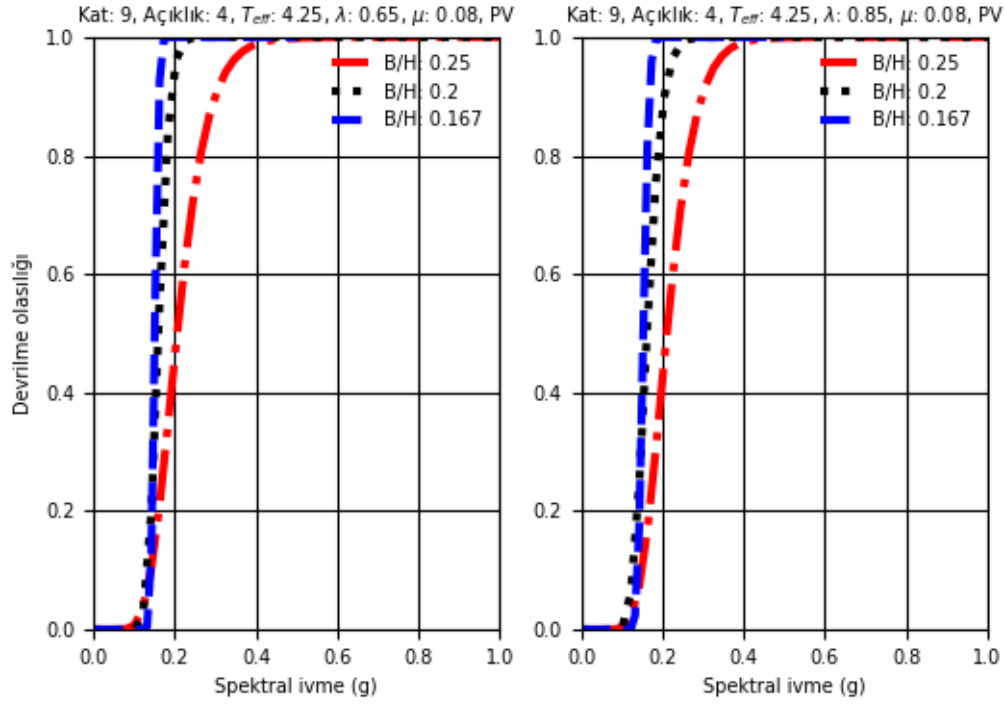
Şekil Ek. 101. 9 katlı 3 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



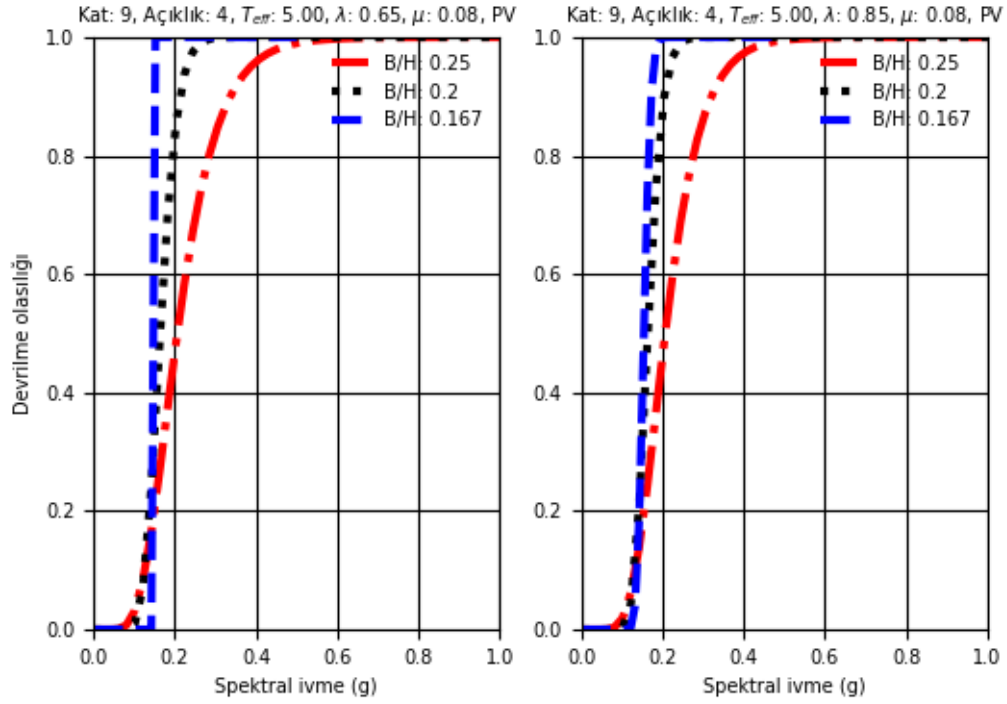
Şekil Ek. 102. 9 katlı 3 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



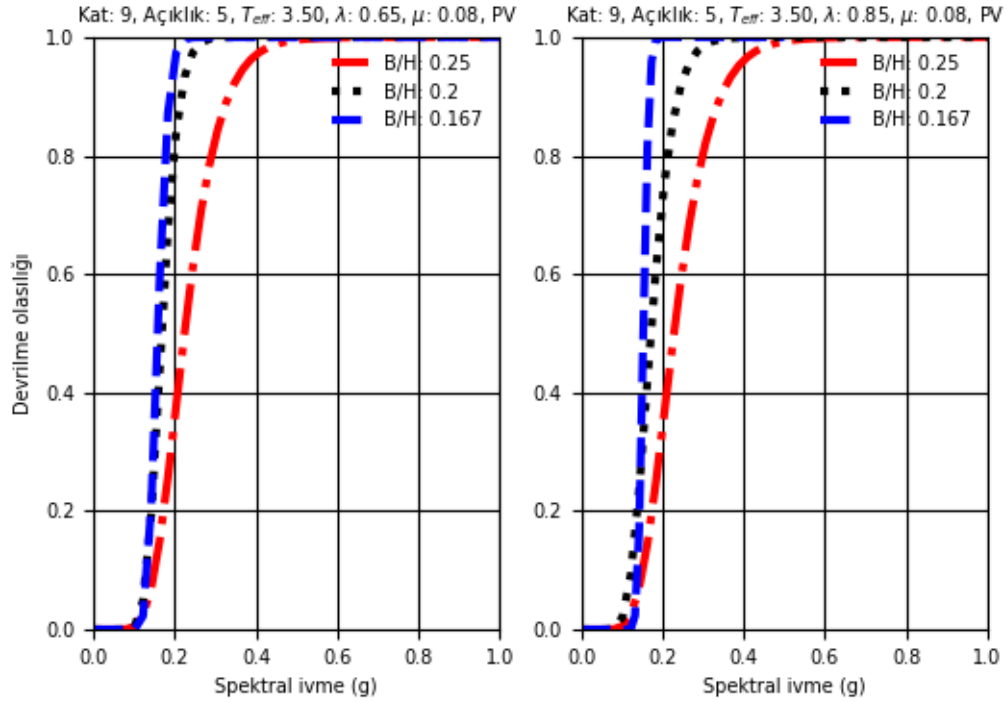
Şekil Ek. 103. 9 katlı 4 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



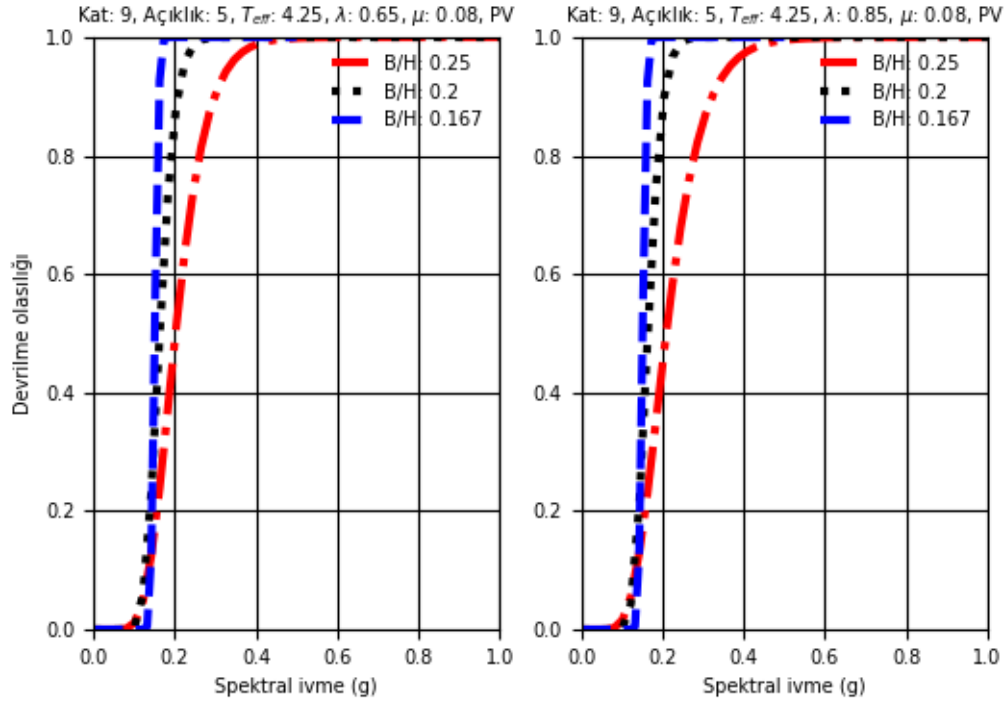
Şekil Ek. 104. 9 katlı 4 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



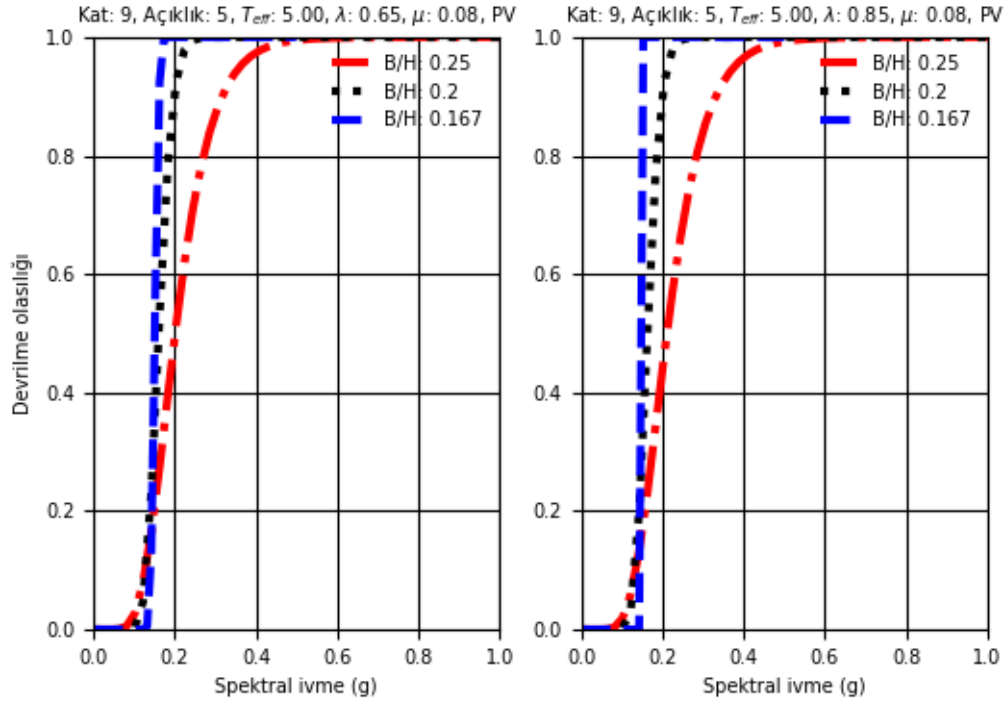
Şekil Ek. 105. 9 katlı 4 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



Şekil Ek. 106. 9 katlı 5 açıklıklı 3,50 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılma eğrileri



Şekil Ek. 107. 9 katlı 5 açıklıklı 4,25 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri



Şekil Ek. 108. 9 katlı 5 açıklıklı 5,00 sn efektif periyoda sahip kütle oranı 0,65-0,85 ve sürtünme katsayısı 0,08 olan PV modele ait kırılmalık eğrileri