DEPREM TEPKİ SPEKTRUMLARININ ELDE EDİLMESİ

Ersin Kadiroğlu
171412103

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yapı Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yapı Deprem Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku Yazgan

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Ağustos, 2019

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

ersin kadiroğlu'ın "Deprem Tepki Spektrumlarının Elde Edilmesi" başlıklı tezi 30.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği" nin ilgili maddeleri uyarınca Yapı-Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans/Doktora tezi oy birliğiyle/oy çokluğuyla, başarılı/başarısız olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı. Adı ve Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku YAZGAN	.....
Üye	Doç. Dr. Hasan ÖZKAYNAK	.....
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Seyit ÇERİBAŞI	.....

Prof. Dr. İlter BÜYÜKDİĞAN
Enstitü Müdürü

	ŞEKİL ONAY SAYFASI	Doküman No	FR-105
		İlk Yayın Tarihi	20.12.2017
		Revizyon Tarihi	10.12.2018
		Revizyon No	01
		Sayfa	1/2

ŞEKİL ONAY SAYFASI

20 / 08 / 2019

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,

Aşağıda bilgileri bulunan lisansüstü öğrencinin tezi şekil yönünden tarafımca incelenmiş ve Enstitüye teslim edilmesi uygun bulunmuştur.

(Yerine) Dr. Öğr. Üyesi Seyit Geribaşı

Anabilim Dalı Başkanı
Işıl Sanrı Karapınar

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI SOYADI	Ersin Kadiroğlu
ÖĞRENCİ NUMARASI	171412103
ANABİLİM DALI	Yapı Deprem Mühendisliği
PROGRAMI	(X) YÜKSEK LİSANS ( ) DOKTORA ( ) SANATTA YETERLİK
DANIŞMANI	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku Yazgan
TEZ BAŞLIĞI	Deprem Tepki Spektrumlarının Elde Edilmesi
SAVUNMA TARİHİ	30.07.2019
e-posta	ersn_kadiroglu@hotmail.com

İç Kapak	☑ Var ☐ Yok
Jüri Onay Sayfası	☑ Var ☐ Yok
Etik İlke ve Kurallara Uyum Beyanı	☑ Var ☐ Yok
İntihal Raporu	☑ Var ☐ Yok
Teşekkür Sayfası	☑ Var ☐ Yok
Öz (Başlık-Öz-Anahtar Sözcükler)	☑ Var ☐ Yok
Abstract (Title-Abstract-Key Words)	☑ Var ☐ Yok
İçindekiler	☑ Var ☐ Yok
Çizelgeler Listesi	☐ Var ☑ Yok
Şekiller Listesi (varsa)	☐ Şekil yok ☑ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Kısaltmalar Listesi	☑ Var ☐ Yok
Tablolar Listesi (varsa)	☐ Tablo yok ☑ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Ekler Listesi (varsa)	☐ Ek yok ☑ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Özgeçmiş	☑ Var ☐ Yok

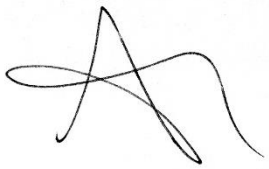
Hazırlayan İlgili Birim	Kalite Koordinatörü Dr. Öğr. Üyesi Şafak GÜNDÜZ	Kurumsal Yetkili Prof. Dr. Belma AKŞİT

(Doküman No: FR-105; Yayın Tarihi 20.12.2017; Revizyon Tarihi: ; Revizyon No:00)

Sayfa Genişliği	☑ Uygundur ☐Uygun Değildir
Yazı Tipi	☑ Uygundur ☐Uygun Değildir
Referans Kullanımı	☑ Uygundur ☐Uygun Değildir
Kaynakça Yazımı	☑ Uygundur ☐Uygun Değildir
Ekler (varsa)	☐ Ek yok ☑ Uygundur ☐ Uygun Değildir

Dr. Öğr. Üyesi Erdal GÜVENOĞLU

İmza



ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

20/08/2019

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarından bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilmeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; çalışmanın Maltepe Üniversitesinde kullanılan "bilimsel intihal tespit programı" ile tarandığını ve öngörülen standartları karşıladığını beyan ederim.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Ersin Kadiroğlu

İNTİHAL RAPORU

DEPREM TEPKİ SPEKTRUMLARININ ELDE EDİLMESİ

ORIJINALLIK RAPORU

%17	%15	%8	%4
BENZERLIK ENDEKSI	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCI ÖDEVLERI

BIRINCIL KAYNAKLAR

1	core.ac.uk İnternet Kaynağı	%7
2	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
3	ISABEL CUESTA. Journal of Earthquake Engineering, 2004 Yayın	%1
4	pt.scribd.com İnternet Kaynağı	%1
5	www.dist.unina.it İnternet Kaynağı	%1
6	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
7	sbe.maltepe.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
8	www.iram.fr İnternet Kaynağı	<%1

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku YAZGAN

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku Yazgan'a ve Doç. Dr. Emin Çiftçi'ye, tezin editörlüğünü üstlenen ve yardımcı olan Ayla Kadiroğlu'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışması boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen anne ve babama teşekkür ederim.

Ersin Kadiroğlu
Ağustos, 2019

ÖZ

DEPREM TEPKİ SPEKTRUMLARININ ELDE EDİLMESİ

Ersin Kadiroğlu
Yüksek Lisans Tezi
Yapı Deprem Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yapı Deprem Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Danışma: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku Yazgan
T.C. Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019

Depreme dayanıklı yapı tasarımı ve mevcut yapı üzerinde etkisi önemli olan hususlar yeteri kadar dayanım, süneklik ve rijitliğidir. Bu hususların yapıların depreme karşı güvenli olması için bunların yapıya kazandırılması gerekir. Bu nedenle yapıların yeteri kadar depreme karşı güvenli olması için dayanım azaltma faktörü, süneklik ve periyot ilişkisi son derece önemli bir yer tutmaktadır. Bu ilişki yapının periyodu, kuvvetli yer hareketinin özelliklerine ve çevrimsel davranış modeline bağlıdır. Bu çalışmada depreme dayanıklı yapı tasarımında önemli olan tepki spektrumlarının farklı kuvvetli yer hareketleri etkisi altında bir dinamik analiz yöntemi kullanılarak ve elastoplastik çevrimsel davranış modeli kullanılarak depremin tek dereceli serbestlik sistem üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu nedenle öncelikli olarak 22 kuvvetli yer hareketi ortalama kayma dalga hızı Vs_{30} zemin tipleri ($180 \leq Vs \leq 360$) yumuşak zemin ve $360 \leq Vs \leq 760$) sert zemin olarak gruplandırılmıştır. Tepki spektrumlarının belirlenmesi için matlab programı kullanılmış ve farklı sabit sünekliklerde 1,2,4,8 ve farklı sönüm oranlarına 0.02, 0.05, 0.1 bağlı olarak Elastik ötesi dayanım, ivme, hız ve yer değiştirme spektrumları belirlenmiştir. Bu sabit süneklik değerleriyle tanımlanan elastoplastik davranış modeli sistemlerde, dayanım azaltma faktörü ile periyot arasındaki ilişki belirlenmiş ve belirlenen bu ilişkinin ortalama R μ- μ -T spektrumu çizilmiş, mevcut R μ- μ -T tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Elastik ötesi Tepki Spektrumu, Süneklik, Rμ-μ-T spektrumu, Sönüm.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRA

Ersin Kadiroğlu
Master Thesis
Department of Structural Earthquake Engineering
Structural Earthquake Engineering Programme
Advisor: Asst. Prof. Ahmet Utku Yazgan
Maltepe University Graduate School of Science and Engineering, 2019

The deformation of the structures into their inelastic range during strong ground motion is important in earthquake engineering. Modern seismic codes include Performance-based seismic design methodology which requires from the structures to resist inelastic deformations. In this study, Ductility reduction factors (Rμ-μ-T relations), which is important in the design of earthquake resistant structures, are developed using Turkish Strong Ground Motion Records. Based on nonlinear time-history for an SDOF system; the effects of site conditions, structural period, level of ductility, damping on Rμ-μ-T relations are investigated. Elastoplastic hysteresis models are used to generate response spectra for 22 earthquakes with a moment magnitude Mw ≥ 5. Depending on the Vs_{30} values, the soil type is classified as soft soil ($180 \leq Vs \leq 360$) and stiff soil ($360 \leq Vs \leq 760$) in the research. The displacement ductility ratios (μ) were taken as 1, 2, 4, 8. The curve corresponding to a ductility 1 means elastic spectra. The response was computed for 3 damping ratios such as 0.02, 0.05, 0.10. Though the ductility demand and yield strength reduction factor differ greatly for given ranges of natural period (T), they take close values for systems for periods $T \geq 1$. As a result, the approximate expressions of Rμ-μ-T relations in terms of site conditions, structural period and ductility ratio are proposed.

Keywords: Inelastic spectra, Ductility, Rμ-μ-T spectra, Damping.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ii

ŞEKİL ONAY SAYFASI ..... **Error! Bookmark not defined.**

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI ..... **Error! Bookmark not defined.**

İNTİHAL RAPORU vii

TEŞEKKÜR viii

ÖZ viii

ABSTRACT ix

İÇİNDEKİLER x

TABLO LİSTESİ xiii

ŞEKİL LİSTESİ xiv

KISALTMALAR xx

ÖZGEÇMİŞ xxi

BÖLÜM 1. GİRİŞ 1

1.1 Giriş 1

1.2 Daha Önce Yapılan Çalışmalar 1

1.3 Tezin Amacı 2

1.4 Hipotez 2

BÖLÜM 2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN DİNAMİĞİ 4

2.1 Tek Serbestlik Dereceli Sistemler 4

2.3 Serbest Titreşim 6

2.3.1 Sönümsüz Serbest Titreşim 7

2.3.2 Sönümlü Serbest Titreşim 8

2.4 Zorlanmış Titreşim 9
2.4.1 Sönümsüz Sistemlerin Harmonik Titreşimi 9
2.4.2 Sönümlü Sistemlerin Harmonik Titreşimi 10
BÖLÜM 3. DEPREM TEPKİ SPEKTRUMU 12
3.1 Davranış Spektrumu 12
3.2 Tasarım Spektrumu 13
3.3 Deprem Tepki Spektrumlarının Zeminlerle İlişkisi ve Normalizasyonu 13
BÖLÜM 4. ELASTİKÖTESİ SİSTEMLERİN DEPREM DAVRANIŞI 15
4.1 Elastik ötesi TSD Sistemleri 15
4.2 Çevrimsel Davranış Modelleri 16
4.2.1 Elastoplastik Model 16
4.2.2 Bilinear Model 17
4.2.3 Takeda Modeli 18
4.2.4 Q Model 19
4.3 Süneklik 20
4.4 Elastik ötesi TSD Sistemlerin Süneklik ve Akma Dayanımı Spektrumu 22
4.5 Dayanım Azaltma Faktörü (Rμ) 23
4.6 Eşit Yer değiştirme ve Eşit Enerji Kuralı 23
4.7 Nassar ve Krawinkler 26
4.8 Newmark ve Hall 27
BÖLÜM 5. TSD SİSTEMLERİNİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ 28
5.1 Zamanı Adımlama Yöntemleri 28
5.2 Newmark Yöntemi 29
5.2.1 Newmark Ortalama İvme Yöntemi 29
5.2.2 Newmark Doğrusal İvme Yöntemi 32
BÖLÜM 6. SAYISAL UYGULAMALAR 37

6.1 Analizde Kullanılan Yer Hareketleri 37

6.2 Tepki spektrumunlarının Bulunması 39

6.2 Davranış ve Ortalama Rμ- μ-T Spektrumları 52

6.3 Ortalama Rμ- μ-T için Regresyon Analizi..... 60

6.4 Ortalama R μ- μ-T Spektrumun Araştırmacılarla Karşılaştırılması..... 60

6.6 sönümün ortalama Rμ-μ-T spektrumu üzerindeki etkisi 65

BÖLÜM 7. SONUÇLAR 67

EK'LER 70

EK1a: Newmark sabit ortalama yöntemi ile doğrusal sistemler için çözüm algoritması 70

EK1b: Newmark doğrusal ortalama yöntemi ile doğrusal sistemler için çözüm algoritması 71

EK1c: Elastoplastik tek serbestlik dereceli sistemler için adım adım çözüm algoritması 72

EK1d: Elastoplastik tek serbestlik dereceli sistemler için algoritma akış şeması 74

EK2a: Yumuşak zemin grubunun ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumları .. 75

Ek2b: Sert zemin grubunun ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumları..... 111

Ek2c: Yumuşak zemin grubunun Rμ- μ-T davranış spektrumları..... 141

Ek2d: Sert zemin grubunun Rμ- μ-T davranış spektrumları..... 153

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Dayanım azaltma faktörü için pekleşme oranına göre katsayılar 26
Tablo 2 Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının listesi 37
Tablo 3 Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının süreleri ve Arias şiddetleri 38
Tablo 4 Regresyon analizi sonucunda bulunan farklı zeminler için uygun katsayılar .. 60

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 Tek serbestlik dereceli sistem 4
Şekil 2 Zamanın herhangi bir anında kütleye etkiyen kuvvetler 4
Şekil 3 Deprem yüklemesi durumunda sistemin davranışı 6
Şekil 4 sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi 7
Şekil 5 sönümün serbest titreşim üzerinde etkisi 9
Şekil 6 Harmonik kuvvetle zorlanan sönümlü sistemin şekildeğişimi büyütme çarpanı ve faz açısı 11
Şekil 7 TSD sistemlerinin titreşim periyotlarına göre grafiği 14
Şekil 8 İvme spektrumunun zeminlere göre değişimi ve normalizasyonu 14
Şekil 9 Elastik ötesi TSD sistemlerin kuvvet-deformasyon ile yer değiştirme ilişkisi 15
Şekil 10 Elastik mükemmel plastik model 17
Şekil 11 Çift doğrulu (Bilinear) model 18
Şekil 12 Takeda modeli 19
Şekil 13 Q modeli 20
Şekil 14 Elastoplastik kuvvet yer değiştirme ilişkisi 21
Şekil 15 Aynı başlangıç rijitliğine sahip, farklı akma dayanımlarına bağlı yer değiştirme grafiği 22
Şekil 16 Eşit yer değiştirme ve eşit enerji 24
Şekil 17 Rμ-μ-T idealize edilmiş tasarım spektrumu 25
Şekil 18 Zaman adımlama yöntemleri için kullanılan gösterim 29
Şekil 19 Δt zaman aralığında gerçek ve tahmini ivme 30
Şekil 20 Δt zaman aralığında gerçek ve tahmini ivme 33
Şekil 21 Tanjant rijitliğinin kulanılması 36
Şekil 22 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ivme veya dayanım spektrumu 40
Şekil 23 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için hız spektrumu 41
Şekil 24 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için yer değiştirme spektrumu 42
Şekil 25 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumu 43
Şekil 26 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama hız spektrumu 44
Şekil 27 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama yer değiştirme spektrumu 45

Şekil 28 Kocaeli depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 46

Şekil 29 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için hız spektrumu 47

Şekil 30 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için yer değiştirme spektrumu..... 48

Şekil 31 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumu..... 49

Şekil 32 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama hız spektrumu..... 50

Şekil 33 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama yer değiştirme spektrumu..... 51

Şekil 34 Düzce depreminin sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için Rμ-μ-T spektrumu 53

Şekil 35 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu 54

Şekil 36 Kocaeli depreminin sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 55

Şekil 37 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu 56

Şekil 38 a) μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması..... 57

Şekil 39 μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması..... 58

Şekil 40 μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması..... 59

Şekil 41 sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumunun a) Regresyon eğrisi, b) Krawinkler ve Nassar, c) Newmark ve Hall karşılaştırılması 61

Şekil 42 a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 için ortalama Rμ-μ-T spektrumun, araştırmacıların spektrumlarıyla karşılaştırılması..... 62

Şekil 43 sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumunun a) Regresyon eğrisi, b) Krawinkler ve Nassar, c) Newmark ve Hall karşılaştırılması 63

Şekil 44 a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 için ortalama Rμ-μ-T spektrumun, araştırmacıların spektrumlarıyla karşılaştırılması..... 64

Şekil 45 farklı sönüm değerlerinin a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 süneklik spektrumu üzerindeki etkisi (yumuşak zemin grubu)..... 65

Şekil 46 farklı sönüm değerlerinin a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 süneklik spektrumu üzerindeki etkisi (sert zemin grubu) 66

Şekil 47 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 75

Şekil 48 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 76

Şekil 49 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 77
Şekil 50 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 78
Şekil 51 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 79
Şekil 52 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 80
Şekil 53 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2 b=%5 c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 81
Şekil 54 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 82
Şekil 55 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 83
Şekil 56 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 84
Şekil 57 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 85
Şekil 58 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 86
Şekil 59 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 87
Şekil 60 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 88
Şekil 61 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 89
Şekil 62 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2 b=%5 c=%10 için hız spektrumu..... 90
Şekil 63 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 91
Şekil 64 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 92
Şekil 65 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 93
Şekil 66 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 94
Şekil 67 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 95
Şekil 68 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 96
Şekil 69 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 97
Şekil 70 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 98
Şekil 71 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 99
Şekil 72 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 100
Şekil 73 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 101

Şekil 74 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 102
Şekil 75 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 103
Şekil 76 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 104
Şekil 77 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 105
Şekil 78 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 106
Şekil 79 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 107
Şekil 80 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 108
Şekil 81 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 109
Şekil 82 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu 110
Şekil 83 Aydın depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 111
Şekil 84 Balıkesir depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 112
Şekil 85 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 113
Şekil 86 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 114
Şekil 87 Hatay depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 115
Şekil 88 Kahramanmaraş depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 116
Şekil 89 Kocaeli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 117
Şekil 90 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 118
Şekil 91 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 119
Şekil 92 Hatay depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu..... 120
Şekil 93 Aydın depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 121

Şekil 94 Balıkesir depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 122
Şekil 95 Bingöl depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 123
Şekil 96 Bursa depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 124
Şekil 97 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 125
Şekil 98 Kahramanmaraş depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu..... 126
Şekil 99 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 127
Şekil 100 Muğla depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 128
Şekil 101 Van depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 129
Şekil 102 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu 130
Şekil 103 Aydın depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 131
Şekil 104 Balıkesir depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 132
Şekil 105 Bingöl depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 133
Şekil 106 Bursa depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 134
Şekil 107 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 135
Şekil 108 Kahramanmaraş depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 136
Şekil 109 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 137
Şekil 110 Muğla depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 138
Şekil 111 Van depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 139
Şekil 112 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu..... 140
Şekil 113 Adana depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 141
Şekil 114 Afyon depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 142
Şekil 115 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 143
Şekil 116 Bursa depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 144

Şekil 117 Denizli depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 145
Şekil 118 Düzce depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 146
Şekil 119 Erzincan depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 147
Şekil 120 Erzurum depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 148
Şekil 121 Kütahya depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 149
Şekil 122 Manisa depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 150
Şekil 123 Muğla depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 151
Şekil 124 Van depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 152
Şekil 125 Aydın depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 153
Şekil 126 Balıkesir depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 154
Şekil 127 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 155
Şekil 128 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 156
Şekil 129 Hatay depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 157
Şekil 130 Kahramanmaraş depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 158
Şekil 131 Kacaeli depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu..... 159
Şekil 132 Muğla depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 160
Şekil 133 Van depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu 161
Şekil 134 Hatay depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, %10 için Rμ-μ-T spektrumu162

KISALTMALAR

DB : Doğu-Batı

KG : Kuzey-Güney

PGA : Pik Yer İvme

PGD : Pik Yer Değiştirme

PGV : Pik Yer Hız

TSD : Tek Serbestlik Dereceli

ÖZGEÇMİŞ

Ersin Kadiroğlu
Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Eğitim

Y.Ls.	2019	Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Deprem Mühendisliği
Ls.	2015	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Lise	2010	Anadolu Öğretmen Lisesi

Mesleki Birlik/Dernek Üyelikleri

Yıl	Kurum
2015 -	Üye: İnşaat Mühendisleri Odası

Yayınlar ve Diğer Bilimsel/Sanatsal Faaliyetler

YAZGAN A. U. KADİROĞLU E. Inelastic Response Spectra for Seismic Design of Structures (IV. ECOCEE). (Tam Metin Bilidiri/)

Kışisel Bilgiler

Doğum yeri ve yılı	: Hakkari, 1991 Cinsiyet: E
Yabancı diller	: İngilizce (iyi)
GSM / e-posta	: 05346044479 / ersn_kadiroglu@hotmail.com

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Depremlerde meydana gelecek hasarların engellenmesi, can ve mal kaybının azaltılması için deprem mühendisliği araştırmaları son yıllarda tüm dünyada hızlanmış ve yeni çalışmalar yapılmıştır. Bu yüzden depreme dayanıklı yapı tasarımı için deprem tepki spektrumları geliştirmiş ve depreme dayanıklı yapı tasarımında halen deprem tepki spektrumları önemli bir yer tutmaktadır. Bu tepki spektrumları yapının kütle, rijitlik, sönüm ve yapıda meydana gelen davranışlara bağlıdır. Ayrıca bu tepki spektrumları Deprem mühendisliğinde kullanılan kuvvetli yer hareketleri etkisinde, yapıların mevcut süneklik seviyeleri göz önünde bulundurularak dayanım azaltma faktörüne bölünerek azaltılmakta sünekliğe bağlı olarak bir Elastik ötesi tepki spektrumu da elde edilmektedir. Taşıma gücünden bir azalma olmadan sünek bir davranış veya Elastik ötesi bir deformasyon yapılması sağlanarak gelen deprem enerjisi yutulabilmektedir. Süneklik, dayanım azaltma faktörü ve sistem periyodu arasındaki ilişki incelendiğinde her birinin taşıyıcı sistemin depreme karşı gösterdiği tepkide büyük ölçüde etkili oldukları gözlemlenmiştir.

1.2 Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Boore ve Akkar, uzun süreli yer hareketleri ve yer değiştirme spektrumu üzerinde yapılan çalışmaların artmasıyla, bugün yapılan birçok dijital kayıtların bile, uzun süreli yer hareketlerinin gürültü değerlerinin çıkartılmasıyla yapılan filtrelemenin gerekli olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu da hem elastik hem de Elastik ötesi tepki spektrumlarının daha hassas değerlendirilmesi için çok önemli olduğunu açıklamışlardır (Boore & Akkar, 2003).

Paz ve Kim, çalışmasında Elastik ötesi tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerin integresyon yönteminin zaman adımlama alanında çözümü ile analizler yapmıştır. Elastoplastik analiz için zaman adımlama alanında bilgisayar algoritmaları geliştirmiştir (Paz & Kim, 2019).

Chopra, elastik ve Elastik ötesi tepki spektrumunun 1960'lara kadar geliştiğini ve Deprem mühendisliği için önemli bir kavram olan tepki spektrumunun tarihsel gelişimini incelemiştir (Chopra & Anıl, 2015).

Dayanım azaltma faktörü R, elastik tasarım ivme spektrumunda statik sismik kuvveti belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Süneklik esaslı dayanım azaltma faktörü Rμ, deprem yönetmeliklerinin önemli bir parçasıdır. Birçok araştırmacı Rμ'in özelliklerini araştırmış ve ilgili basit ifadeleri tasarım aracı olarak önermiştir (Veletsos & Newmark, 1960), (Miranda, 1993), (Miranda & Bertero, 1994), (Nassar & Krawinkler, 1991), (Newmark & Hall , 1982).

Changhai Zhai ve Lili Xie, çalışmasında Elastik ötesi yapıların sabit süneklik altında, deprem tepki spektrumları üzerindeki sönümleme etkisinin derinlemesine bir araştırmasını sunmuşlardır. Sabit süneklik deprem direnç spektrumundaki sönümleme etkisinin oldukça karmaşık olduğu ve saha koşullarına değil aynı zamanda yapısal periyoduna da bağlı olduğunu gözlemişlerdir. Son olarak, süneklik-dayanım azaltma faktörü-periyot spektrumunun etkisini yaklaşık olarak ölçmek için kullanılacak basitleştirilmiş bir ifade sağlayan Elastik ötesi sistemler için regresyon analizi geliştirmişlerdir (Zhai & Xie, 2005).

1.3 Tezin Amacı

Bu çalışmadaki amaç, kuvvetli yer hareketleri etkisinde Elastik ötesi tek serbestlik dereceli sistemin elastoplastik histeretik davranış modeli kullanılarak, zaman tanım altında doğrusal olmayan bir analiz yöntemi ile öncelikli olarak akmanın ve sönümün ivme, hız ve yer değiştirme spektrumlar üzerinde etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Daha sonra da süneklik, dayanım azaltma faktörü ve periyot arasındaki bağlantı belirlenmeye çalışılmıştır.

1.4 Hipotez

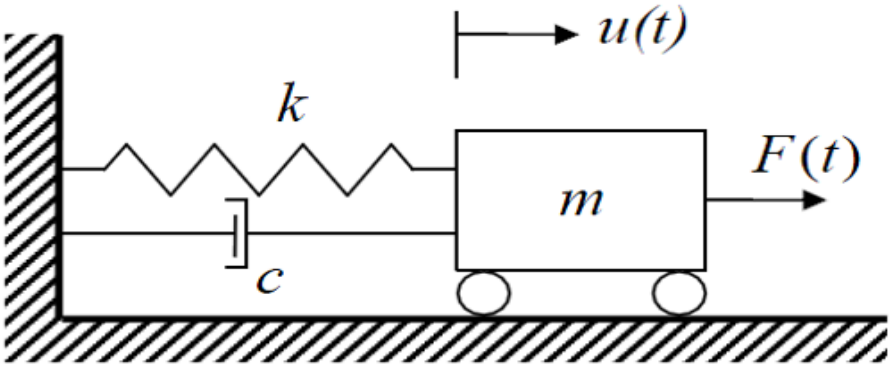
Bu çalışma için Mw>=5 büyüklüğünde, en büyük yer ivmesi ve kaydedildikleri Vs_{30} ortalama kayma dalga hızına bağlı olarak sert ve yumuşak zemin olarak gruplandırılan 22 adet kuvvetli yer hareketi Doğu-Batı ve Kuzey-Güney olmak üzere iki

bileşeni için matlab programı ile 44 yer hareketi için filtrelenme yapılmıştır. Bu Kuvvetli yer hareketlerinin sabit kütleli tek dereceli serbestlik sistemi üzerinde etkisinin farklı sönümlerde %2, %5, %10, süneklik oranı μ =1-2-4-8 değerleri ve T=0.1-3 sn aralığındaki periyot değerleri için akma dayanımı, ivme hız ve yer değiştirme spektrumların elde edilmesi için matlab programıyla analizler yapılmıştır. Daha sonra yumuşak ve sert zemin gruplarının, süneklik oranı μ =1-2-4-8 ve farklı sönüm %2, %5, %10 değerleri ile elastoplastik sistemlerin, dayanım azaltma faktörü ve periyodu arasındaki ilişki ile bu grupların dayanım azaltma faktörü talepleri arasındaki farklar araştırılmıştır.

BÖLÜM 2. TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLERİN DİNAMİĞİ

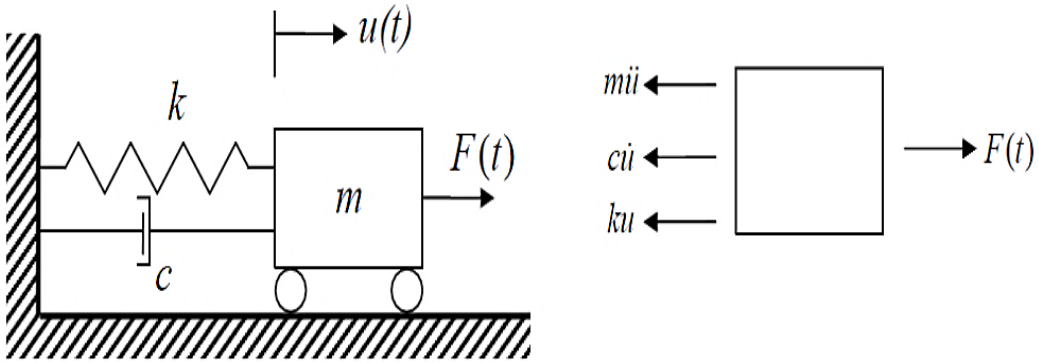
2.1 Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Konumu, tek bir değişkene bağlı olarak belirlenebiliyorsa bu tür sistem Tek Serbestlik Dereceli Sistem olarak anılmaktadır. Şekil 1'de gösterilen sistemde, zemine sabit bağlanmış bir (m) kütlesi, rijitlik yayı (k) olan ve titreşim enerjisi yutan viskoz bir sönümleyiciden (c) oluşmaktadır (Chopra & Anıl, 2015).



Şekil 1 Tek serbestlik dereceli sistem

TSD sistemleri çeşitli dinamik yükler etkisinde olurlar. Deprem Mühendisliği'n de önemli olan yükleme genellikle dış kaynaklı yer sarsıntıları, rüzgar ve patlamalardır. Şekil 2'de gibi bir TSD sistemin dinamik tepkisi bir hareket denklemi tarafından kontrol edilir ve kuvvet denge denklemleriyle belirlenir (Kramer, 2003).



Şekil 2 Zamanın herhangi bir anında kütleye etkiyen kuvvetler

Burada kütleye etki eden ve yerdeğiştiren dış kuvvet F(t), elastik (ya da elastik ötesi) sistemi denge konumuna döndürmeye çalışan direnç kuvveti F_S ve hareketi söndürmeye çalışan F_D kuvveti olarak gösterilir. Hem dış kuvvet hem de yerdeğişimi [u(t)], hız [û(t)] ve ivme [ü(t)] pozitif yönlü kabul edilmektedir. Elastik kuvvet ve sönüm kuvveti sırasıyla yerdeğişimi ve hıza karşı koyan iç kuvvetler olduklarından, ters yönde etkirler. Böylece aşağıdaki denklemi verirler (Chopra & Anıl, 2015).

$$mü_{g(t)}-F_S- F_D = mü \text{ ya da } \quad mü+F_S+F_D = -mü_g(t) \tag{2.1}$$

$F_S = ku$; $F_D = cû$ buradaki ifadeler denklem (2.1) de yerine yazılırsa;

$$mü+cû+ku = -mü_g(t) \text{ olur.} \tag{2.2}$$

Bu denklem ile, kütleye etki eden zamana bağlı dinamik dış etki $mü_g(t)$ etkisinde doğrusal elastik davrandığı varsayılan şekil 2 de idealleştirilmiş yapının yer değiştirmeyi gösteren u(t) hareket denklemidir. Bu denklem Elastik ötesi sistemler içinde kolayca uygulanabilir. Denklem (2.1)'de fs(u) yer değiştirmeye bağlı bir örtük fonksiyon olduğundan tek yapılması gereken, fs = ku yerine Elastik ötesi direnç kuvveti fs(u) kullanılmasıdır (Chopra & Anıl, 2015).

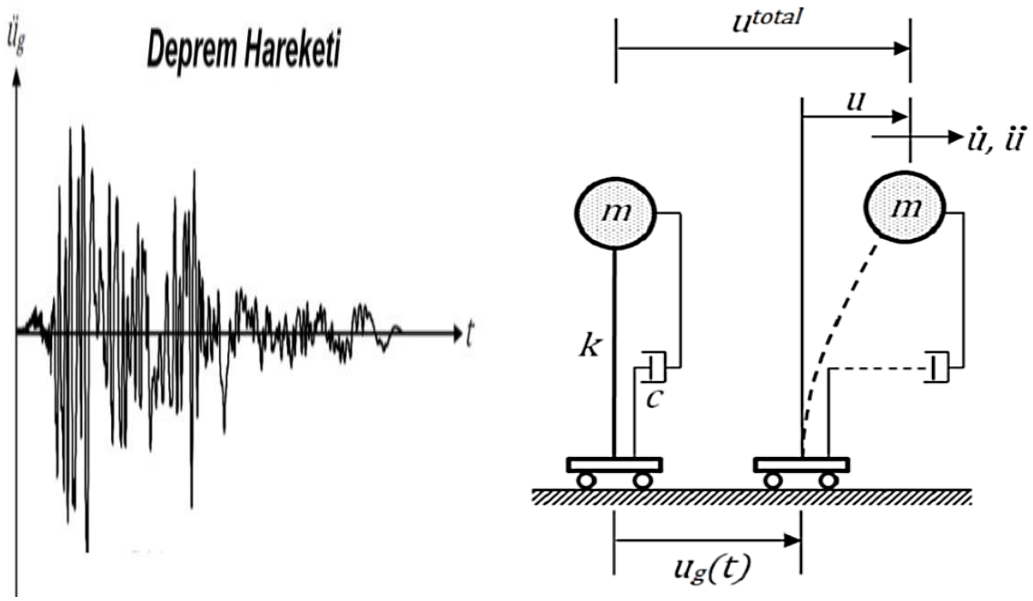
$$mü+cû+ f\text{s}(u) = -mü_g(t) \tag{2.3}$$

Deprem nedeniyle yapının zeminde harekete zorlanmaya çalışılır. Burada zorlamaya çalışan hareket yerin hareketi ug(t) ve kütlenin mesnede göre göreceli yer değiştirme u(t) ile toplanması ile kütlenin toplam yer değiştirmeni verir. (Chopra & Anıl, 2015).

$$u^{toplam}(t) = ug(t)+u(t) \tag{2.4}$$

$$F_I = mü^t \tag{2.5}$$

F_I eylemsizlik kuvveti denklemi (2.4) ile bağlantılıdır.



Şekil 3 Deprem yüklemesi durumunda sistemin davranışı

Şekil 3'de gösterilen TSD deprem yüklemesi üg nin etkisinde hareket eden sistem türetilen denklem (2.1) kullanılarak aşağıdaki denklem

$$ü+2\xi\omega_n û+\omega n^2 u = -üg(t) \quad (2.6)$$

elde edilir.

Elastik ötesi sistemler içinde

$$ü+2\xi\omega_n û+fs(u)/m = -üg(t) \quad (2.7)$$

denklemi elde edilir.

2.3 Serbest Titreşim

Bir TSD sistemi denge konumunda uzaklaştıktan sonra herhangi bir dış etki altında salınmadığı zaman sadece başlangıç şartları sebebiyle titreşiyorsa, bu tür titreşime serbest titreşim denir. Serbest olması titreşim sırasında zamana bağlı herhangi bir dış etkinin bulunmadığına işaret eder. Dış zorlamalar, sistemde sona erdikten sonra veya bir süre sonra kaldırılırsa da salınım devam ediyorsa, yine de serbest titreşim meydana gelir. Böylece serbest titreşimin oluşmasında zorlanmış titreşimin bittiği ve serbest titreşimin başladığı andaki şartlar (yer değiştirme ve hızın değeri) etkili olur. Serbest titreşimi oluşturan değişkenler sistemin doğrudan dinamik özelliklerine bağlıdır (Celep, 2014).

2.3.1 Sönümsüz Serbest Titreşim

Dış zorlama kuvvet etkisinin p(t) = 0 olduğu ve sönümü olmayan sistemler (c=0) denklemi aşağıdaki denklem gibi belirlenir

$$mü+ku = 0 \qquad (2.9)$$

Başlangıçta statik denge konumunda olan kütle, serbest titreşim kütle üzerinde u(0) yer değiştirmesi ve û(0) hızı uygulayıp sistemi başlangıçtaki denge konumundan uzaklaştırmaya neden olur:

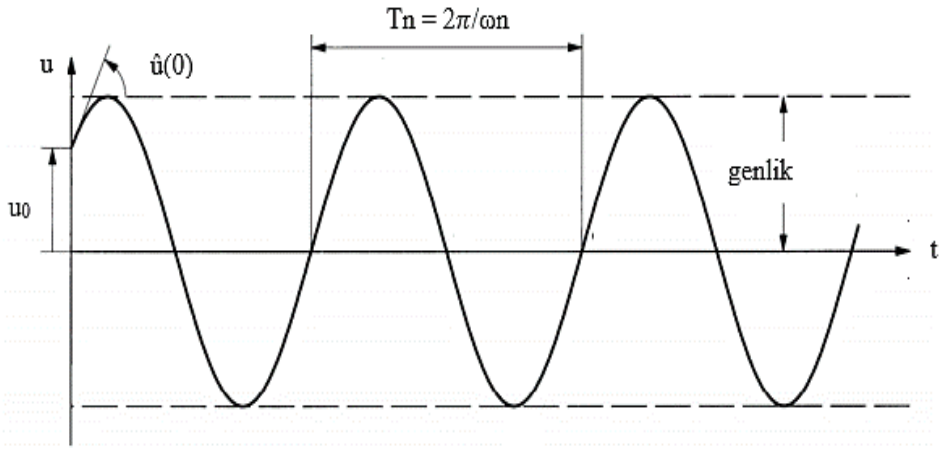
$$u = u(0) \qquad \hat{u} = \hat{u}(0) \qquad (2.10)$$

Bu başlangıç statik denge konumu bağlı olarak bir TSD sistemi sönümlemesiz serbest titreşim için aşağıdaki diferansiyel denklemi (2.11) ve grafiği şekil 4'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$u(t) = u(0)\cos\omega_n t + \frac{\hat{u}(0)}{\omega n}\sin\omega_n t \qquad (2.11)$$

Sistemin sönümlemesiz doğal açısal frekansı k rijitlik ve m kütlesine bağlı olarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (2.12)$$



Şekil 4 sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi

Sistemin doğal, sönümsüz veya serbest titreşim devrini tamamlaması için alınan birimi saniye olan süreye sistemin doğal titreşim periyodu denir.

$$Tn = \frac{2\pi}{\omega n} \quad (2.13)$$

Titreşimin doğal devir frekansı ise periyodun belirli bir zamandaki tekrarlanma devrine denir.

$$fn = \frac{1}{Tn} \quad (2.14)$$

2.3.2 Sönümlü Serbest Titreşim

Gerçek sistemlerde enerjinin kaybolması sürtünme, ısı oluşumu, hava direnci veya diğer fiziksel mekanizmalardan dolayı oluşur. Bu nedenle, TSD sistemin serbest titreşim tepkisi sürtünme etkisiyle zamanla azalacak sönümle etkisi dediğimiz olay meydana gelmiş olur (Kramer, 2003).

Zorlanmış harmonik titreşim etkisinde veya serbest titreşimde bir devirde enerji tüketen katsayıya yani sönüm katsayısının c'nin Kritik sönüm katsayısı cc büyüklüğü $2\sqrt{km}$ oranına, sönüm oranı ξ denir.

$$\xi=\frac{c}{cc} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \text{ veya } \xi=\frac{c}{2m\omega} \quad (2.15)$$

Diferansiyel denklem çözümü, sönüm oranına bağlıdır. ξ<%100(c<cc) olduğu zaman sistem az sönümlemelidir. ξ=%100 (c=cc) olduğunda sistem kritik sönümlemelidir ve ξ>%100 (c>cc) olduğu zaman sistem aşırı sönümlemelidir. Aşırı sönüm denmesinin nedeni denge noktasında salınıma izin vermeyecek kadar büyük veya denge konumundan uzaklaşan sistemin hızla konumuna geri dönmesine neden olduğu bu nedenle tekrarlayan salınımlar yapmadıklarıdır. Ancak Deprem mühendisliğinde ilgi konusu olan yapılar pratikte her zaman az sönüme sahiptir (Yerlici & Luş, 2014).

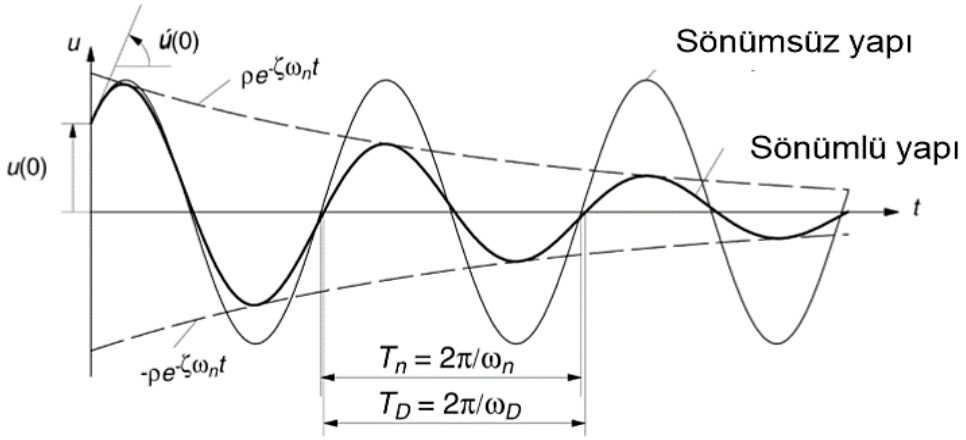
Sönümlemenin kritik sönümleme değeri altında olduğu durum için diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi olur ve bu denkleme bağlı olarak grafiği de şekil 5 gibi olur.

$$u(t)=e^{-\xi\omega nt}[u(0)\cos\omega_D t+\frac{\hat{u}(0)+\xi\omega nu(0)}{\omega D}\sin\omega_D t] \quad (2.16)$$

Sistemin sönümlemeli doğal açısal frekansı

$$\omega_D=\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \qquad (2.17)$$

ile elde edilir.



Şekil 5 sönümün serbest titreşim üzerinde etkisi

2.4 Zorlanmış Titreşim

Zorlanmış titreşimde sisteme dinamik dış etkenlerin deprem hareketinin veya dış kuvvetin etkimesi sonucu ortaya çıkar. Burada TSD sistemin harmonik yük etkisinde davranışı incelenecektir.

2.4.1 Sönümsüz Sistemlerin Harmonik Titreşimi

Harmonik kuvvet p(t) = p_0 = sinωt veya p_0 = cosωt şeklindedir. P_0 kuvvetin en büyük değeri (genliği); ω zorlanmış titreşimin frekansı T = 2π/ω de sistemin zorlama periyodudur.

$$mü + ku = p_0 sinωt \qquad (2.18)$$

Sistemin başlangıç koşullarına bağlı olarak;

$$u=u(0) \qquad û=û(0) \qquad (2.19)$$

sönümsüz zorlanmış harmonik titreşim için aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$u(t) = \underbrace{u(0)\cos\omega_n t + \left[\frac{\hat{u}(0)}{\omega n} - \frac{P0}{k}\,(\omega/\omega n)/(1-(\omega/\omega n)^{\wedge}2\,)\right]\sin\omega_n t}_{\text{Geçici}} \underbrace{+\frac{P0}{k}\,1/(1-(\omega/\omega n)^{\wedge}2\,)\sin}_{\text{Kararlı}} \quad (2.20)$$

Kararlı titreşim veya zorlanmış titreşim deprem hareketin veya dış yükün sisteme tüm süre boyunca neden olduğu titreşimdir. Başlangıç koşulları u(0) ve û(0) dolayı veya sistemde sönümün olması durumunda etkisinin zamanla azalmasından dolayı oluşan titreşime, geçici titreşim veya serbest titreşim denir (Yerlici & Luş, 2014).

2.4.2 Sönümlü Sistemlerin Harmonik Titreşimi

Sönüm hesaba katıldığında TDS sistemi için harmonik kuvvet etkisinin denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$m\ddot{u}+c\hat{u}+ku=p_0\sin\omega t \quad (2.21)$$

Denklem için başlangıç koşulları;

$$u=u(0) \qquad \hat{u}=\hat{u}(0) \quad (2.22)$$

Sönümlü sistem harmonik titreşimi için türevsel denklem aşağıdaki gibi olur;

$$A = u(0) \qquad B = \frac{\hat{u}(0)}{\omega n} + \frac{P0}{2k} \quad (2.23)$$

$$C = \frac{P0}{k}\,\frac{1-(\omega/\omega n)^{\wedge}2}{[1-(\omega/\omega n)^{\wedge}2]^{\wedge}2+[2\xi(\omega/\omega n)]^{\wedge}2} \quad (2.24)$$

Denklem (2.23) ve (2.24) katsayılarına bağlı olarak aşağıda sönümlü sistemin harmonik titreşim denklemi elde edilir;

$$u(t) = \underbrace{e^{-\xi\omega n t}(A\cos\omega_D t+B\sin\omega_D t)}_{\text{Geçici}} + \underbrace{C\sin\omega t+D\cos\omega t)}_{\text{Kararlı}} \quad (2.25)$$

2.4.2.1 Sönümlü Sistemin Harmonik Titreşiminin Faz Gecikmesi

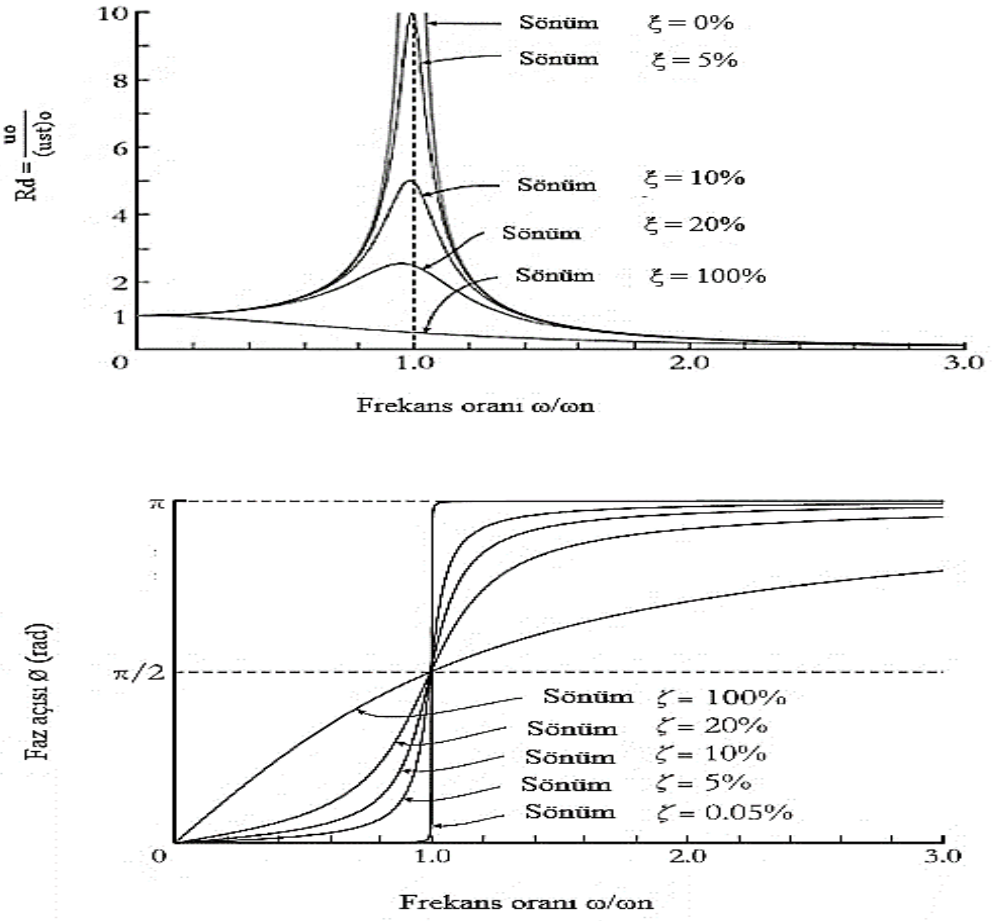
$$u(t) = u_0 \sin(\omega t - ø) = (u_{st})_0 Rd \sin(\omega t - ø) \quad (2.26)$$

Burada Rd şekil değişimi büyütme çarpanı Ø faz açısı ya da faz gecikmesi denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$Rd = \frac{uo}{(ust)o} = \frac{1}{\sqrt{[1-(\omega/\omega n)^2]^2+[2\xi(\omega/\omega n)]^2}} \quad (2.27)$$

$$ø = \tan^{-1} \frac{2\xi(\omega/\omega n)}{1-(\omega/\omega n)^2} \quad (2.28)$$

Sönüm, Rd'yi yani tüm zorlama frekanslardaki yer değiştirme genliğini azaltır.



Şekil 6 Harmonik kuvvetle zorlanan sönümlü sistemin şekildeğişimi büyütme çarpanı ve faz açısı

BÖLÜM 3. DEPREM TEPKİ SPEKTRUMU

3.1 Davranış Spektrumu

TSD sistemlerin dinamik çözümlemesi için herhangi bir yer hareketi karmaşık ve gelişigüzel etkiler olduğundan sayısal yöntemle çözmek gerekir. Deprem hareketleri, farklı frekansa ve genliklere sahip kapalı biçim harmonik titreşimler gibi üst üste gelmesiyle meydana geldiği kabul edilir. Konvolüsyon integrali ile hesaplanarak ivme, hız ve yer değiştirme tepkileri bulunur (Celep, 2017).

$$u(t) = \int_0^t \ddot{u}g(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (3.1)$$

birim itki tepkisi $h(t-\tau)$ denklem 3.2 de gibi kullanılırsa,

$$u(t) = -\frac{1}{\omega D}\int_0^t \ddot{u}g(\tau)e^{-\xi\omega n(t-\tau)}\sin[\omega D(t-\tau)]\,d\tau \quad (3.2)$$

elde edilir. Türevi alınırsa

$$\hat{u}(t) = -\xi\omega n u(t) - \int_0^t\int_0^t \ddot{u}g(\tau)e^{-\xi\omega n(t-\tau)}\cos[\omega D(t-\tau)]\,d\tau \quad (3.3)$$

denklem (3.3)'ünde türevi alınıp üg(t) yer ivmesi eklenerek kütlenin $\ddot{u}^t$ ivmesi hesaplanabilir ve böylece aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\ddot{u}^t = -\omega n^2 u(t) - 2\xi\omega n\hat{u}(t) \quad (3.4)$$

Tasarım ve analizde TSD sistemlerinde oluşacak davranışların zaman içindeki davranışını ayrıntılı belirlemek zor ve gereksizdir. Bunun için belirli bir kuvvetli yer hareketi etkisinde her bir periyoda karşılık gelen maksimum tepe değerlerinin; ivme, hız ve yer değiştirme için tepki spektrumları eğrileri çizilerek bulmak daha kolaydır. Ayrıca bu tepe değerlerinin maksimumu TSD sistemlerinin doğal periyodu ve sönümleme oranına bağlıdır (Housner & Jennings, 1982).

İvme, hız ve yer değiştirmenin maksimum değerleri için ivme tepkisi (Sa), hız tepkisi (Sv) ve yer değiştirme tepkisi (Sd) olarak ifade edilir. Dinamik etkilerin farklı

periyotlara sahip TSD sisteminde neden olduğu hareket genliklerin tek yer hareketi etkisinde oluşturulan bu spektrumlara davranış spektrumları denir (Yerlici & Luş, 2014).

$u_0(Tn,\xi) \equiv \max|\, u(t,Tn,\xi)| \equiv Sd = D$ en büyük göreli (rölatif) yer değiştirme değeri

$\hat{u}_0(Tn,\xi) \equiv \max|\hat{u}(t,Tn,\xi)| \equiv \omega n Sv = V$ en büyük göreli (rölatif) hız değeri

$\ddot{u}^t_0(Tn,\xi) \equiv \max|\ddot{u}^t(t,Tn,\xi)| \equiv \omega n^2 Sd = A$ en büyük toplam ivme değeri

$\omega n = \frac{2\pi}{Tn}$ doğal açısal frekansıdır. Burada V psödo(sözde) hız spektrumu A psödo(sözde) ivme spektrumudur. Bunları gerçek tepki spektrumlarından ayırmak için sözde olarak ifade edilir. V ve A hız ve ivmenin gerçek maksimum değerleri olmasa da kuvvetli yer hareketinin maksimumlarıyla yaklaşık olarak aynı sonucu verirler. (Kramer, 2003)

3.2 Tasarım Spektrumu

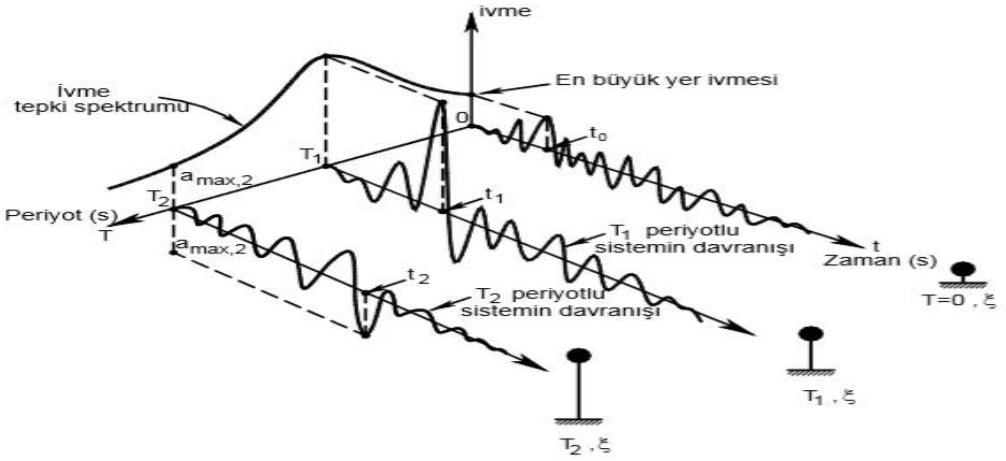
Yapıların depreme karşı tasarımından kullanılan tasarım Spektrumları daha önce kaydedilen kuvvetli yer hareketlerinden faydalanılarak hazırlanır. Bir yer hareketine bağlı olarak çizilen spektrumlar yani davranış spektrumları çok kırıklı parçalardan oluşmaktadır. TSD sistemin periyodundaki küçük bir değişikliğe karşılık birbirinden çok farklı tepki değerleri ortaya çıkmaktadır Buna bağlı olarak, tek bir yer hareketine ait davranış spektrumları doğrudan tasarım için kullanılması güvenli değildir. Bu yüzden tasarım sadece o yer hareketine bağlı olarak çizilen spektrum için geçerli olur. Tasarımı yapılacak yapıların ve olası depremleri temsil etmek üzere yapı periyodundaki küçük değişimlerden spektrum eğrileri üzerinde küçük değişimlerin sebep olması istenir ve bunun için daha yumuşak veya kırıklı olmayan spektrum eğrileri kullanılır. Böylece geçmiş depremlere ait spektrumlardan faydalanılabilir ve bunlar istatistiksel olarak değerlendirilerek tasarım spektrumları çizilmiş olur (Uçar & Merter, 2012).

3.3 Deprem Tepki Spektrumlarının Zeminlerle İlişkisi ve Normalizasyonu

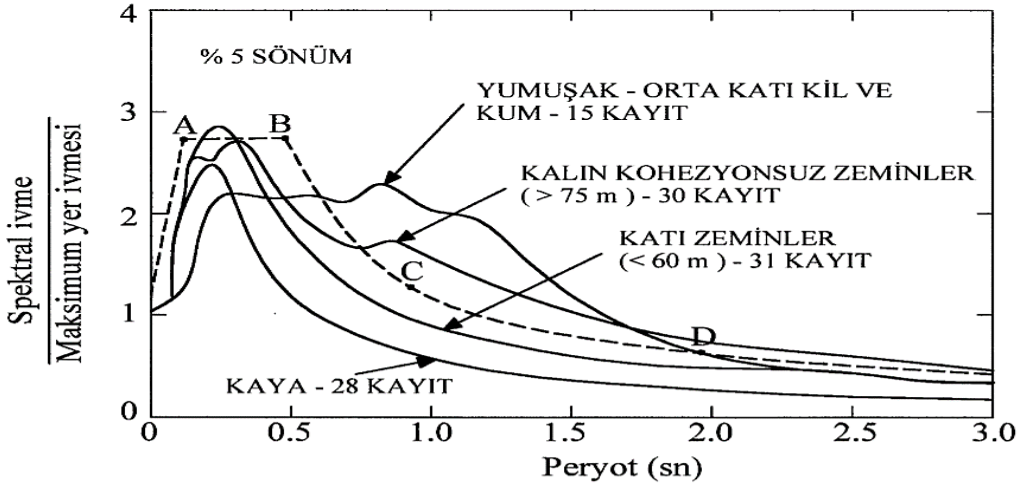
Kuvvetli yer hareketlerinin tepki spektrumları zemin koşullarından önemli derecede etkilenir. Farklı zemin koşullarına ilişkin spektrum eğrilerinin birbirleriyle karşılaştırılabilmesi ve farklı yer hareketlerinin eğrilerinin değerlendirilerek tasarım

spektrumların oluşturulması için istatiksel olarak normalizasyonu yapılmalıdır. Normalizasyon işlemi periyodun sıfır olduğu noktadaki tepki ivmesinin, pik yer ivmesine (PGA) oranlanmasına göre yapılmaktadır. Farklı periyotlara göre ivme spektrum eğrisi şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 8'de gösterildiği gibi yapının sert zemin yerine yumuşak zemin üzerinde yapılması, genelde, yapıda oluşacak ivmelerin daha büyük değer olmasına neden olmaktadır. Belirli bir periyot değerinden sonra sert zeminde bulunan sistemde oluşan maksimum ivme değeri maksimum yer ivmesi ile karşılaştırıldığında yer hareketi titreşimi doğrultuları ile daha az titreşime girdiğini göstermektedir. Bu davranış yumuşak zeminlerde daha ileri periyot bölgesine ulaştığında görülmektedir (Seed & Idriss, 1982).



Şekil 7 TSD sistemlerinin titreşim periyotlarına göre grafiği

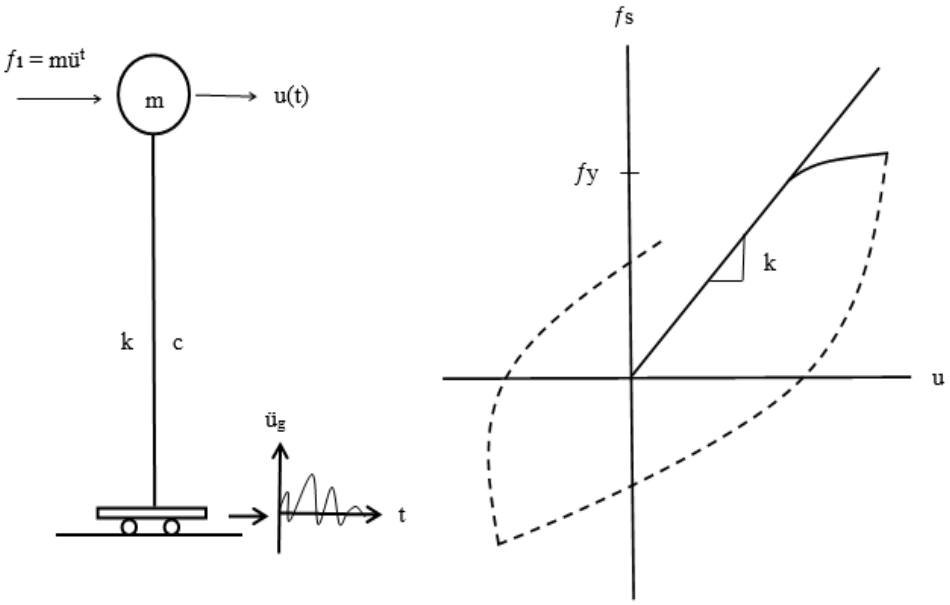


Şekil 8 İvme spektrumunun zeminlere göre değişimi ve normalizasyonu (Seed & Idriss, 1982)

BÖLÜM 4. ELASTİKÖTESİ SİSTEMLERİN DEPREM DAVRANIŞI

4.1 Elastik ötesi TSD Sistemleri

Şiddetli yer hareketleri etkisinde elastik davranış sergileyen yapıların yanal kuvvetleri çok büyüktür. Bu nedenle böyle yüksek yanal kuvvetler için yapıların tasarlanması, yapı elemanlarının boyutları çok büyük ölçülere çıkmasına neden olmaktadır. Yapının hizmet ömrü boyunca küçük bir olasılıkla meydana gelecek kuvvetli bir depremden dolayı ekonomik değildir. Depreme dayanıklı yapı tasarımında tercih edilen yaklaşım elastik dayanım talebinden daha düşük bir kuvveti fy'yi sağlamaktır. Ancak sistemin kuvvetli yer hareketi etkisinde daha düşük bir yanal kuvvet alabilmesi için Elastik ötesi deformasyon yapması gerekir. Deformasyona uğrayan veya yanal yük dirençli fs sistemlerin akma yer değiştirme kapasitesi aşıldığında rijitlik ile sönüm özelliklerin değişkenleşmesiyle doğrusal olmaktan uzaklaşır. Nedeni ise yapı malzeme ve elemanlarının akmaya ve çatlamaya başlamasıdır. Şekil 9'da olduğu gibi rijitliğin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı gösterilmiştir (Sucuoğlu & Akkar, 2014).



Şekil 9 Elastik ötesi TSD sistemlerin kuvvet-deformasyon ile yer değiştirme ilişkisi

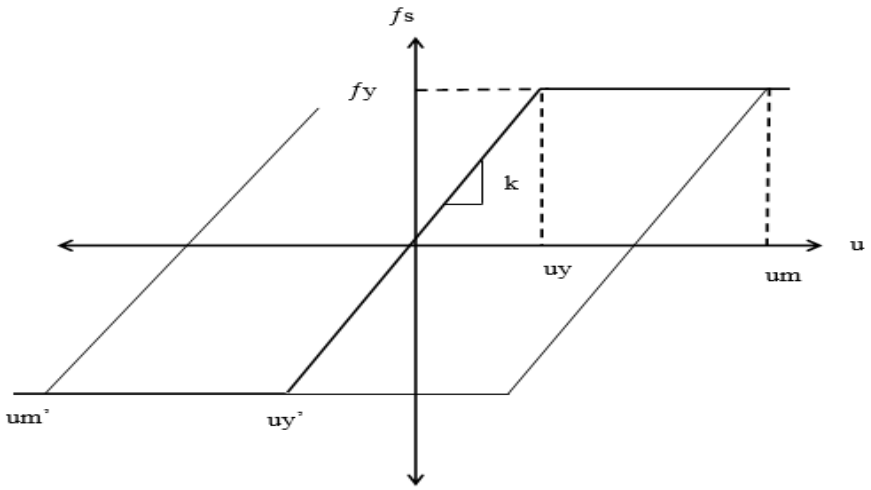
4.2 Çevrimsel Davranış Modelleri

Elastik ötesi davranış spektrumu sadece, kuvvetli yer hareketinin özelliklerine bağlı olmayıp, aynı zamanda, yapı modellerinin doğrusal olmayan çevrimsel davranış modeli özelliklerine de bağlıdır (Elnashai & Sarno, 2015).

Bu Elastik ötesi çevrimsel davranışlar modelleri, yapı sistemi ile onları oluşturan malzeme özellikleri ve sönüm mekanizmasını iyi bir şekilde temsil etmelidir. Doğrusal davranmayan sistemler için daha önce verilen dinamik sayısal hesaplar kullanılır. Bu modelleri ifade etmek amacıyla çeşitli idealleştirmeler yapılmıştır. Elasatikötesi TSD sistemlerin kuvvet (deformasyon) ile yer değiştirme ilişkisi açısında, uygulamada kullanılan çeşitli çevrimsel davranış modelleri mevcuttur (Yerlici & Luş, 2014).

4.2.1 Elastoplastik Model

Yük ile yer değiştirme eğrisi çatlamış kesit davranışını gösteren elastik bir bölümle ifade edilir. Kesitin akması sonrasında pekleşme göz önünde bulundurulmaz. Sistemin akmaya başlamasıyla yükün boşaltılması çatlamış kesitin rijitliği tarafından gerçekleştirilir (Şekil10). Yükün boşaltılması çatlamış kesitin rijitliği tarafından gerçekleştirilmesi betonarme birleşim noktalarının tekrarlı yükleme deneyinin sonuçları ile tezatlık oluşturur. Deneysel çalışmaların sonuçları ile uyuşmayan bir davranış modeli olmasına rağmen tersinir yüklemede sabit başlangıç rijitliği kullanılır. Modelde, küçük genlikli yer değiştirmeler sırasında herhangi çevrimsel enerji yutumu sağlamamaktadır. Bu model üç adet kuralla tanımlanan basit bir modeldir (yükleme, yükün boşaltılması ve yüklemenin diğer yönde yapılması durumlarında rijitlik tanımlayarak). Elastoplastik modelin oluşturduğu çevrimsel davranış ile betonarme elemanlarında gözlenen davranışları arasındaki benzerlik azdır. Bu model basitliğinden dolayı önceleri uygulama da sıkça kullanılmış ancak bu modelin betonarme yapılar için kullanımı uygun olmadığı belirlenmiştir (Saiidi, 1982).

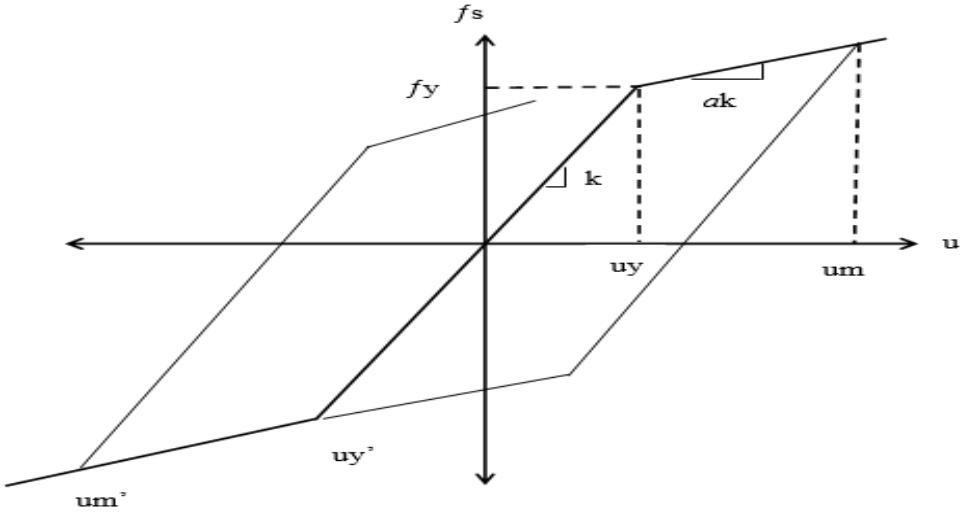


Şekil 10 Elastik mükemmel plastik model

4.2.2 Bilinear Model

Bu model çelik için pekleşme etkisini içermesi haricinde deprem mühendisliğinde kullanılan temel çevrimsel modellerden biridir ve elastoplastik modelle aynıdır (Şekil 11). Bu modelde iki rijitlik bulunmaktadır genel olarak ikinci rijitliğin sıfır olmasıyla bilinear modelin özel hali olan elastoplastik model olmaktadır. Bu modelde herhangi bir şekilde rijitlikten kayıp olmadığı belirtilmektedir. Buna rağmen yön değiştirme yüklemesi ve akma sonrası koldan yükün boşaltılması sırasında rijitliğin azalım davranışında modelin eksiklikleri olduğu söylenmektedir (Saiidi, 1982).

Bu çevrimsel davranış betonarme modeli üç kuralla açıklanmıştır (başlangıç rijitliği, akma sonrası ikinci rijitlik ve akma yer değiştirme). Bu model ana iskelet eğrisi akma ve yükün boşaltılması sonrası rijitliğin bir tekrar yükleme eğrisidir. Bu karakteristik, çatlakların kapanmasını göz önünde bulundurmaz, bu nedenle aşırı enerji yutumu ve gerçekçi olmayan kalıcı deformasyon yer değiştirmeleri ile sonuçlanır (Lestuzzi & Badoux, 2003).

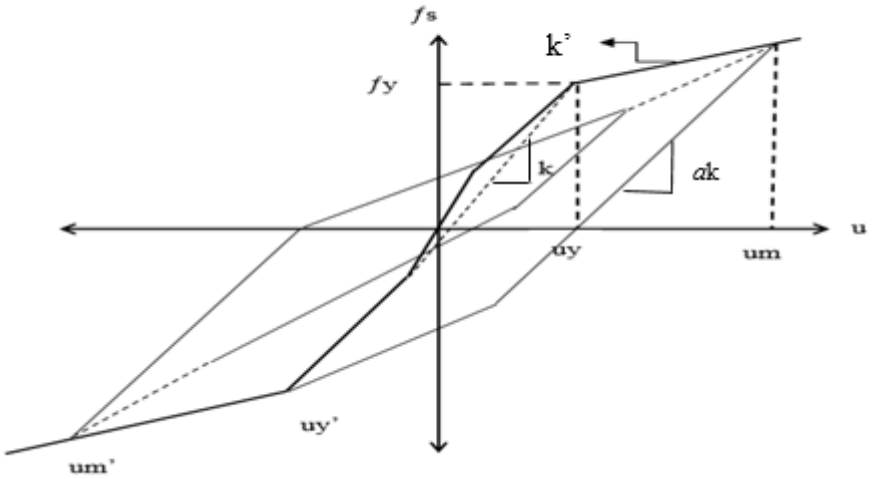


Şekil 11 Çift doğrulu (Bilinear) model

4.2.3 Takeda Modeli

Takeda çevrimsel davranış modeli birçok deneysel çalışmayla geliştirildiğinden çok özel bir modeldir. Belirli olarak eğilme davranışını ifade eder. Ayrıca betonarme birleşim bölgelerinin davranışını tanımlamada ve betonarme yapıların yön değiştiren tekrarlı yükler altında davranışının belirlenmesinde büyük kabul görmüş olan bu model, sabit eksenel kuvvete maruz betonarme elemanların davranışını, yükleme çevrimlerinde kararlılığın kaybetmediğinden, yer değiştirme seviyelerini iyi bir şekilde gösterir (İlki, 2000).

Takeda çevrimsel davranış modeli çatlamamış, çatlamış ve akma yer değiştirme sonrası adımları gösteren üç doğrulu iskelet eğrisi modelidir (Şekil 12). Bu nedenle iki doğrulu modellerde göz önüne alınamayan çatlama sonrası görülen rijitlik değişimini de göz önünde bulunduran bir modeldir (Pakyürek, 2006).



Şekil 12 Takeda modeli

$$a = \left(\frac{uy}{um}\right)^{0.5} \quad (4.1)$$

k': Akma sonrası koldan yük boşaltma kısmına olan rijitliği

k: Elemanın bir yönde akmaya başladığı nokta ile diğer yönde çatlamaya başladığı noktaları birleştiren doğrunun eğimi

um: Yükleme yönündeki maksimum yer değiştirmesi (dönme, çökme veya eğrilik)

uy: Akma yer değiştirme

4.2.4 Q Model

Q çevrimsel davranış modeli daha önce anlatılan Takeda modelinin daha sadeleştirilmiş halidir. Bu modelde kullanılan iskelet eğrisi, akma sonrası kol ile yükselen çift doğrulu bir eğridir (Şekil 13). Rijitlik azalımı yükün boşaltılması ve tersinir yükleme kısımlarında oluşur. İskelet eğrisinde akma yer değiştirme sonrası doğrusal olmayan kısmındaki yük boşaltma rijitliği, k_Q olarak ifade edilir (Saiidi & Sozen, 1979).

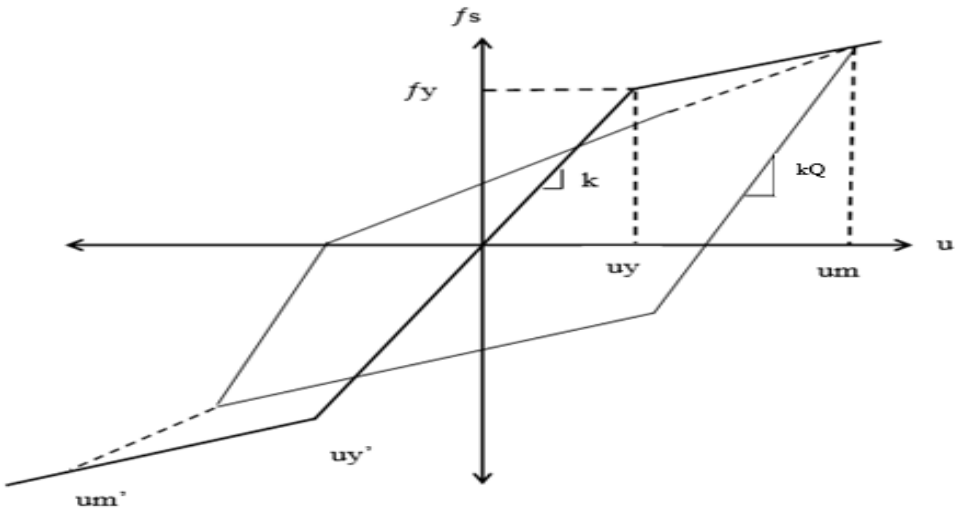
$k_Q = k(\frac{uy}{um})^{0.5}$ (4.2)

k: Elastik bölümünün rijitliği

um: Maksimum mutlak yer değiştirmesi

uy: Akma yer değiştirmesi

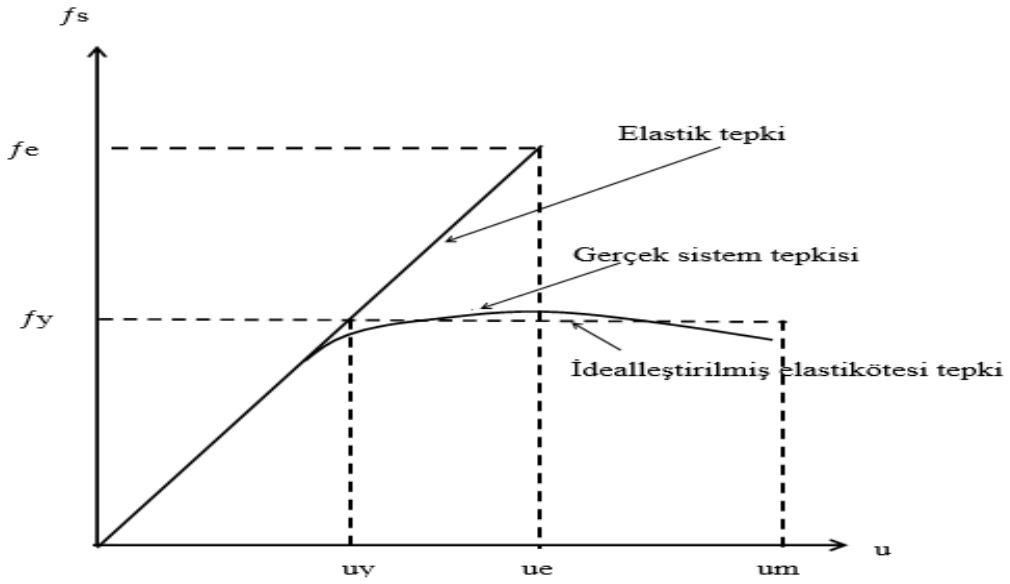
Bu modeli daha kullanışlı hale getirmek için her iki yöndeki uç noktaları her biri için en büyük uç noktası olmaktadır. Tersinir yükleme aşamasındaki rijitlik, en büyük uç noktası ile yer değiştirme ekseni ve son olarak yük boşaltma kolunun kesiştiği noktayı birleştiren eğrinin eğimidir. Q modeli, kesit en az bir yönde akmışsa düşük genlikli yer değiştirmeler sırasındaki çevrimsel enerji saçılımı hesabını dikkate almaktadır (Pakyürek, 2006).



Şekil 13 Q modeli

4.3 Süneklik

Kuvvetli yer hareketi etkisi altında olan sistemlerin taşıma gücünden bir azalma olmadan, taşıyıcı sistemdeki elemanın elastik olmayan şekil değiştirme, taşıyıcı sistemin ise Elastik ötesi deformasyon yer değiştirme yapabilme özelliğidir. Enerji yutabilme kapasitesidir. (Celep, 2017)



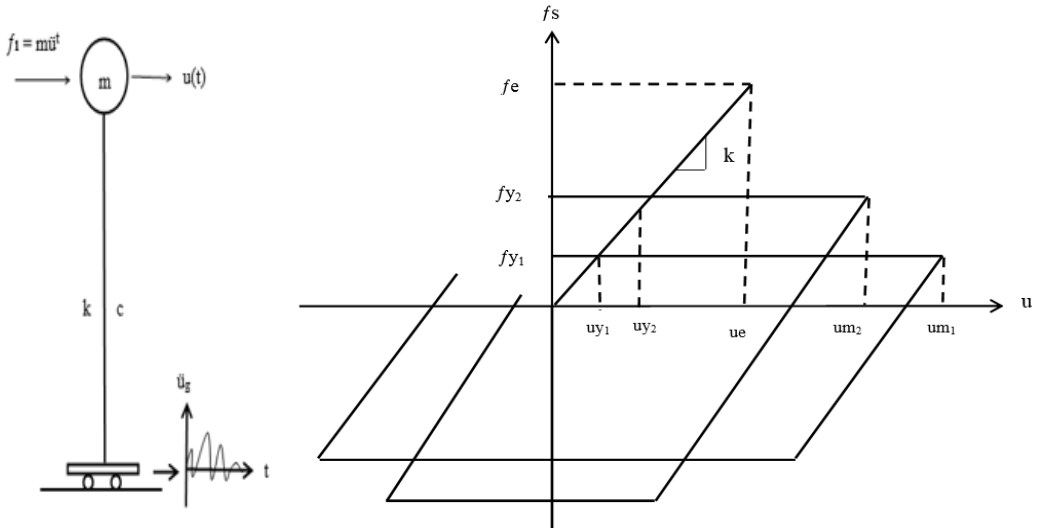
Şekil 14 Elastoplastik kuvvet yer değiştirme ilişkisi

Burada f_y idealleştirilmiş elastoplastik sistemin akma dayanımı olup, başlangıçtaki kuvvet f_y'den küçük kaldığı sürece k rijitliği doğrusal elastik davranır. Sistem f_y Akma kuvveti değerine ulaştığında sistem akmaya başlar ve Elastik ötesi davranış sergiler. f_y değerinden dolayı oluşan yer değiştirme uy akma yer değiştirmedir.

$$f_y = ku_y \tag{4.3}$$

Maksimum mutlak yer değiştirme um ile f_y değerinden dolayı oluşan uy akma sınırındaki yer değiştirme oranına süneklik oranı denir. Elastik ötesi sistemlerde um maksimum yer değiştirmesi, akma yer değiştirme uy değerini tanım gereği aşar. Bu nedenle μ süneklik oranı 1'den büyük olur.

$$\mu = \frac{um}{uy} \tag{4.4}$$



Şekil 15 Aynı başlangıç rijitliğine sahip, farklı akma dayanımlarına bağlı yer değiştirme grafiği

Deprem yer hareketi etkisi altında olan aynı başlangıç rijitliği ve periyoduna sahip olan doğrusal olmayan sistemlerde akma dayanımı ile sınırlandırılmış bir direnç kuvveti geliştirilir ancak bu daha büyük yer değiştirmelere neden olur. Şekil 15'de görüldüğü gibi daha düşük akma dayanımı ile sınırlandırılan sistemler daha fazla deforme olurlar. Bu yüzden sistem en çok um_1 ondan sonra daha düşük maksimum yer değiştirme olan um_2 ile deforme olurken, en az deforme doğrusal elastik sistemlerde daha azami bir yer değiştirme olan ue ile olduğu görülmektedir. um_1 um_2 ve ue burada deprem deplasman talebi, kuvvetler ise f_e elastik kuvvet talebi olup, f_{y1} ve f_{y2} de akma dayanımlarıdır. Süneklik oranı talebi (μ_e=1) ise sistem doğrusal elastiktir (Sucuoğlu & Akkar, 2014).

$$f_{y1}<f_{y2}<f_e \quad \text{ise} \quad \mu_1>\mu_2>\mu_e \tag{4.5}$$

4.4 Elastik ötesi TSD Sistemlerin Süneklik ve Akma Dayanımı Spektrumu

$\mu_i = \frac{umi}{uyi}$ her bir T_i periyoduna karşılık gelen bir spektrum çizilir bu spektruma süneklik spektrumu denilir. Farklı fy akma dayanımları için bu işlem, sabit dayanım altında süneklik spektrumu elde edilir. fy değerleri genellikle grafiksel olarak mg oranı olarak ifade edilir. Daha sonra süneklik spektrumunu grafiksel interpolasyon ile akma dayanımı spektumuna dönüştürebiliriz. Süneklik spektrumunda Sabit bir süneklik değerine karşılık gelen her bir fy eğrisini farklı periyotlarda keser, farklı sabit süneklik

değerleri için bu işlem tekrarlandığında, akma dayanım spektrumu olarak adlandırılan bir sabit süneklik eğrileri takımı elde edilir (Sucuoğlu & Akkar, 2014).

4.5 Dayanım Azaltma Faktörü (Rμ)

Rμ dayanım azaltma faktörü, elastik doğrusal sistemlerde deprem nedeniyle oluşacak elastik kuvvet talebi f_e'nin en büyük değeri ile akma dayanımı f_y oranı veya elastik yer değiştirmenin tepe değeri u_e ile akma yer değiştirmesi u_y oranı olarak tanımlanır. Rμ değeri doğrusal elastik sistemlerde 1'e eşittir. Çünkü dayanım azaltma faktörünün 1'den büyük olması deprem esnasında sistemin doğrusal elastik kalacak kadar güçlü olmadığı, sistemin bu durumda akmaya başladığını ve böylece Elastik ötesi davranış yapacağını gösterir (Sucuoğlu & Akkar, 2014).

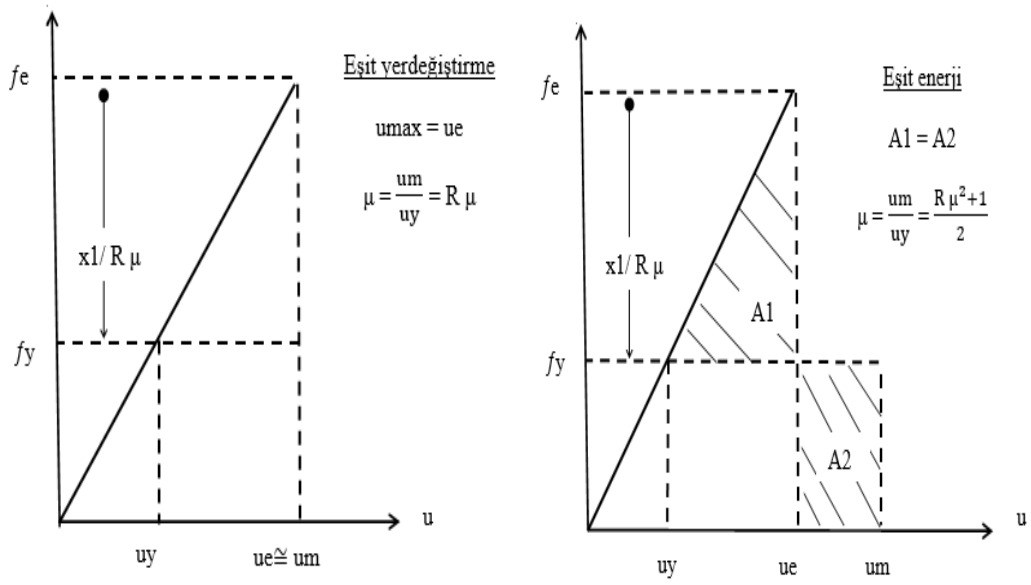
$$R\mu = \frac{fe}{fy} = \frac{ue}{uy} \tag{4.6}$$

4.6 Eşit Yer değiştirme ve Eşit Enerji Kuralı

Rijitliği yüksek olan sistemlerin veya doğal titreşim periyodunun kısa bölgelerinde olan sistemlerde elastik ve elastoplastik kuvvetlerin eşit olduğu kabul edilir. Böylece dayanım azaltma faktörü (Rμ=1) değerine yakınlaşır. Bu da dayanımda azaltmaya izin verilmediğini gösterir. Ancak Elastik ötesi yer değiştirme elastik yer değiştirmeye göre sünekliği kadar büyük olur (Celep, 2017).

Orta uzunluğa sahip periyot bölgesinde elastik ve elastoplastik sistemin neredeyse aynı miktarda enerji tükettikleri kabul edilir. Burada hem elastik yer değiştirme hem de elastoplastik yer değiştirmenin enerjisinin eşit olduğu kabul edilir. Dayanım azalma faktörü $\mu = \frac{R\mu^2+1}{2}$ bu şekilde tanımlanır (Yerlici & Luş, 2014).

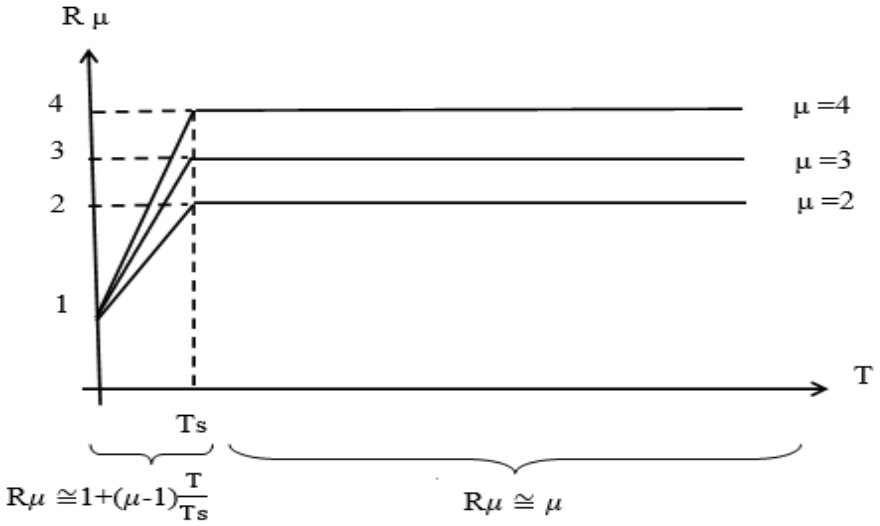
Uzun periyot bölgelerinde ise elastik ve elastoplastik davranışın maksimum yer değiştirme tepe değerlerinin eşit olduğu kabul edilir. Burada periyotların kısa, orta ve uzun olarak belirlenmesi zemin özellikleri ve sönüm etmenlerine bağlı olduğu bilinmelidir. Burada dayanım azaltma faktörü Rμ = μ eşit olur. Burada elastik ve elastoplastik sistemin yer değiştirmeleri eşit olsa da elastoplastik davranışın akma kuvveti elastik sistem kuvvetinin süneklik değeri kadar azaltılır (Celep, 2017).



Şekil 16 Eşit yer değiştirme ve eşit enerji

Eşit enerji kuralına göre verilen $\mu = \frac{R\mu^2+1}{2}$ bu eşitlik tasarımda güvenli olmadığı için kullanılmaz. Bu eşitlik yerine tasarım için güvenli olan ($R\mu \cong 1+(\mu-1)\frac{T}{Ts}$) bu ampirik eşitlik kullanılır (Paulay & Priestley, 1992). T sistemin doğal titreşim periyodu, Ts ise depremin hakim periyodu veya köşe periyodudur.

Belirli bir deprem yer hareketi etkisinde aynı başlangıç periyoduna sahip elastik ve Elastik ötesi TSD sisteminin, dayanım azaltma faktörü Rμ için katsayılar değiştirilerek çözülür ve karşı gelen yer değiştirme süneklik oranı değerleri μ belirlenir. Aynı işlem farklı periyot değerleri için de yinelenerek belirli bir yer değiştirme sünekliğine karşı dayanım azaltma faktörünün periyot ile olan değişimi elde edilir. R μ- μ -T olarak adlandırılan bu spektrumlar yardımıyla Elastik ötesi analiz prosedürünün karmaşık ve gerek tasarım amaçlı veya yapısal analizi amaçlı külfetli olduğundan depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan yanal kuvvetin tepe değerini azaltmakta kullanılan bir dayanım azaltma faktörü (Rμ) kullanmak daha pratiktir. Tek dereceli serbestlik doğrusal olmayan sistemlerin belirli bir deprem yer hareketi etkisi altında maksimum yer değiştirme dinamik hesabına gerek kalmadan belirlenmiş olur (Uçar, 2018).



Şekil 17 Rμ-μ-T idealize edilmiş tasarım spektrumu

$$R\mu = \frac{fe}{fy} = \frac{fe/m}{fy/m} = \frac{Sae}{Sai} \quad \text{ve} \quad R\mu = \frac{fe}{fy} = \frac{kue}{kuy} = \frac{Sde}{Sdi/\mu} \tag{4.7}$$

$$Sai = \frac{Sae}{R\mu} \quad \text{ve} \quad Sdi = \frac{\mu}{R\mu} Sde \tag{4.8}$$

İdealize edilmiş Rμ-μ-T tasarım spektrumuna göre, yukarıda verilen denklemlere göre elastik ivme spektrumu Sae ve elastik yer değiştirme spektrumu Sde, süneklik azaltma faktörü ve süneklik oranına bağlı olarak denklem (4.7) ile elastik olmayan Sai ivme spektrumu ve denklem (4.8) ile Sdi elastik olmayan yer değiştirme spektrumu elde edilir.

Aşağıdaki eşitliklerin davranış spektrumları çizilebilir:

$$Dy = uy \qquad Vy = \omega n uy \qquad Ay = \omega n^2 uy \tag{4.9}$$

Dy elastoplastik sistemdeki akma yer değiştirme uy değeridir. Sabit bir süneklik oranı için Dy ile Tn ilişkiyi gösteren eğriye akma yer değiştirme davranış spektrumu denir. Aynı benzer ilişki Vy ve Ay eğrileri olarak, sözde hız ve ivme davranış spektrumları elde edilir (Chopra & Anıl, 2015).

Elastoplastik sistemin akma dayanımı,

$$fy = kuy = m(\omega n^2 uy) = mAy = \frac{Ay}{g} w \tag{4.10}$$

olarak tanımlanır; w = mg, sistemin ağırlığıdır.

yer değiştirmenin bulunması,

$$um = \mu\, uy \tag{4.11}$$

$$um = \mu \left(\frac{Tn}{2\pi}\right)^2 Ay \tag{4.12}$$

Denklem (5.13) benzer şekilde elastik sistemin direnç kuvveti,

$$f_e = ku_e = k(\omega n^2 u_e) = mA = \frac{A}{g} w \tag{4.13}$$

olarak tanımlanır. Burada A, doğrusal elastik sistemin sözde ivme davranış spektrumudur.

4.7 Nassar ve Krawinkler

Nassar ve Krawinkler ABD yapılan istatiksel analizinden elde edilen dayanım azaltma faktörü için bir ilişki geliştirmişlerdir. Bu çalışmada alüvyon zemin ve kaya zeminde kaydedilmiş 15 yer hareketine karşı tek dereceli serbestlik Elastik ötesi sistemler üzerindeki taleplerini ve sistemlerin bu talebe karşı gösterdikleri tepkiler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma da kullanılan yer hareketi kayıtları farklı zemin guruplarından toplanmıştır. Ancak saha koşullarının etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. Bu çalışmada sönüm değeri %5 alınarak, yapının hakim periyodu, sistemin pekleşme oranı ve malzemenin Elastik ötesi davranışlarının dayanım azaltma faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen bu sonuç neticesinde araştırmacılar tarafından sistemin pekleşme oranın dayanım azaltma faktörü üzerine etkisinin önemsenmeyecek kadar az etkili olduğu sonucuna varmışlar (Elnashai & Sarno, 2015). Dayanım azaltma faktörünü hesaplamak için Pekleşme oranları için katsayılar verilmiştir.

Tablo 1 Dayanım azaltma faktörü için pekleşme oranına göre katsayılar

pekleşme oranı	katsayılar	
a (%)	a	b
0	1	0,42
2	1	0,37
10	0,8	0,29

$$R\,\mu = [c(1 - \mu) + 1)]^{1/c} \quad (4.14)$$

$$c(T,a) = \frac{1+T^a}{1+T^a} + \frac{b}{T} \quad (4.15)$$

4.8 Newmark ve Hall

Süneklik azaltma faktörü süneklik ve periyot tasarım spektrumu için uzun periyotlu esnek sistemlerde ve aynı başlangıç rijitliğine sahip elastik ve sünek sistemlerin nerdeyse aynı yer değiştirmeye ulaştığı görülmüş süneklik azaltma faktörü süneklik oranına eşit olarak kabul edilebilir daha önce bahsedilen eşit yer değiştirme kuralıdır. Orta periyot bölgelerinde elastik ve elastoplastik sistem aynı miktarda enerji tüketir. Kısa periyotlu rijit sistemlerde sünek sistemin yer değiştirme elastik sistemin yer değiştirmenden sünekliği kadar büyük olur ancak elastik ve elastoplastik sistem aynı kuvvetle zorlanırlar ve bu da eşit kuvvet yaklışımı olarak benimsenir (Elnashai & Sarno, 2015).

Dayanım azaltma faktörü için Newmark ve Hall tarafından zemin koşullarına bakılmaksızın elastoplastik sistemler için önerilen ilişkiler aşağıda verilmiştir.

$$R\,\mu = 1 \qquad T < 0.03s \quad (4.16)$$

$$R\mu = \sqrt{2\mu - 1} \qquad 0.12s < T < 0.5s \quad (4.17)$$

$$R\,\mu = \mu \qquad T > 1s \quad (4.18)$$

Ara periyotlar için de doğrusal interpolasyon yapılması önerilmektedir.

BÖLÜM 5. TSD SİSTEMLERİNİN SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Elastik ve Elastik ötesi sistemler için, sistemin doğrusal davranmadığı durumlarda hareket denklemleri için analitik çözümler bulmak genelde zordur. Bu problemlerin çözümü için, sayısal integrasyon ile çözümler üretmekte kullanılan zaman adımlama yöntemleriyle bulunur. Bir TSD sisteminin deprem yer hareketi etkisi altında sistemin kütlesi, rijitliği ve sönüm özellikleri bilindiği zaman dinamik hareket sayısal çözüm yöntemleri ile bulunur. Bu sayısal yöntemler küçük zaman adımlarıyla tekrarlanarak istenilen zaman aralığındaki davranışı bulunur (Chopra & Anıl, 2015).

5.1 Zamanı Adımlama Yöntemleri

Başlangıç koşulları aşağıdaki gibi olduğu varsayılarak:

$u_0 = u(0) \quad \hat{u}_0 = \hat{u}(0)$

t=ti ve $t=t_{i+1}=ti + \Delta t$ durumunda Δt çok küçük bir zaman değerinde

$$m\ddot{u}_i + c\hat{u}_i + ku_i = P_i \quad \text{veya } -m\ddot{u}g_i \tag{5.1}$$

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\hat{u}_{i+1} + ku_{i+1} = P_{i+1} \tag{5.2}$$

Bu iki denklemi birbirinden çıkarırsak küçük zaman aralığındaki,

$$m\Delta\ddot{u}_i + c\Delta\hat{u}_i + k\Delta u_i = \Delta P_i \tag{5.3}$$

Doğrusal davranmayan sistemin sayısal hareket denklemi

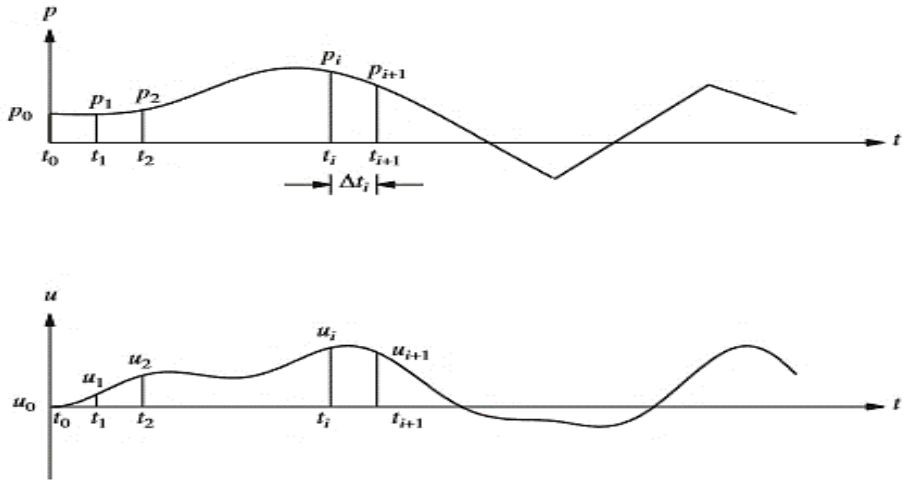
$$m\ddot{u}_i + c\hat{u}_i + fs_i = P_i \quad \text{veya } -m\ddot{u}g_i \tag{5.4}$$

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\hat{u}_{i+1} + fs_{i+1} = P_{i+1} \tag{5.5}$$

Bu iki denklemi birbirinden çıkarırsak küçük zaman aralığındaki,

$$m\Delta\ddot{u}_i + c\Delta\hat{u}_i + \Delta fs_i = \Delta P_i \tag{5.6}$$

değişimi elde edilir. Elastik ötesi sistemlerde $fs(u)$ direnç kuvveti hem yer değiştirme geçmişine hem de hızın i anındaki durumuna bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 18 Zaman adımlama yöntemleri için kullanılan gösterim

5.2 Newmark Yöntemi

Newmark N.M. çalışmasında yapıların düzensizliğine rağmen tüm kuvvetlerin oluşturduğu yer değiştirmeleri hesaplamak için elastik ve Elastik ötesi yapı davranışların hem doğrusal hem de ortalama ivme yöntemleri için, ivmenin integrasyona dayanan zamana bağlı adım adım çözüm yöntemi önermiştir. (Yerlici & Luş, 2014)

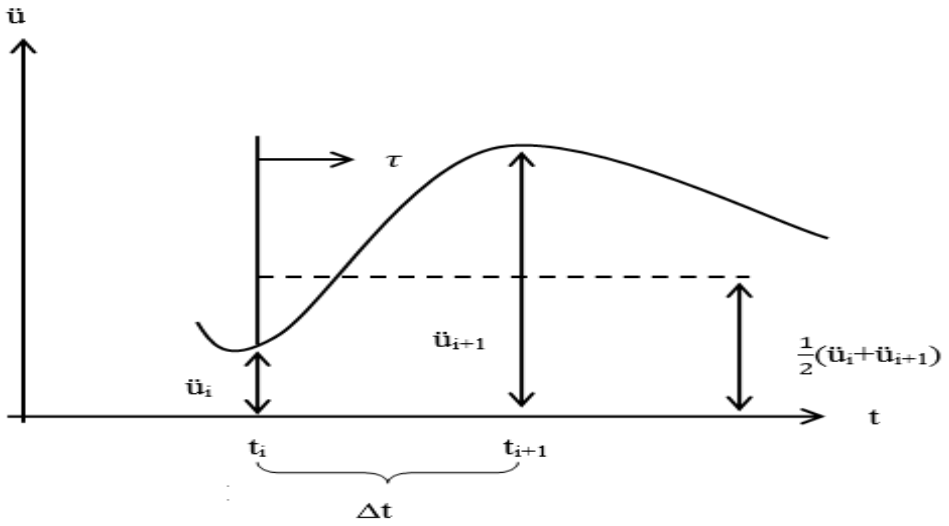
$$\hat{u}_{i+1} = \hat{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\, \Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (5.7a)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\hat{u}_i + [(0{,}5 - \beta)(\Delta t^2)]\ddot{u}_i + [\beta(\, \Delta t^2)]\ddot{u}_{i+1} \quad (5.7b)$$

β ve γ katsayıları ivmenin bir adım içindeki değişimini tanımlayarak bu yöntemin doğruluğunu kararlığını belirler. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ için doğruluk dahil iyi sonuç verir. Bu yöntemde doğrusal sistemlerin hesabında Newmark'ın denklem (5.7) ve (5.4) de yaklaşımı değiştirilip döngü hesabına gerek kalmadan çözüm üretilir. Ancak doğrusal olmayan sistemlerde tepki kuvveti yer değiştirmeye orantılı ve sönüm kuvveti hızla orantılı olmadığı için döngülü yaklaşım kullanılmalıdır (Chopra & Anıl, 2015).

5.2.1 Newmark Ortalama İvme Yöntemi

Çok küçük zaman aralığında, t_i ile t_{i+1} noktaları arasında ivmenin bu aralıkta sabit olduğu ve bu i başlangıç ile i+1 sonundaki noktalar arasında ivmenin bu iki nokta arasında değerlerin ortalamasına eşit olduğu kabul edilir.



Şekil 19 Δt zaman aralığında gerçek ve tahmini ivme

$$\ddot{u}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \; ; \qquad 0<\tau<\Delta t \tag{5.9}$$

Denklem (5.9) göre aşağıda sabit ortalama ivme kabulüne göre integralleri alınarak Δt zaman değişiminden hız ve yer değiştirme elde edilir. Burada bu kabullere dayanarak ivme, hız ve yer değiştirme denklemleri elde edilir. Başlangıç koşulu olarak û(t=0) ve u(t=0) veya bir önceki işlemin sonuçları olarak belirlidir. Bu koşulu dayanarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

Artımlı ivme için;

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{4}{\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{4}{\Delta t}\hat{u}_i - 2\ddot{u}_i \tag{5.10}$$

Artımlı hız için;

$$\Delta\hat{u}_i = \frac{2}{\Delta t}\Delta u_i - 2\hat{u}_i \tag{5.11}$$

Artımlı yer değiştirme için;

$$\hat{K}_i \Delta u_i = \Delta\hat{P}_i \tag{5.12}$$

Burada $\hat{K}$ dinamik rijitlik aşağıdaki denklemle elde edilir;

$$\hat{k} = k + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4m}{\Delta t^2} \tag{5.13}$$

$\Delta\hat{p}_i$ ise efektif dinamik yük artımıdır. Denklemi aşağıda verilmiştir;

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + [\frac{4m}{\Delta t} + 2c]\hat{u}_i + 2m\ddot{u}_i \quad (5.14)$$

$$\Delta P_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) \quad (5.15)$$

Burada bir sonraki adım için

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta\hat{u}_i + \hat{u}_i$

$\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

t değerine ulaşana kadar bir sonraki adım için böylece tekrarlanır.

Bu yöntem her koşulda dengeli çözümler üretir. Δt adım aralığı ne kadar büyük olursa olsun, bir adımda ortaya çıkan hata bir sonra gelen adımla büyümez. Bu özelliği nedeniyle genelde doğrusal ivme yöntemi yerine kullanılır. Bu yöntemde adım aralığının seçiminde sadece dış etkinin uygun şekilde belirlenmesi yeterli olur. Bu yöntemde $\frac{\Delta t}{Tn}$ <10 için yeteri kadar doğru sonuç elde edilir. Tn doğal titreşim periyodudur (Celep, 2014).

Elastik ötesi sistemlerde tepki kuvveti yer değiştirmeye orantılı değil ve sönüm kuvveti hızla orantılı değil bunun için sayısal hesaba dayanan ivmenin integrasyon ile zamana bağlı adım adım çözüm yöntemi kullanılır. Sabit ortalama ivme yöntemi denklemlerinde ku yerine doğrusal olmayan direnç kuvveti fs(u) konularak işlemler aynı şekilde devam ettirilir. Direnç kuvveti yer değiştirmeye bağlı örtük bir fs=fs(u) fonksiyonudur (Chopra & Anıl, 2015).

Artımlı ivme için;

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{4}{\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{4}{\Delta t}\hat{u}_i - 2\ddot{u}_i \quad (5.16)$$

Artımlı hız için;

$$\Delta\hat{u}_i = \frac{2}{\Delta t}\Delta u_i - 2\hat{u}_i \quad (5.17)$$

Artımlı yer değiştirme için;

$$\hat{k}_i\Delta u_i = \Delta\hat{P}_i \quad (5.18)$$

Burada $\hat{k}$ dinamik rijitlik aşağıdaki denklemle elde edilir;

$$\hat{k} = k + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4m}{\Delta t^2} \quad (5.19)$$

$\Delta\hat{p}_i$ ise efektif dinamik yük artımıdır. Denklemi aşağıda verilmiştir;

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + [\frac{4m}{\Delta t} + 2c]\hat{u}_i + 2m\ddot{u}_i \quad (5.20)$$

$$\Delta P_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) \quad (5.21)$$

Artımlı kuvvet için aşağıdaki;

$$\Delta fs_i = k\,\Delta u \qquad \text{veya} \quad \Delta fs_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) - m\,\Delta\ddot{u}_i - c\,\Delta\hat{u}_i \quad (5.22)$$

$$fs_{i+1} = fs_i + \Delta fs_i \quad (5.23)$$

denklemi elde edilir.

Burada bir sonraki adım için

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

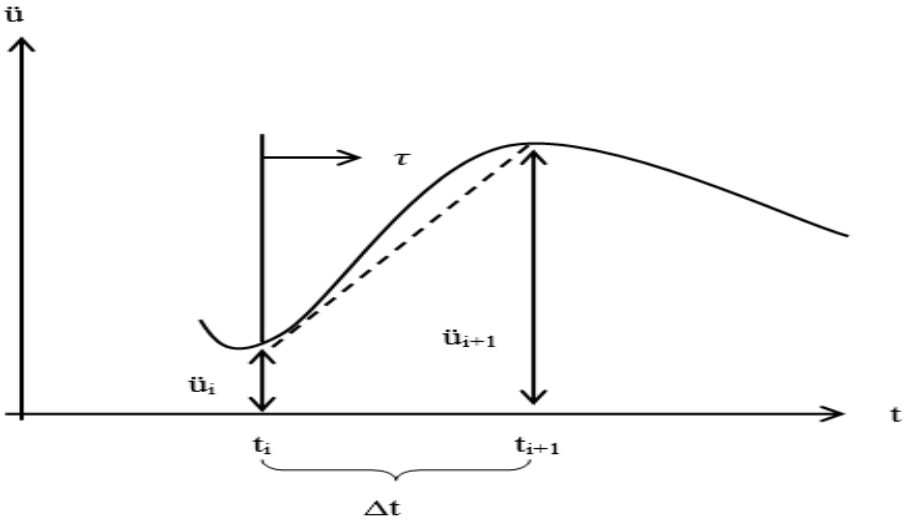
$\hat{u}_{i+1} = \Delta\hat{u}_i + \hat{u}_i$

$\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

t değerine ulaşana kadar bir sonraki adım için böylece tekrarlanır.

5.2.2 Newmark Doğrusal İvme Yöntemi

Çok küçük zaman aralığında, t_i ile t_{i+1} noktaları arasında ivmenin bu aralıkta sabit olduğu ve bu i başlangıç ile i+1 sonundaki noktalar arasında ivmenin bu iki nokta arasında değerlerin ortalamasına eşit olduğu yerine doğrusal olarak değiştiği kabulüne dayanır.



Şekil 20 Δt zaman aralığında gerçek ve tahmini ivme

$0<\tau<\Delta t$ bu aralığa göre aşağıda doğrusal ivme kabulüne göre integralleri alınarak Δt zaman değişiminden hız ve yer değiştirme elde edilir.

Burada bu kabullere dayanarak ivme, hız ve yer değiştirme denklemleri elde edilir. Başlangıç koşulu olarak û(t=0) ve u(t=0) veya bir önceki işlemin sonuçları olarak belirlidir. Bu koşulu dayanarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

Artımlı ivme için;

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{6}{\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{6}{\Delta t}\hat{u}_i - 3\ddot{u}_i \qquad (5.24)$$

Artımlı hız için;

$$\Delta\hat{u}_i = \frac{3}{\Delta t}\Delta u_i - 3\hat{u}_i - \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_i \qquad (5.25)$$

Artımlı yer değiştirme için;

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta\hat{P}_i \qquad (5.26)$$

Burada $\hat{k}$ dinamik rijitlik aşağıdaki denklemle elde edilir;

$$\hat{k} = k + \frac{3c}{\Delta t} + \frac{6m}{\Delta t^2} \qquad (5.27)$$

$\Delta\hat{p}_i$ ise efektif dinamik yük artımıdır. Denklemi aşağıda verilmiştir;

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + [\frac{6m}{\Delta t} + 3c]\hat{u}_i + [3m + c\frac{\Delta t}{2}]\ddot{u}_i \qquad (5.28)$$

$$\Delta P_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) \quad (5.29)$$

Burada bir sonraki adım için

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta \hat{u}_i + \hat{u}_i$

$\ddot{u}_{i+1} = \Delta \ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

t değerine ulaşana kadar bir sonraki adım için böylece tekrarlanır.

Doğrusal ivme yöntemi, sabit ivme yöntemine göre sayısal yaklaşımı daha iyi sonuç verir ancak ortalama ivme yöntemi doğrusal ortalama yöntemine göre her koşulda daha dengelidir. Dengeli sayısal sonuçların elde edilmesi için zaman adımın $\Delta t \leq \sqrt{3T}/\pi = 0.551T$ bu değerden küçük olması gerekir. Bu yöntemde adım aralığının seçiminde dış etken uygun şekilde belirlenmeli ve dikkat edilmelidir. Bu yöntemde $\frac{\Delta t}{Tn} < 10$ için yeteri kadar doğru sonuç elde edilir. Tn doğal titreşim periyodudur (Celep, 2014).

Elastik ötesi sistemlerde tepki kuvveti yer değiştirmeye orantılı değil ve sönüm kuvveti hızla orantılı değil bunun için sayısal hesaba dayanan ivmenin integrasyon ile zamana bağlı adım adım çözüm yöntemi kullanılır. Doğrusal ortalama ivme yöntemi denklemlerinde ku yerine doğrusal olmayan direnç kuvveti $f_s(u)$ konularak işlemler aynı şekilde devam ettirilir. Direnç kuvveti yer değiştirmeye bağlı örtük bir $f_s = f_s(u)$ fonksiyonudur (Chopra & Anıl, 2015).

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{6}{\Delta t^2} \Delta u_i - \frac{6}{\Delta t} \hat{u}_i - 3\ddot{u}_i \quad (5.30)$$

Artımlı hız için;

$$\Delta \hat{u}_i = \frac{3}{\Delta t} \Delta u_i - 3\hat{u}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \quad (5.31)$$

Artımlı yer değiştirme için;

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta \hat{P}_i \quad (5.32)$$

Burada $\hat{k}$ dinamik rijitlik aşağıdaki denklemle elde edilir;

$$\hat{k} = k+\frac{3c}{\Delta t} +\frac{6m}{\Delta t^2} \quad (5.33)$$

$\Delta\hat{p}_i$ ise efektif dinamik yük artımıdır. Denklemi aşağıda verilmiştir;

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i+[\frac{6m}{\Delta t} +3c]\hat{u}_i+[3m+c\frac{\Delta t}{2}]\ddot{u}_i \quad (5.34)$$

$$\Delta P_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) \quad (5.35)$$

$$\Delta fs_i = k\,\Delta u \qquad \text{veya} \qquad \Delta fs_i = -m(\ddot{u}g_{i+1} - \ddot{u}g_i) - m\,\Delta\ddot{u}_i - c\,\Delta\hat{u}_i \quad (5.36)$$

$$fs_{i+1} = fs_i + \Delta fs_i \quad (5.37)$$

Burada bir sonraki adım için;

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta\hat{u}_i + \hat{u}_i$

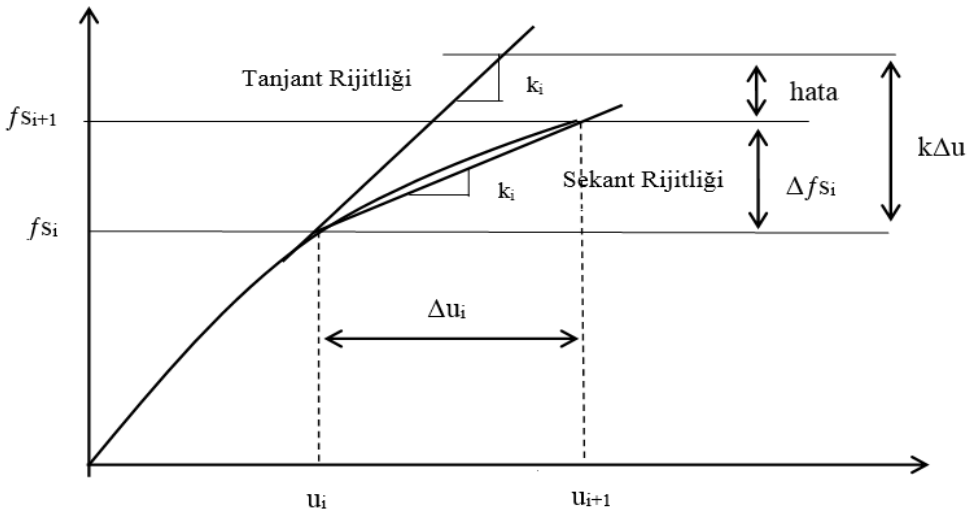
$\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

t değerine ulaşana kadar bir sonraki adım için böylece tekrarlanır.

Elastik ötesi ortalama ivme ve doğrusal ivme yöntemleri için $\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$ yerine,

$$\ddot{u}_{i+1} = [P_{i+1} - c\hat{u}_{i+1} - fs(i+1)] \quad (5.38)$$

Bu denklem tercih edilmelidir. Elastik ötesi sistemlerde son denklemden elde edilen $\ddot{u}_{i+1}$ değeri ile $\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$ denkleminden elde edilen değerler genellikle eşit değildirler. Bu yöntemlerde çok küçük Δt değeri seçmek gerekir. Çünkü $\hat{u}$ nün işaret değiştirdiği ve Elastik ötesi sistemlerde fs-u eğrisinin keskin bir şekilde yön değiştirdiğinde rijitlikte değişime neden olduğundan bu noktalarda Δt aralığını küçültülerek ayrıca araştırılması gerekir. Dikkat edilmediği takdirde fs-u eğrisinin dışına çıkılmasına neden olur (Uzsoy, 2006).



Şekil 21 Tanjant rijitliğinin kulanılması

$$k_{sekant} \cong k_{tanjant} \quad (5.39)$$

$$\Delta f_{Si} = k_{tan}\, \Delta u_i \quad (5.40)$$

Elastik ötesi sistemlerde tepki kuvveti yer değiştirmeye orantılı olmadığı ve sönüm kuvveti de hızla orantılı değildir. Şekil 21'de gözlemlendiği gibi tepki kuvveti etkisinde rijitlikte sabit kalmamaktadır bu nedenle tanjant rijitliğinin kullanılması hatadır. Çünkü tanjant rijitliğinin yerine sekant rijitliği kullanılmalıdır. Ancak bizim aradığımız yeni yani bir sonraki yer değiştirme değeri (i+1 zaman anı) için sekant rijitliği bilinmediği için tanjant rijitliğini kullanmak zorundayız. Bu yüzden rijitliğin Δt artışı sırasında kararlı kaldığı varsayılarak ve genel olarak bu k katsayısı zamanın sabit artışında sabit kalmadığından denklem (5.39) göre yaklaşık değer alınır Yeteri kadar küçük zaman aralığında sekant rijitliği yerine tanjant rijitliği kullanımında kaynaklanan hata çok büyük değildir. Bu hatayı azaltmakta kullanılan döngülü yaklaşımlar kullanılmalıdır. (Paz & Kim, 2019).

BÖLÜM 6. SAYISAL UYGULAMALAR

6.1 Analizde Kullanılan Yer Hareketleri

Matlab programı ile filtrelenmemiş deprem büyüklüğü mw>=5 için 22 adet deprem kaydının her iki yatay bileşeni (Doğu-Batı ve Kuzey-Güney) AFAD sitesinden alınarak 0.1 ile 25 Hz arasında filtrelenmiştir. Daha sonra deprem özellikleri, pik yer ivmesi (PGA) pik yer hız (PGV) ve pik yer değiştirme (PGD) değerleri belirlenmiştir. Vs_{30} ortalama kayma dalga hızına bağlı olarak, $180 \leq Vs \leq 360$ aralığında 24 kuvvetli yer hareketi zemin tipi yumuşak, $360 \leq Vs \leq 760$ aralığında da ise 20 kuvvetli yer hareketi için zemin tipi sert olarak gruplandırılmıştır. Daha sonra deprem büyüklükleri, fay kırığının yüzeydeki izdüşümü ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın yatay mesafeyi tarif eden Joyner-Boore (R_{JB}) mesafe birimi tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının listesi

Dizin kaydı	Tarih	Deprem	M_W	Vs,30 (m/s)	Zemin Tipi	Mesafe (km)	PGA (cm/s^2)		PGV (cm/s)		PGD (cm)	
						R_{jb}	KG	DB	KG	DB	KG	DB
1	13.3.1992	Erzincan	6,6	—	Yumuşak	3,3	403,86	472,64	108,43	78,22	34,42	29,5
2	1.10.1995	Afyon	6,4	198	Yumuşak	0	272,03	321,38	29,47	47,38	6,53	12,76
3	27.6.1998	Adana	6,2	264	Yumuşak	40	221,92	271,57	29,56	22,63	7,04	5,72
4	17.8.1999	Kocaeli	7,6	701	Sert	4,9	256,47	145,45	36,61	27,78	25,51	19,47
5	17.8.1999	Düzce	7,6	282	Yumuşak	46	313,92	365,64	52,31	55,53	35,32	19,11
6	30.10.1993	Erzurum	6,1	316	Yumuşak	22,6	148,47	167,92	47,31	25,33	32,74	14,27
7	30.6.1981	Hatay	5,1	469	Sert	25	141,12	46,93	5,64	4,11	1,47	1,7
8	1.5.2003	Bingöl	6,3	529	Sert	2,2	503,36	287,78	36,97	21,83	14,58	4,81
9	24.10.2006	Bursa	5,7	274	Yumuşak	10,7	157,74	176,22	7,16	5,9	0,71	0,54
10	24.10.2006	Bursa	5,7	370	Sert	7,3	174,22	206,07	8,75	9,98	1,33	1,06
11	25.8.2007	Bingöl	5,42	356	Yumuşak	—	173,43	118,11	11,35	6,37	1,26	1,3
12	11.11.2010	Aydın	5,1	369	Sert	—	68,82	140,15	2,75	5,56	0,15	0,44
13	19.5.2011	Manisa	5,93	336	Yumuşak	—	587,54	602,65	26,04	11,59	2,62	1,51
14	11.9.2011	Van	5,86	363	Sert	—	142,73	244,31	17,4	27,33	2,74	8,77
15	3.5.2012	Kütahya	5,72	259	Yumuşak	—	242,29	152,08	25,09	6,86	3,96	0,81
16	10.6.2012	Muğla	6,1	248	Yumuşak	—	133,88	229,91	11,49	26,22	1,63	4,35
17	22.7.2012	Kahramanmaraş	5,34	611	Sert	—	214,95	303,27	5,53	8,37	0,34	1
18	18.7.1979	Balıkesir	5,5	495	Sert	28,9	222,02	275,44	10,49	12,51	5,01	8,67
19	19.8.1976	Denizli	5,34	345	Yumuşak	6,4	339,34	257,59	24,49	15,79	2,57	3,47
20	23.10.2011	Van	6,61	293	Yumuşak	—	178,32	168,59	26,24	14,72	5,59	3,79
21	20.7.2017	Muğla	6,5	747	Sert	—	156,57	95,88	27,19	7,49	8,52	3,89
22	22.1.1997	Hatay	5,7	470	Sert	19,2	133,15	143,39	5,53	6,07	0,97	0,9

Tablo 3’ de ise Arias şiddeti (deprem sarsıntı süresi ve frekans içeriğinin zamana bağlı değişimini içeren enerji boşalımının ifadesi olup, ivme kaydının yatay ve düsey bileşenlerin toplamıdır). Zaman tanımı ise Trifunac ve Brady toplam enerjinin %5 ile %95 nin kaydedildiği noktalar arası süre ve Ayraçlanmış süre (Bracketed Duration) olarak belirlenerek verilmiştir. Daha sonra yer hareketlerinin impulsive hareketlerinin boyutsuz indeksi (ID) verilmiştir.

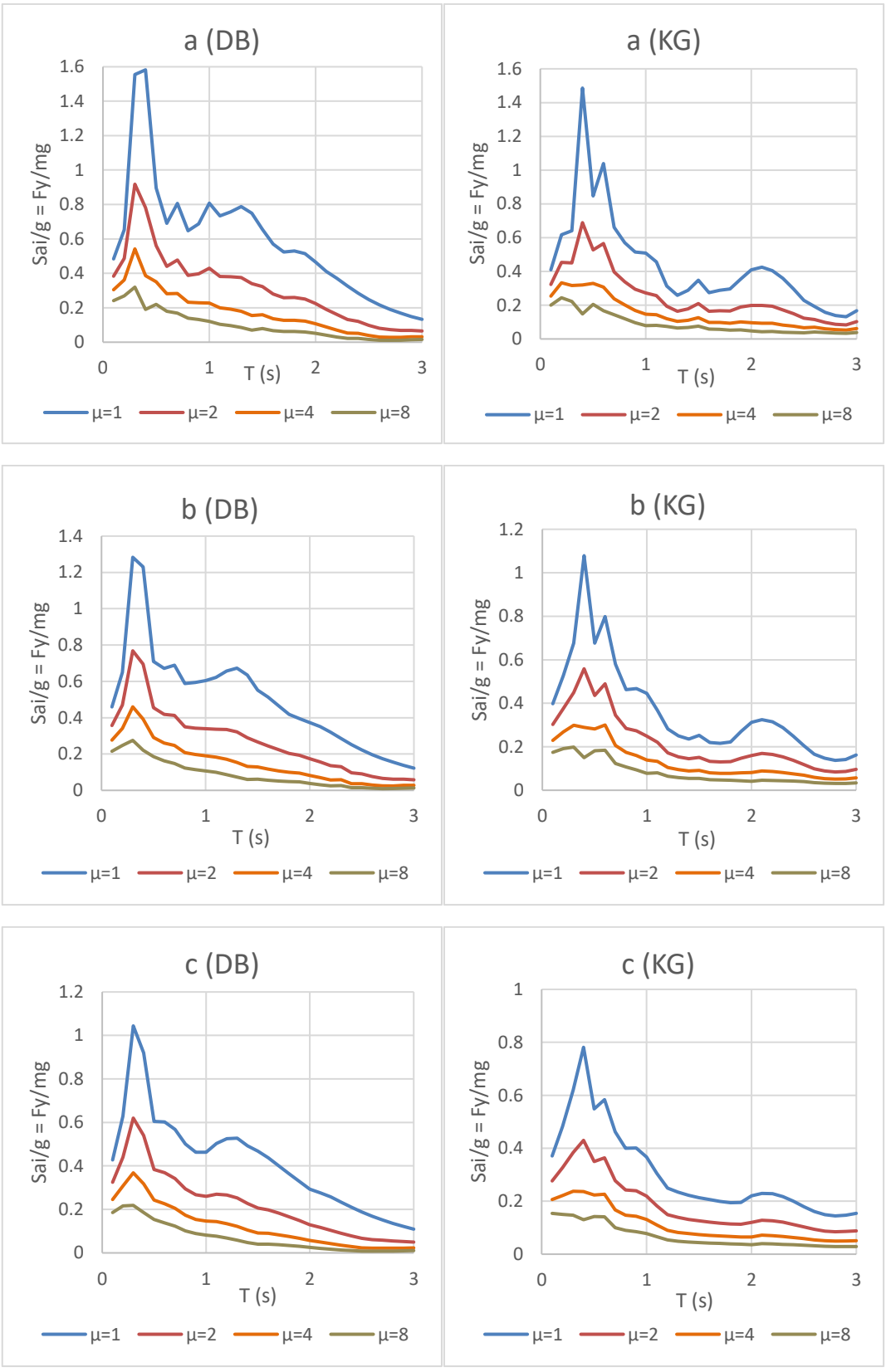
Tablo 3 Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının süreleri ve Arias şiddetleri

Dizin Kaydı	Tarih	Deprem	Zaman (KG)		Zaman (DB)		Arias Şiddeti		ID	
			t_{br} (s)	t_{tf} (s)	t_{br} (s)	t_{tf} (s)	KG	DB	I_{D-KG}	I_{D-DB}
1	13.3.1992	Erzincan	25,1	9,1	25,3	9,8	163,5	177,6	2,3	3
2	1.10.1995	Afyon	27,1	16,9	27,7	15,7	165,5	204	12,9	8,4
3	27.6.1998	Adana	27,3	13	27,4	13,2	94,4	105,6	9	10,7
4	17.8.1999	Kocaeli	34,7	29,6	47,5	29,3	50,9	35,9	4	5,5
5	17.8.1999	Düzce	24,4	11,9	22,5	12	112,6	139,8	4,3	4,3
6	30.10.1993	Erzurum	31,4	18,7	30,8	19,7	57,1	43,9	5,1	6,5
7	30.6.1981	Hatay	22,6	9,4	23,2	11,2	9,5	9,3	7,5	11,8
8	1.5.2003	Bingöl	23,9	4,5	23,9	6,8	196	80,5	6,6	8
9	24.10.2006	Bursa	13,4	5	11,4	4,8	12,9	14,8	7,1	8,9
10	24.10.2006	Bursa	19,3	7,5	14,5	8,2	14,1	10,6	5,8	3,2
11	25.8.2007	Bingöl	14,1	4,8	18	7	13,5	11,4	4,3	9,4
12	11.11.2010	Aydın	12,3	3,6	5,8	2	1,9	7,8	6,2	6,2
13	19.5.2011	Manisa	17,9	7,6	67,6	7,4	109,8	69,2	4,5	6,2
14	11.9.2011	Van	31,4	16,4	31	8,4	17,2	42,4	4,3	4
15	3.5.2012	Kütahya	15,1	1,8	8,1	3,8	26,3	7,1	2,7	4,3
16	10.6.2012	Muğla	56,7	22	37,4	13,3	40,5	80,5	16,4	8,3
17	22.7.2012	Kahramanmaraş	5,7	2	6,6	1,8	14,8	19,9	7,8	4,9
18	18.7.1979	Balıkesir	11,8	3,2	8,9	3,4	19,9	21,2	5,3	3,8
19	19.8.1976	Denizli	13,6	5,2	14,3	5,9	71,4	51,4	5,4	7,9
20	23.10.2011	Van	57	19,2	57,1	22,3	78,3	50,8	10,5	12,8
21	20.7.2017	Muğla	17	5,1	25,1	8,9	26,9	8,9	4	7,7
22	22.1.1997	Hatay	31,5	13,4	27,5	15	18,3	15,9	15,5	11,4

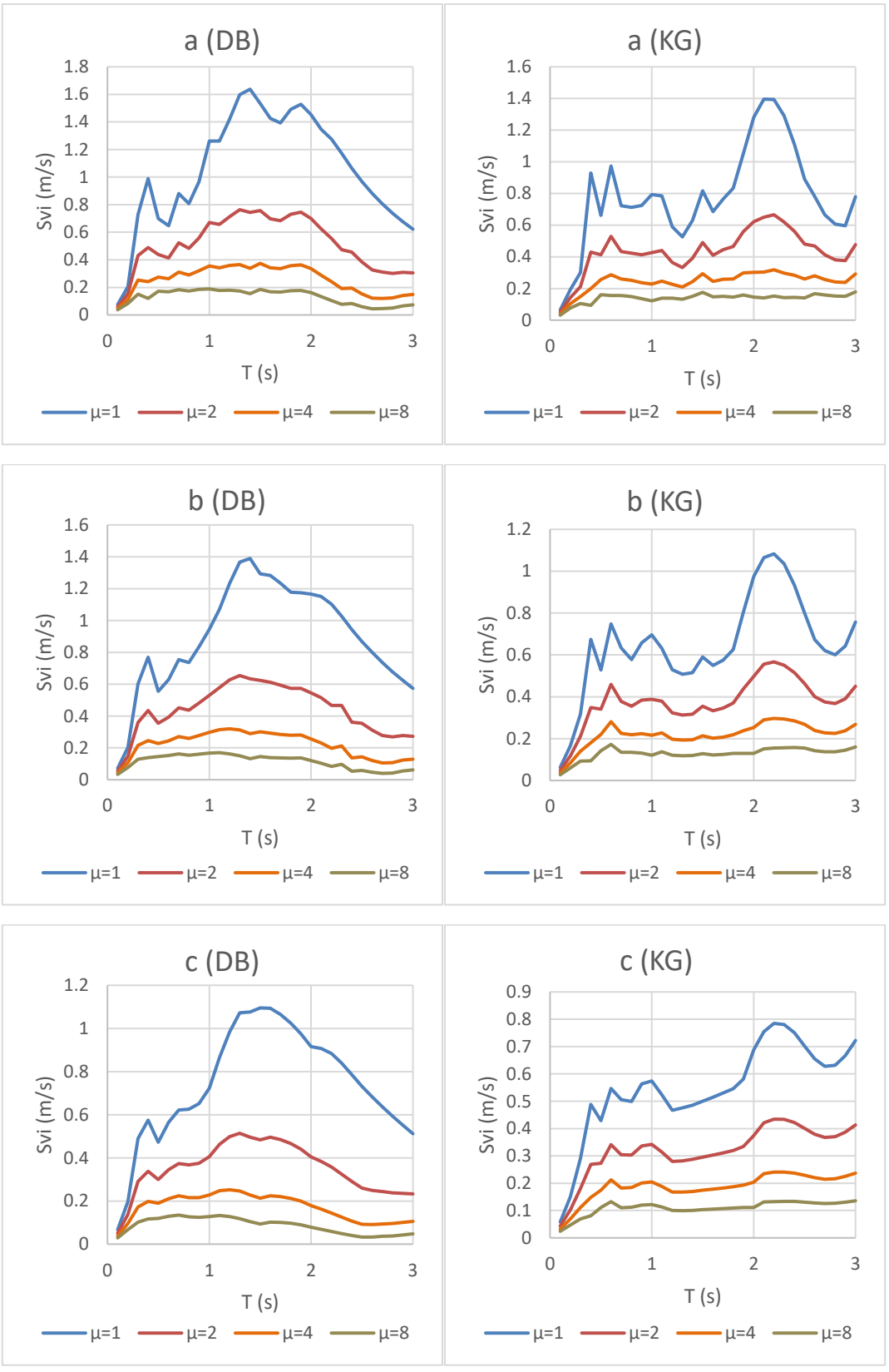
6.2 Tepki spektrumunlarının Bulunması

Bu yer hareketleri kullanılarak tek dereceli serbestlik sistemin doğrusal olmayan bir dinamik analizi yöntemi ve elastoplastik davranış modeli kullanılarak matlab programı ile %2 %5 %10 sönüm oranlarına bağlı olarak ve sabit farklı süneklikler için μ =1-2-4-8 değerleri için dayanım spektrumları elde edilmiştir. %2 %5 %10 sönüm oranlarına ve μ =1-2-4-8 süneklik oranlarına bağlı olarak hem elastik ötesi ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumları çizilmiştir. Daha sonra yumuşak zemin grubunun 24 sert zemin grubunun 20 yer hareketi TSD sistemi üzerindeki etkisi incelenmiş ve normalizasyonu için yapı tepki ivmesi kendisine etki eden yer hareketinin Pik yer ivmesine (PGA) bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir. Böylece yumuşak zemin grubunun 24, sert zemin grubunun 20 yer hareketi sayısal olarak ortalamaları alınarak, ortalama ivme spektrumları elde edilmiştir. Ortalama hız spektrumu için PGV ve ortalama yer değiştirme spektrumu içinde PGD'ye bölünerek ortalama spektrumları elde edilmiştir.

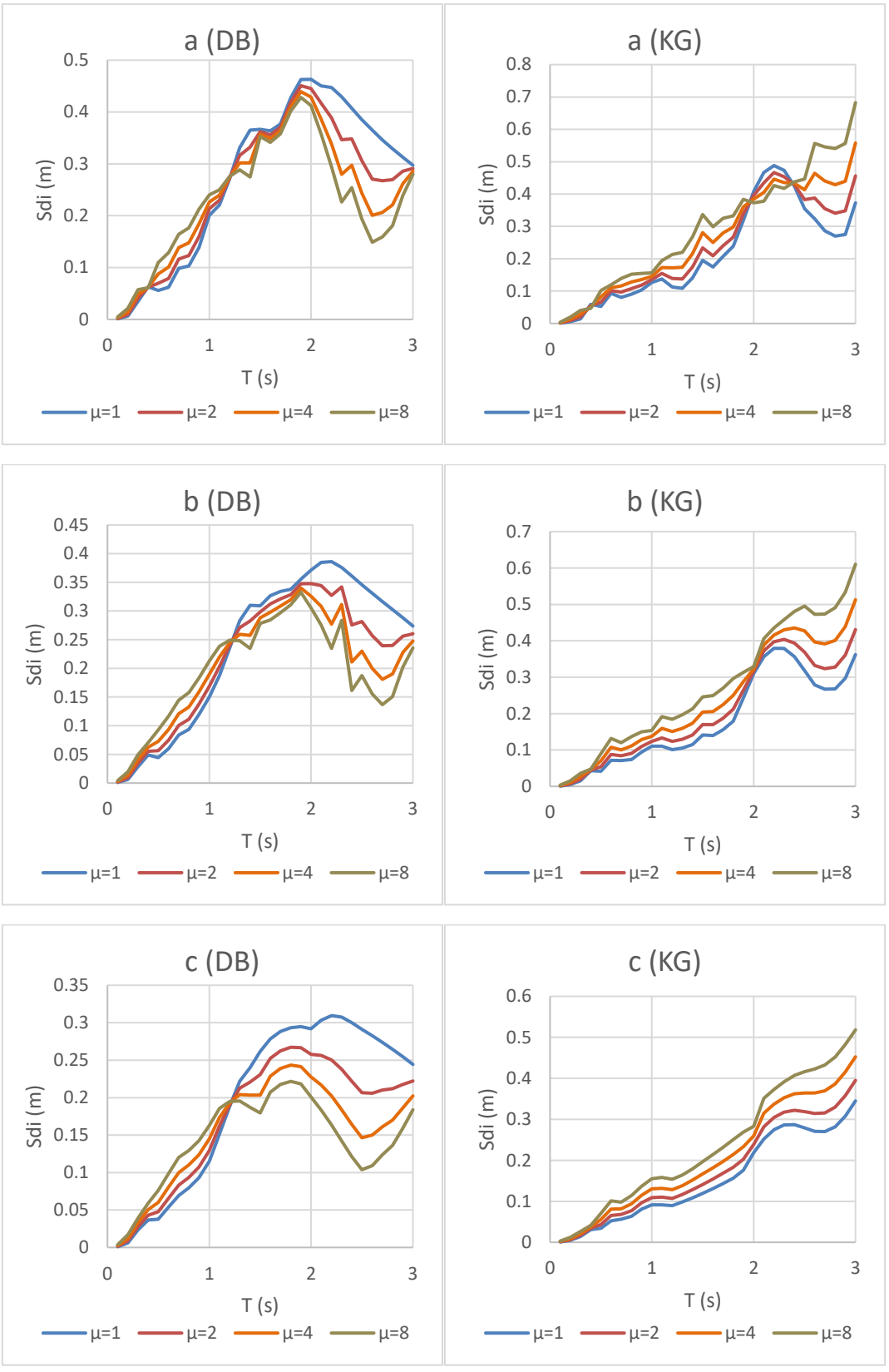
Yumuşak zemin grubu için öncelikle bir kuvvetli yer hareketinin ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumu verilmiş (diğer kuvvetli yer hareketinin davranış spektrumları ise ek2a'da verilmiştir.) ve daha sonra 24 kuvvetli yer hareketinin normalize edilmiş ortalama ivme, hız, yer değiştirme spektrumları verilmiştir.



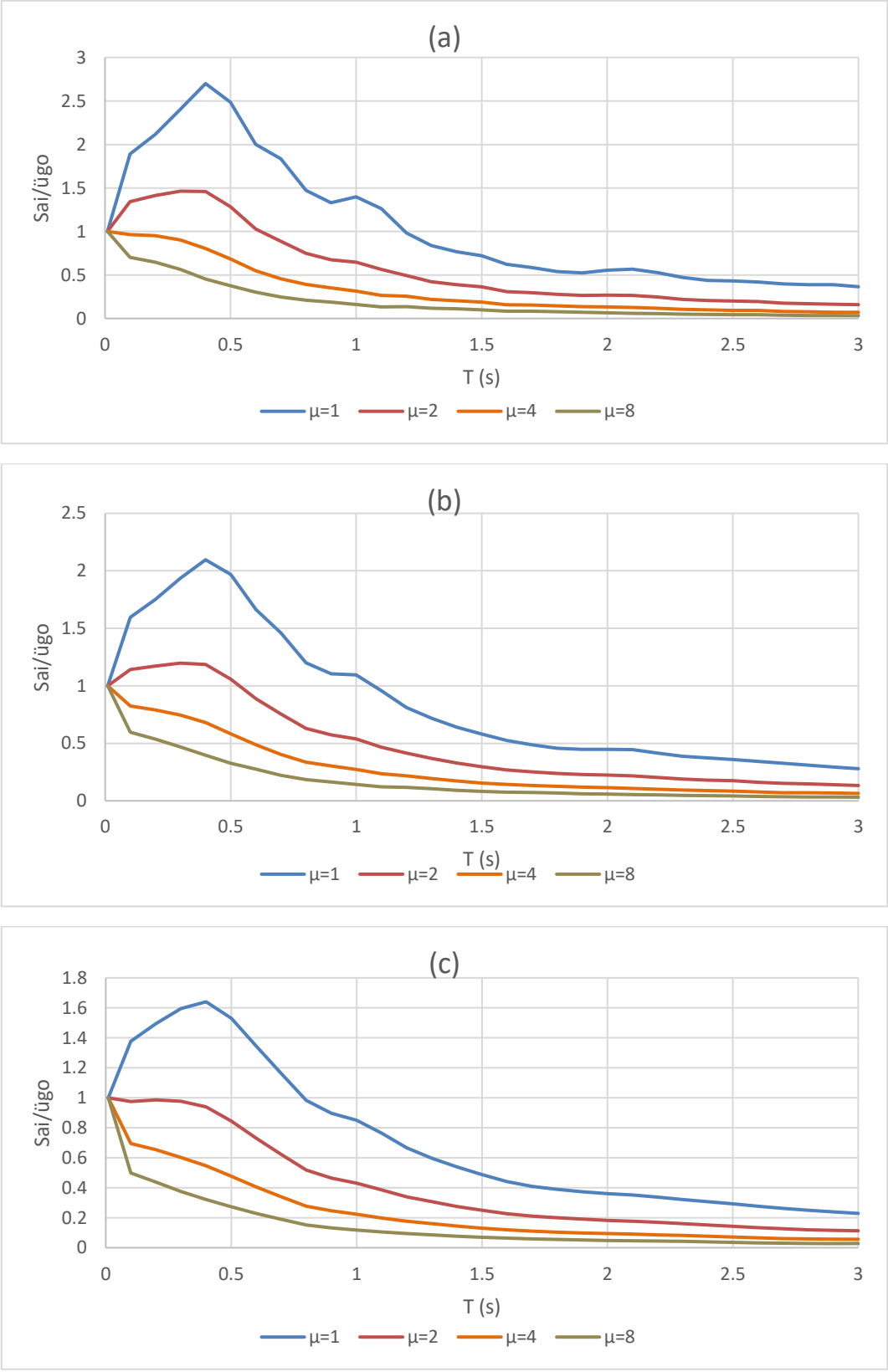
Şekil 22 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ivme veya dayanım spektrumu



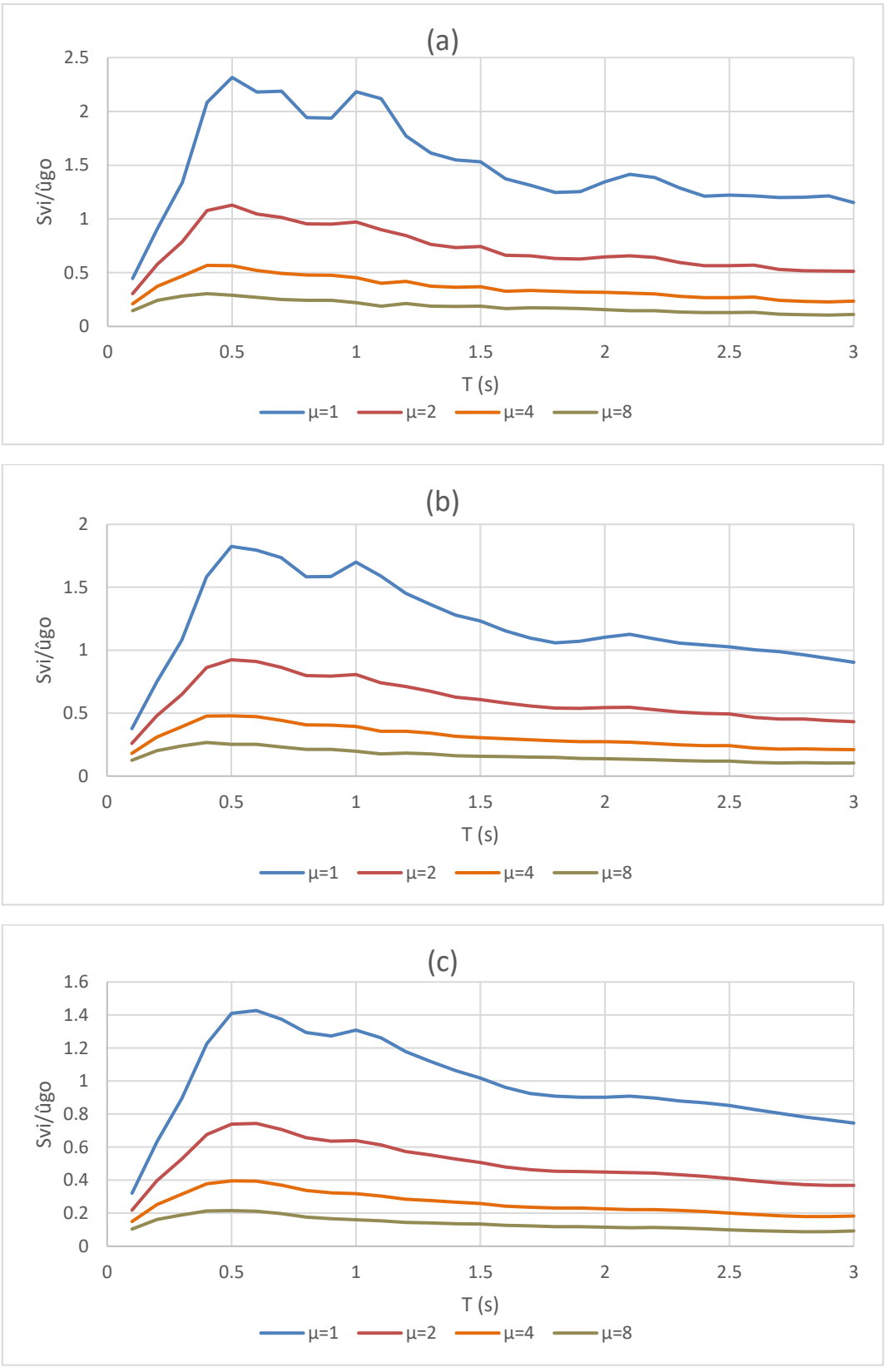
Şekil 23 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için hız spektrumu



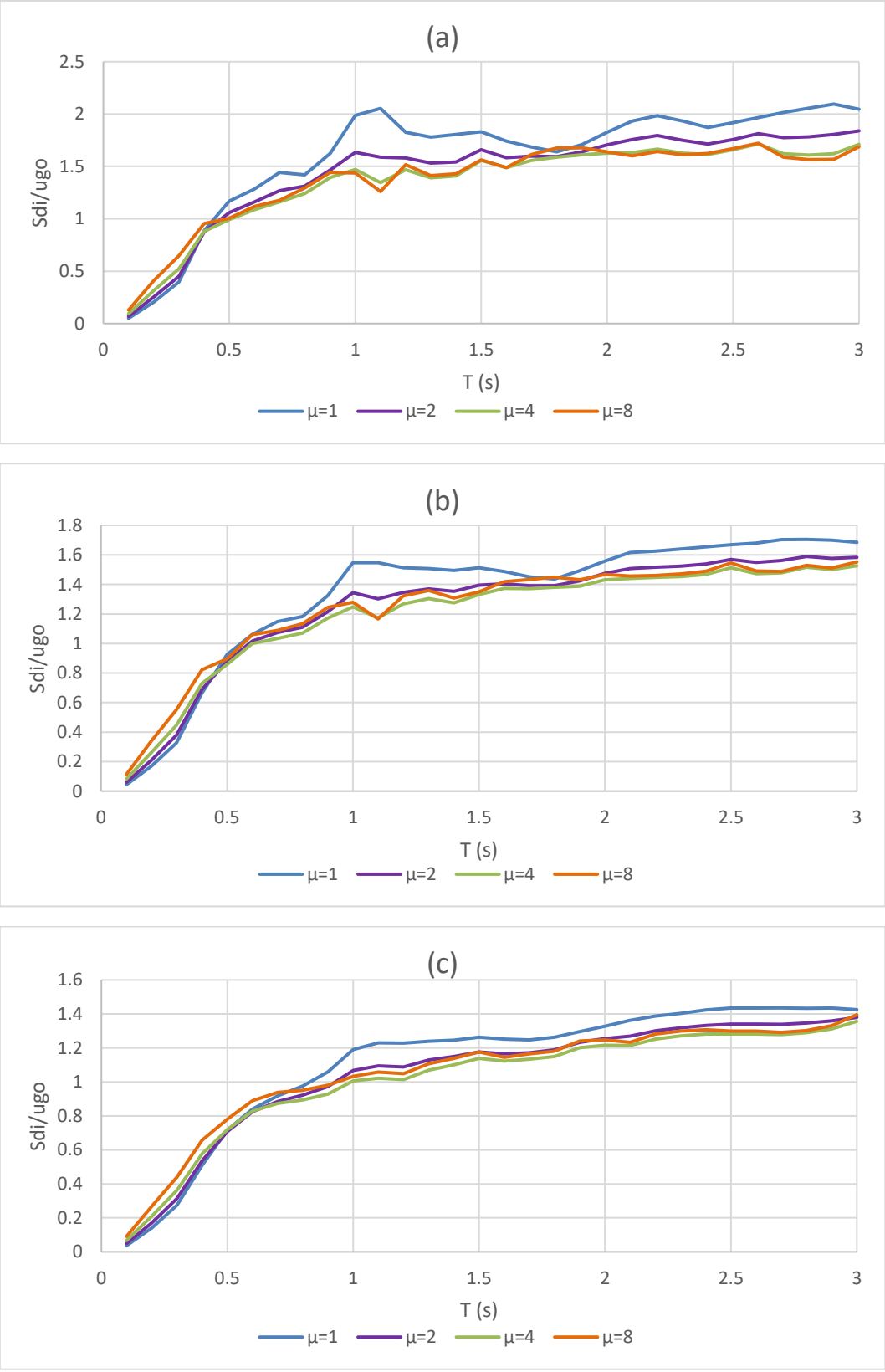
Şekil 24 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için yer değiştirme spektrumu



Şekil 25 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumu

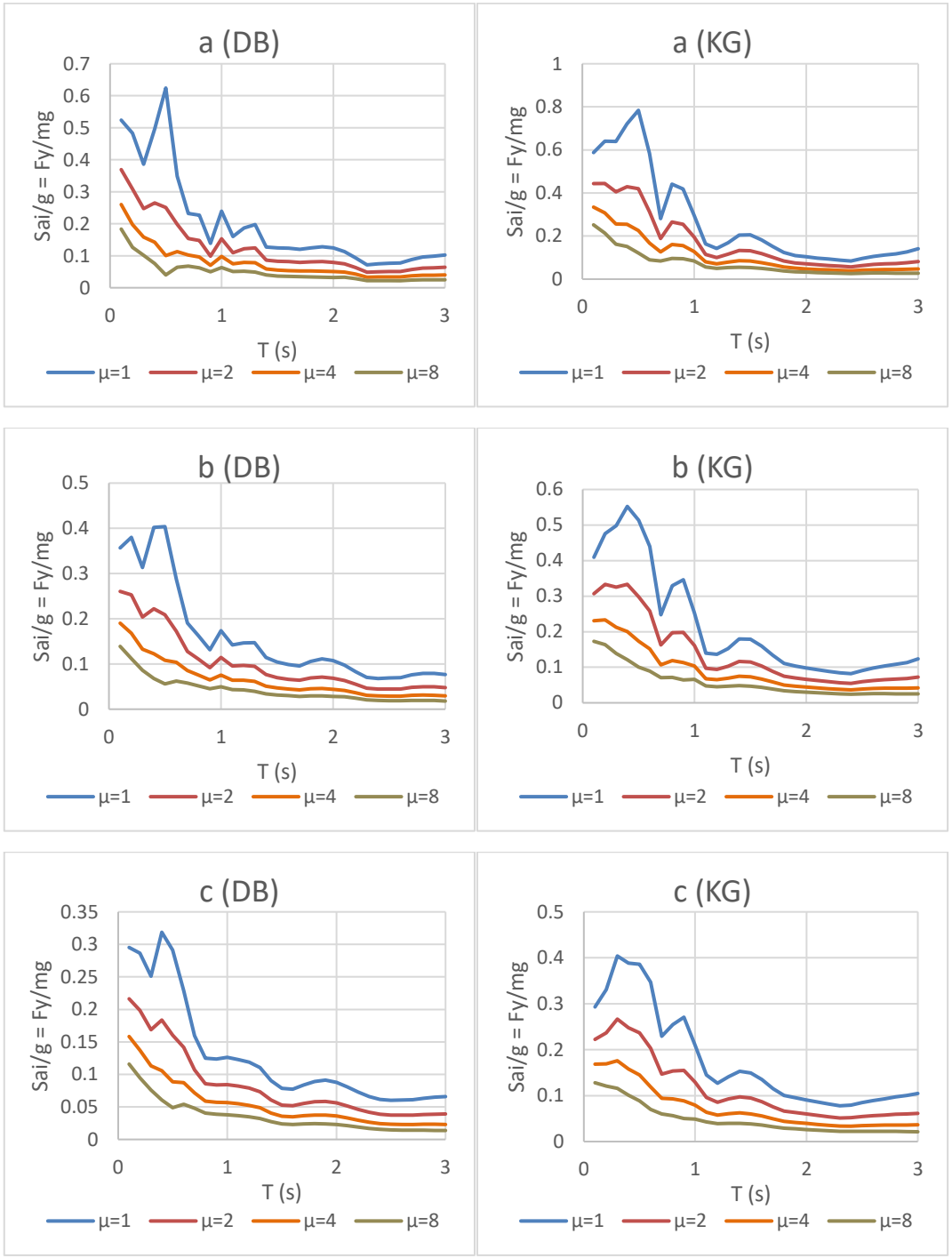


Şekil 26 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama hız spektrumu

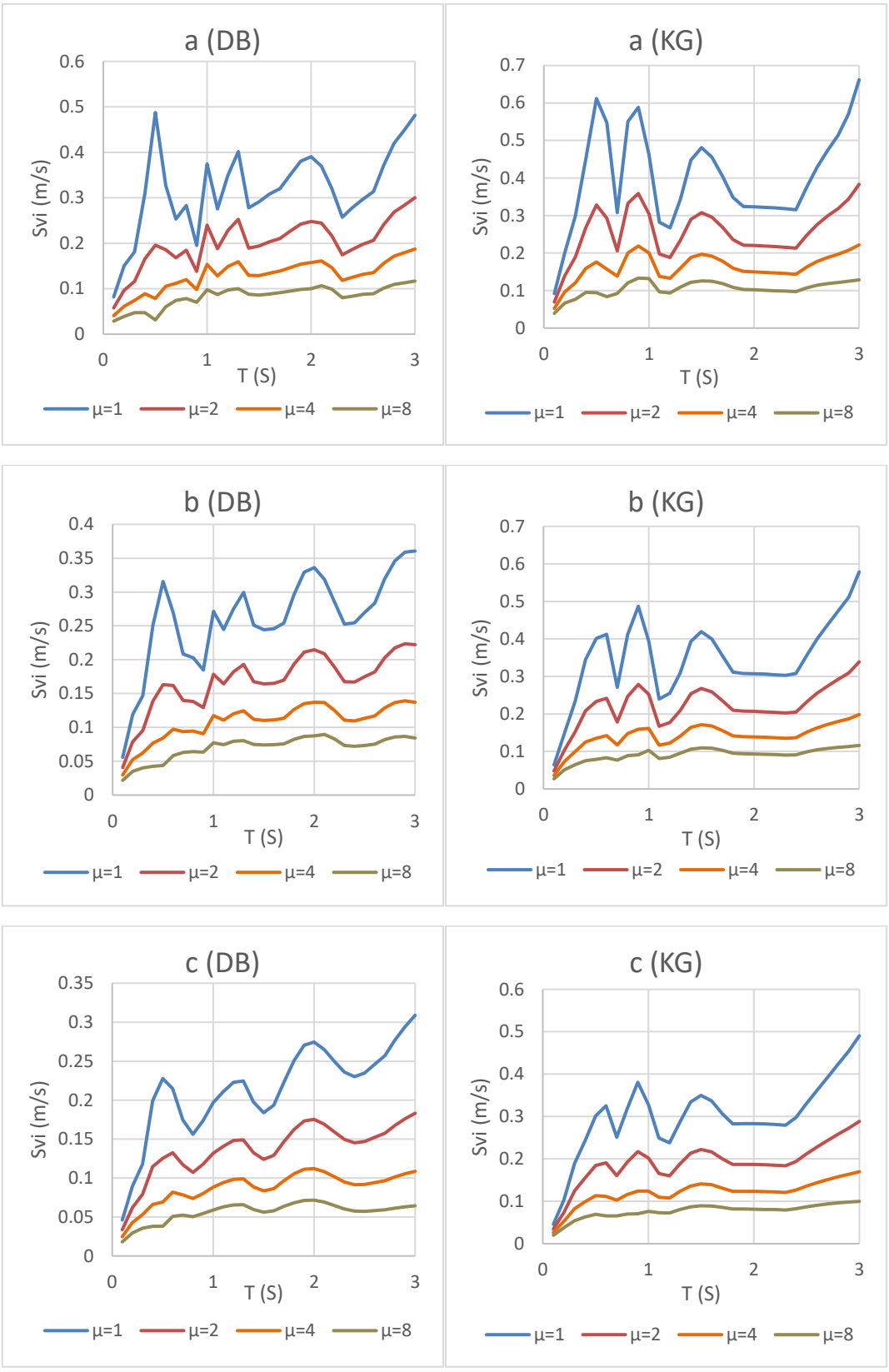


Şekil 27 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama yer değiştirme spektrumu

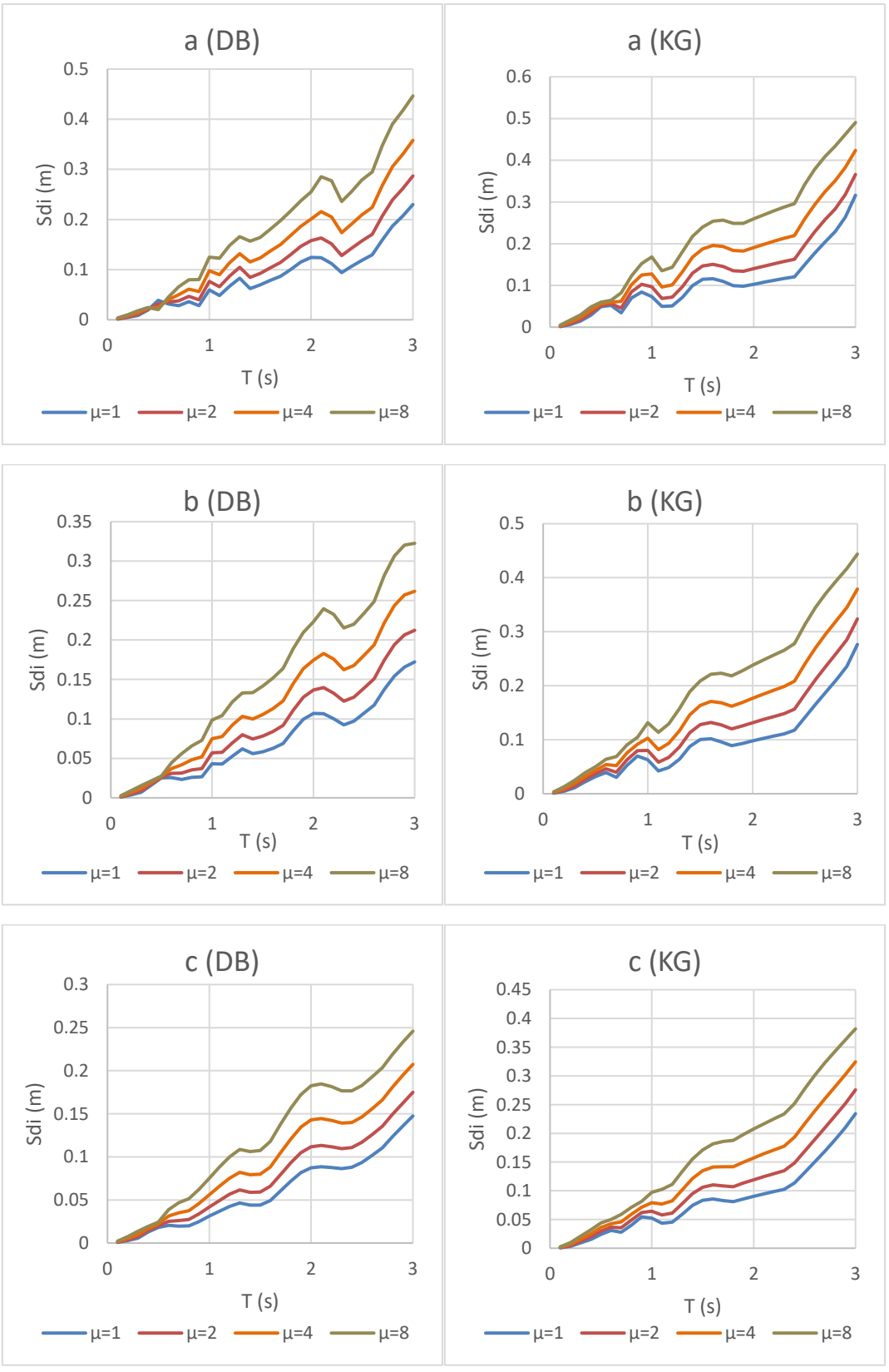
Sert zemin grubu için öncelikle bir kuvvetli yer hareketinin ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumu verilmiş (diğer kuvvetli yer hareketinin davranış spektrumları ise ek2b'de verilmiştir.) ve daha sonra 20 kuvvetli yer hareketinin normalize edilmiş ortalama ivme, hız, yer değiştirme spektrumları verilmiştir.



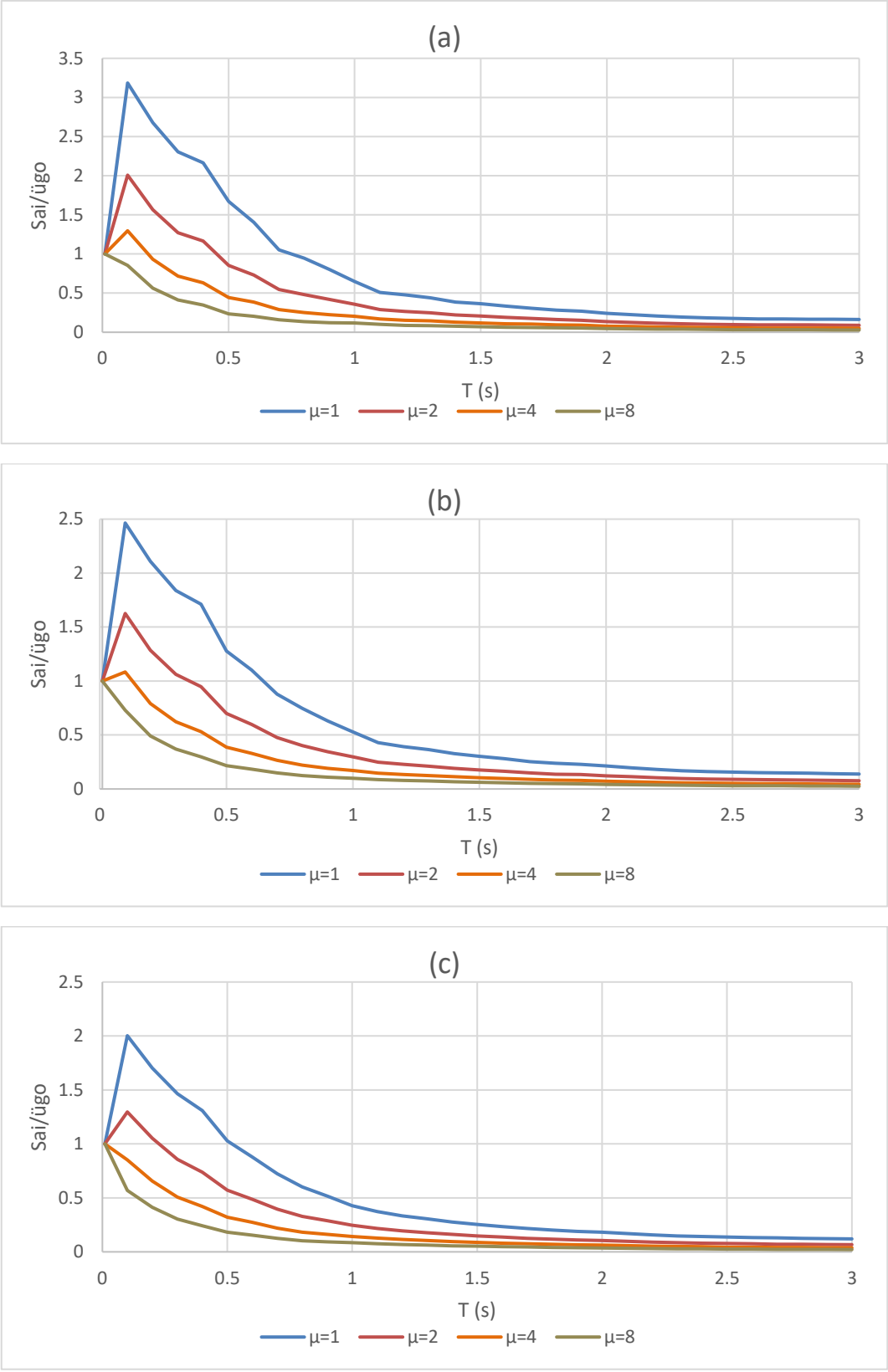
Şekil 28 Kocaeli depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ivme veya dayanım spektrumu



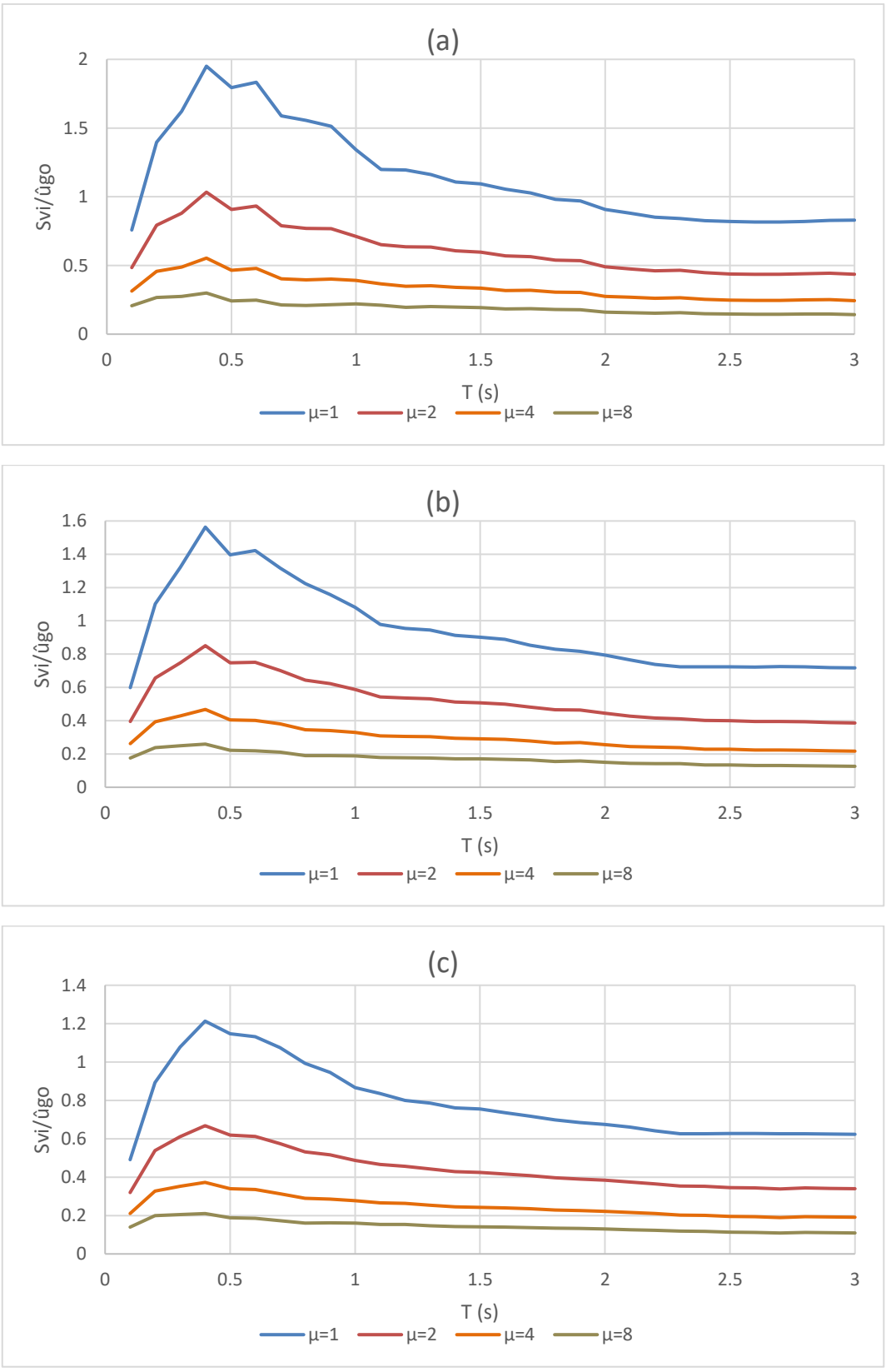
Şekil 29 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için hız spektrumu



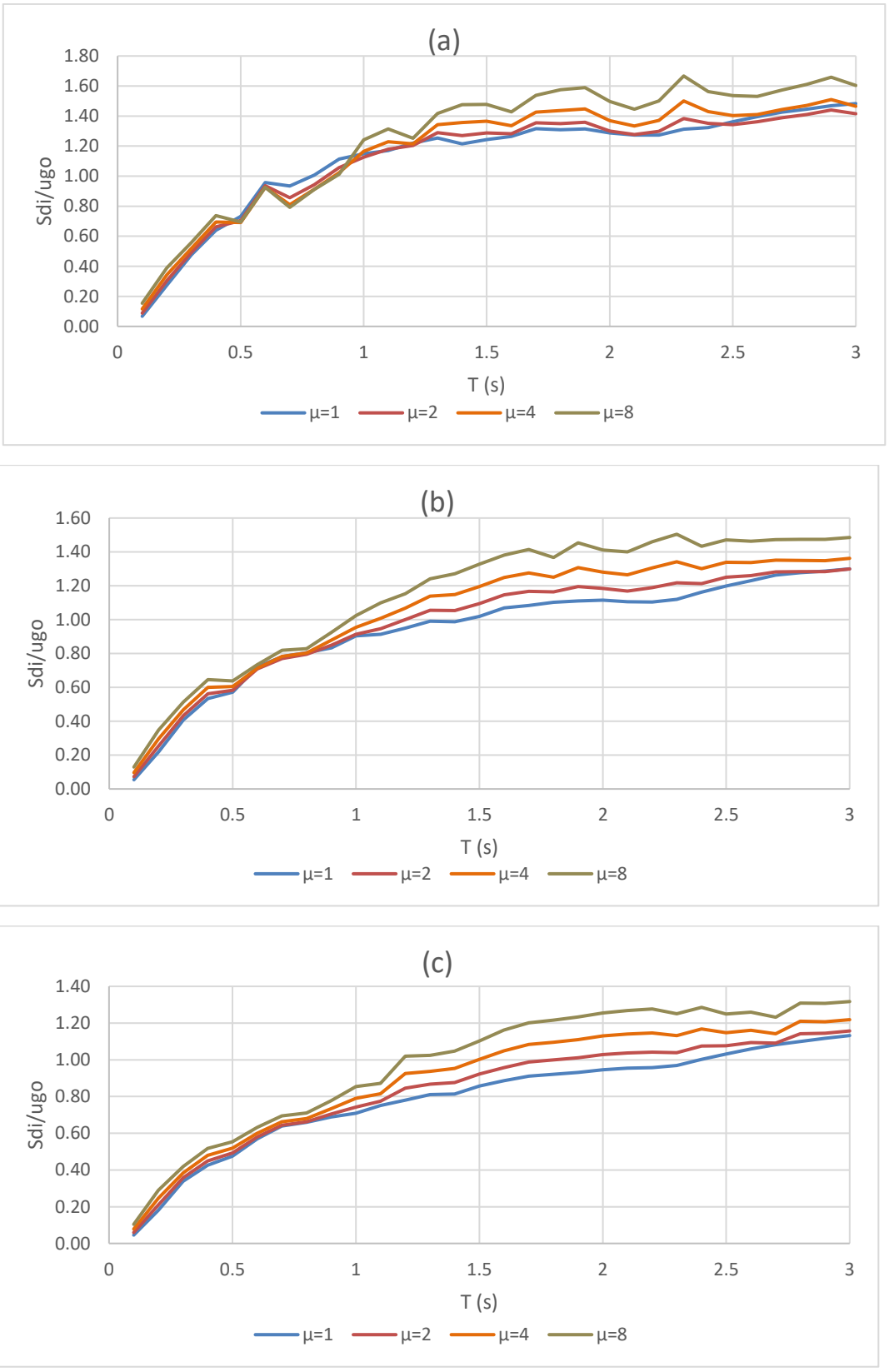
Şekil 30 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için yer değiştirme spektrumu



Şekil 31 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama ivme spektrumu



Şekil 32 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama hız spektrumu

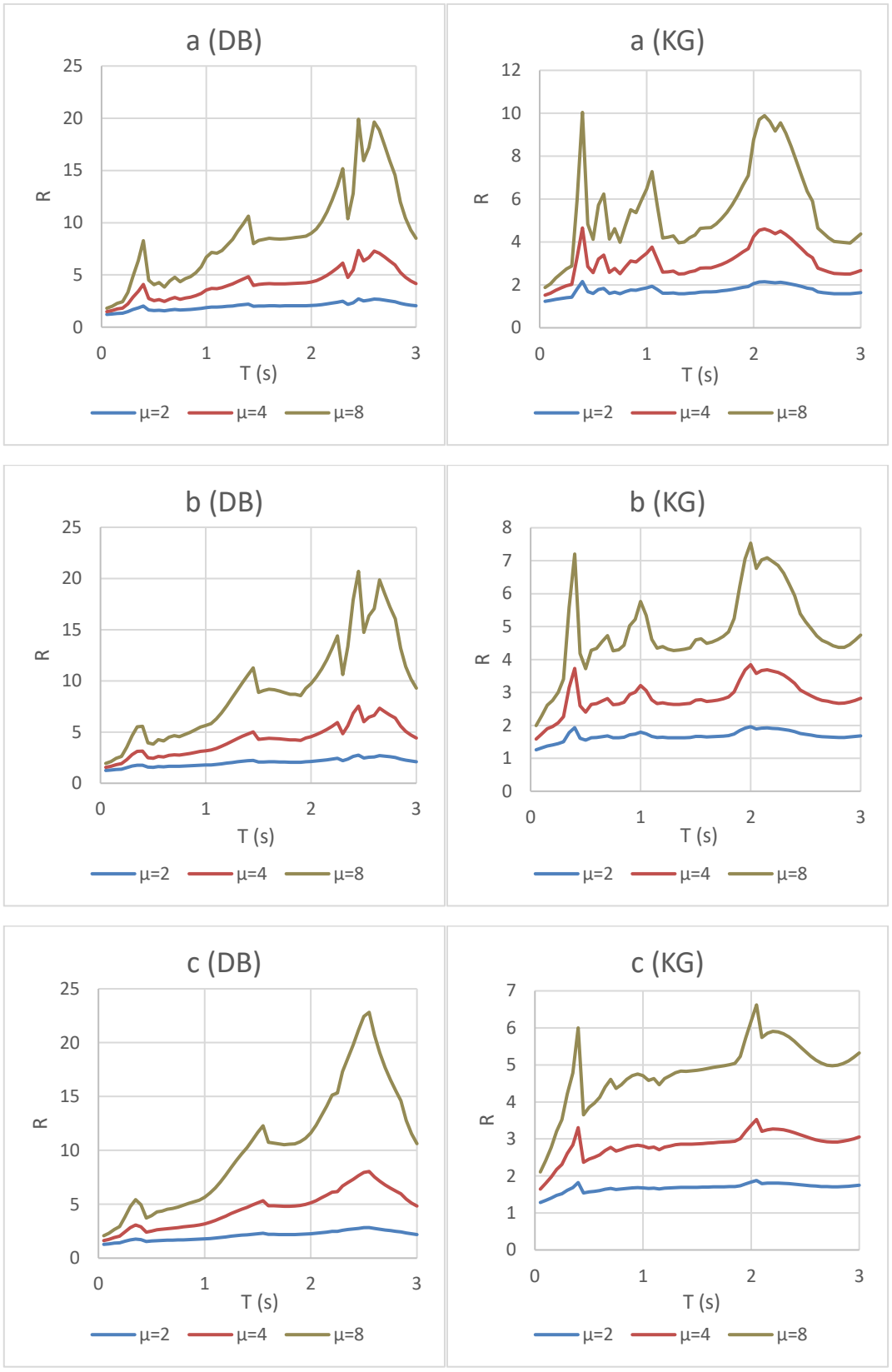


Şekil 33 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için normalize edilmiş ortalama yer değiştirme spektrumu

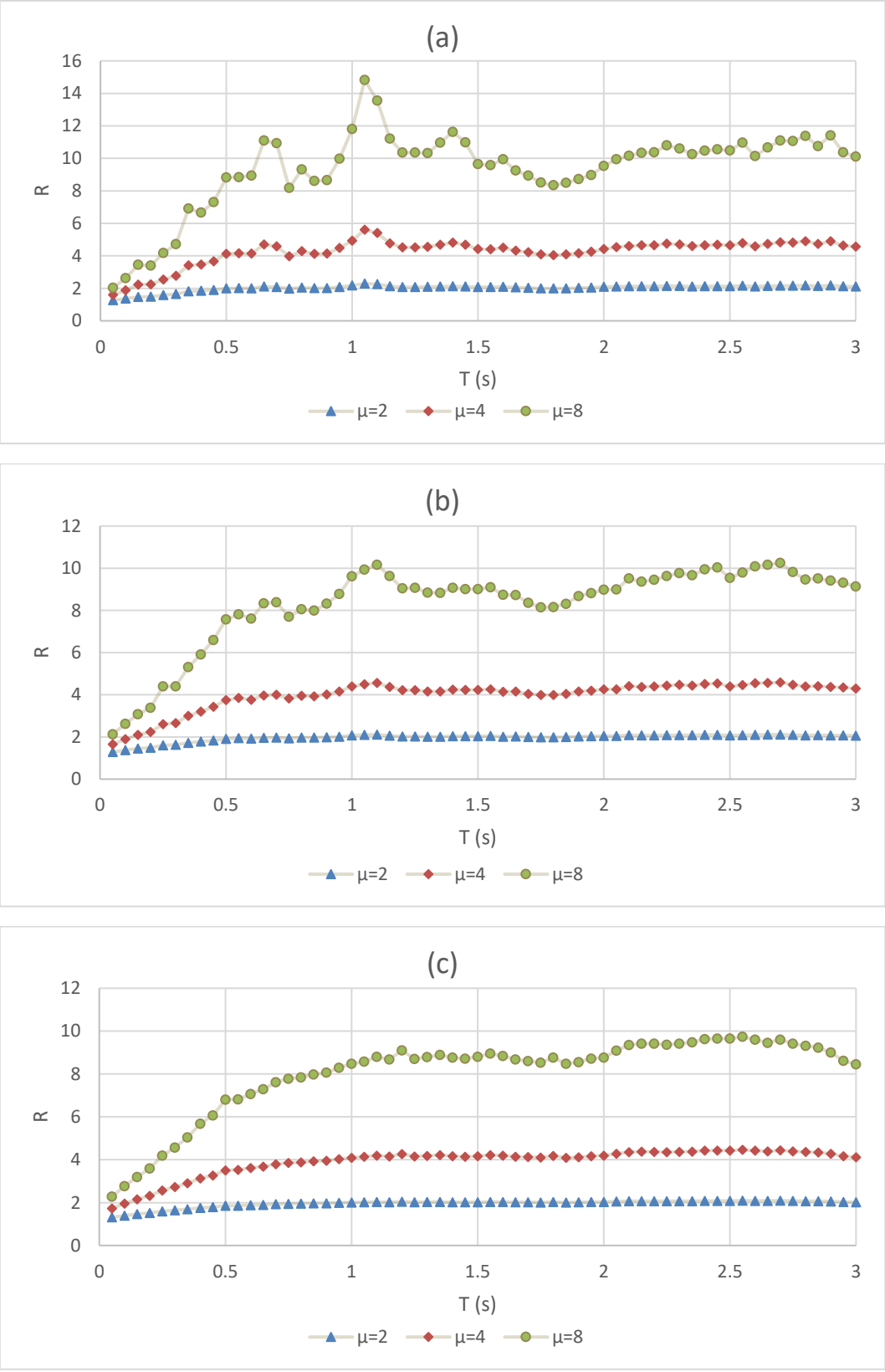
6.2 Davranış ve Ortalama Rμ- μ-T Spektrumları

Elde edilen bu spektrumların sönüm ve süneklik oranlarının bu spektrumlar üzerinde etkisi incelenmiştir. Dayanım spektrumuna bağlı olarak %2 %5 %10 sönüm oranları ve μ =1-2-4-8 süneklik oranlarına alınarak süneklik- süneklik azaltma faktörü-periyot ilişkisi incelenmiş ve spektrumları elde edilmiştir. Rμ- μ-T adlandırılan bu üçlünün davranış spektrumları ve bu davranış spektrumlarının sayısal olarak ortalaması alınarak ortalama Rμ- μ -T spektrumu elde edilmiştir. Daha sonra yumuşak ve sert zeminlerin ortalama Rμ- μ-T sismik tepkileri karşılaştırılmıştır.

Yumuşak zemin grubunun, için öncelikle bir kuvvetli yer hareketi için Rμ- μ-T davranış spektrumu (diğer yer hareketlerinin Rμ- μ-T spektrumları ek2c'de verilmiştir), daha sonra 24 kuvvetli yer hareketinin ortalama Rμ- μ-T spektrumu verilmiştir.

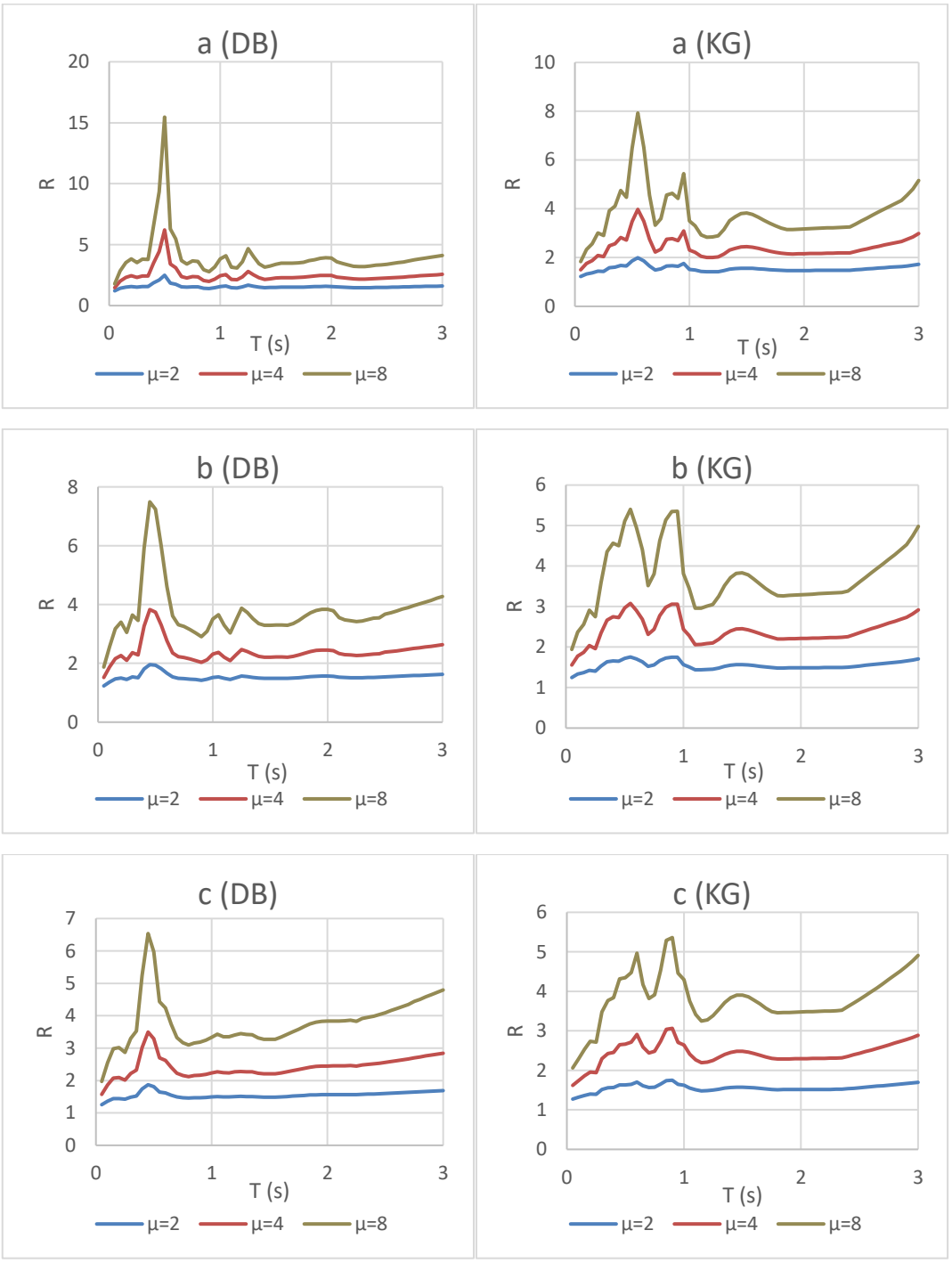


Şekil 34 Düzce depreminin sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için Rμ-μ-T spektrumu

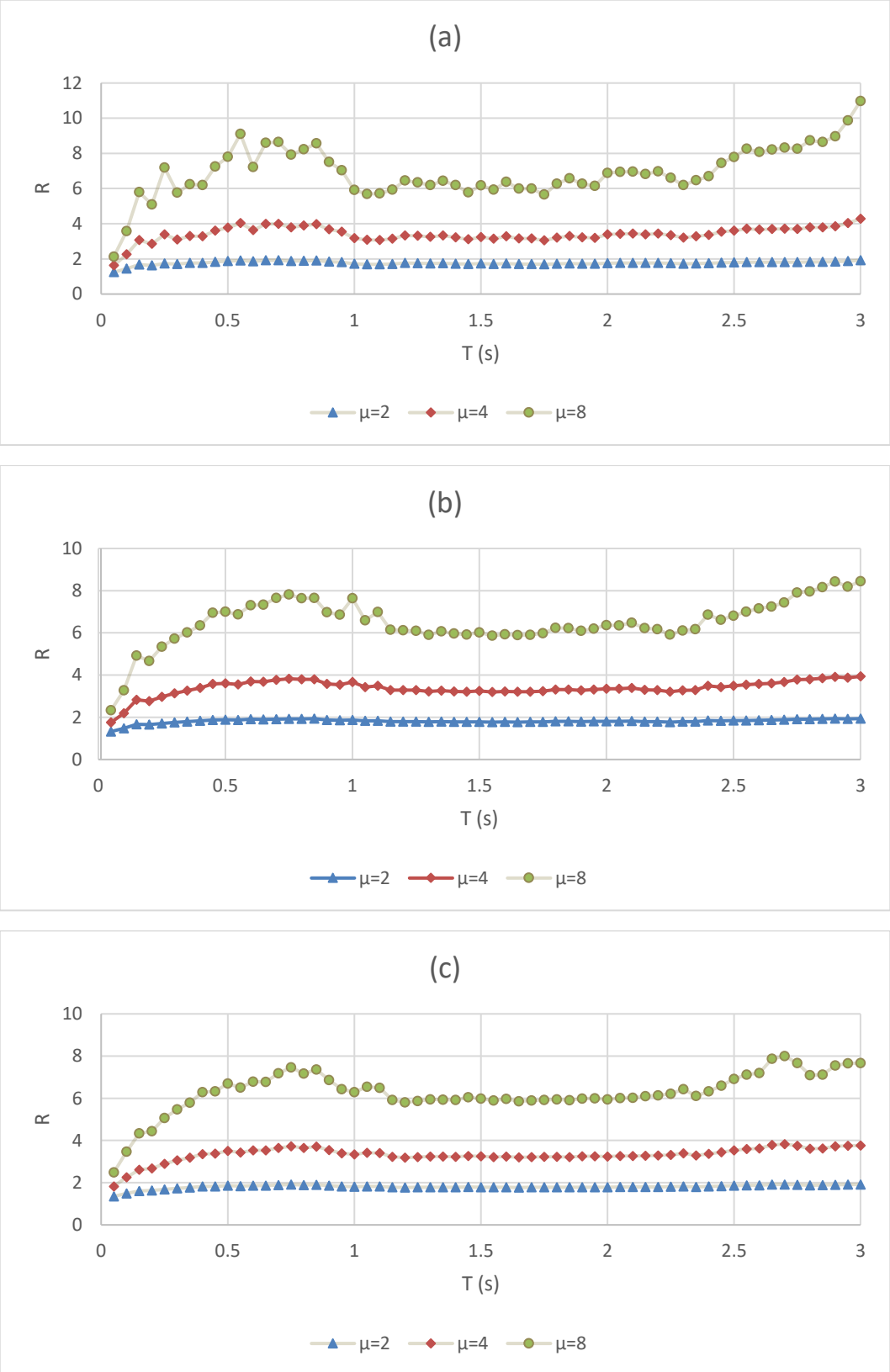


Şekil 35 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu

Sert zemin grubunun, için öncelikle bir kuvvetli yer hareketi için Rμ- μ-T spektrumu (diğer yer hareketlerinin Rμ- μ-T spektrumları ek2d'de verilmiştir) daha sonra 20 kuvvetli yer hareketinin ortalama Rμ- μ-T spektrumu verilmiştir.

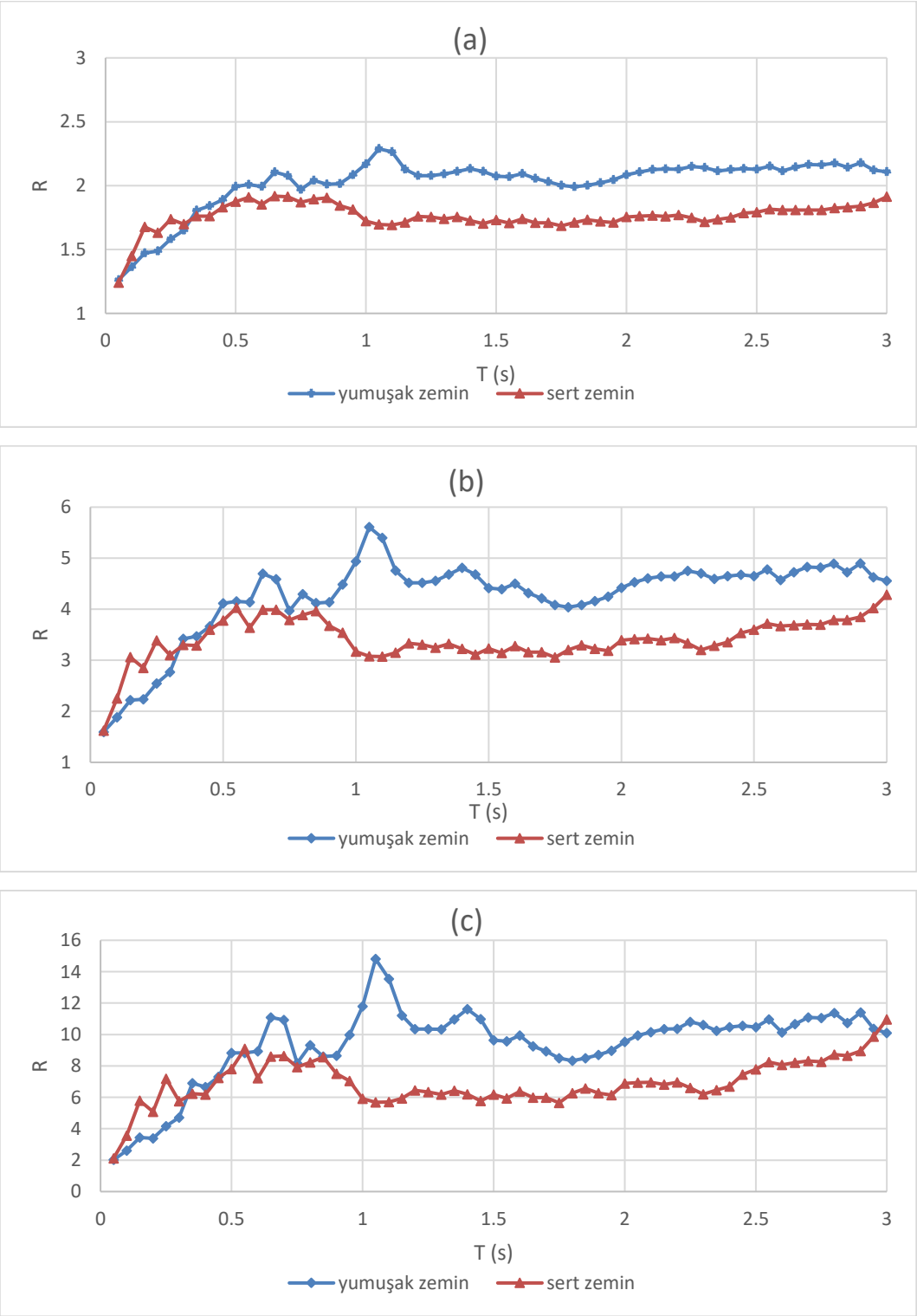


Şekil 36 Kocaeli depreminin sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için Rμ-μ-T spektrumu



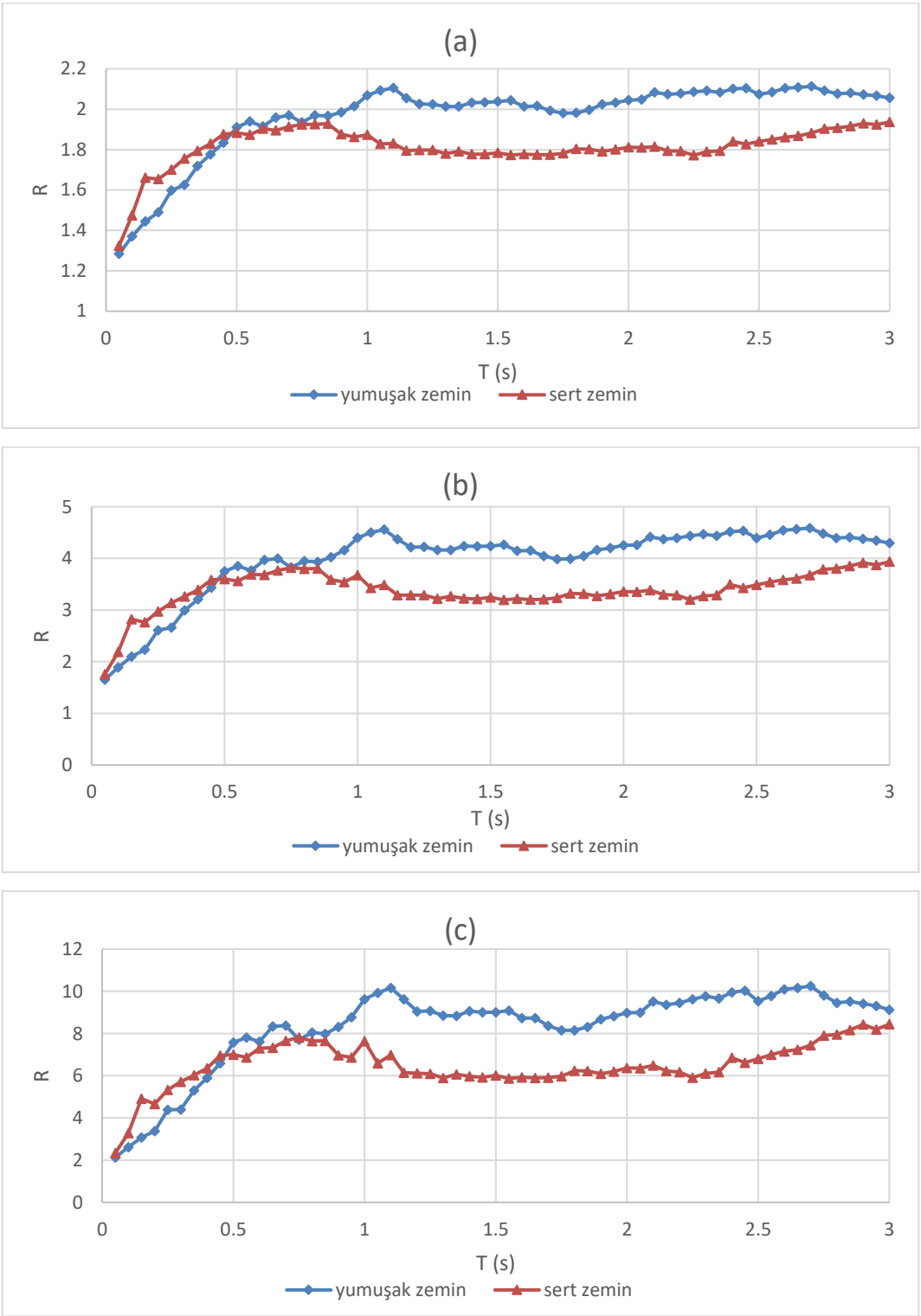
Şekil 37 Sönüm oranı a=%2, b= %5, c= %10 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu

Yumuşak ve sert zemin gruplarının sönüm oranı %2 için süneklik talepleri farkı grafikleri verilmiştir.



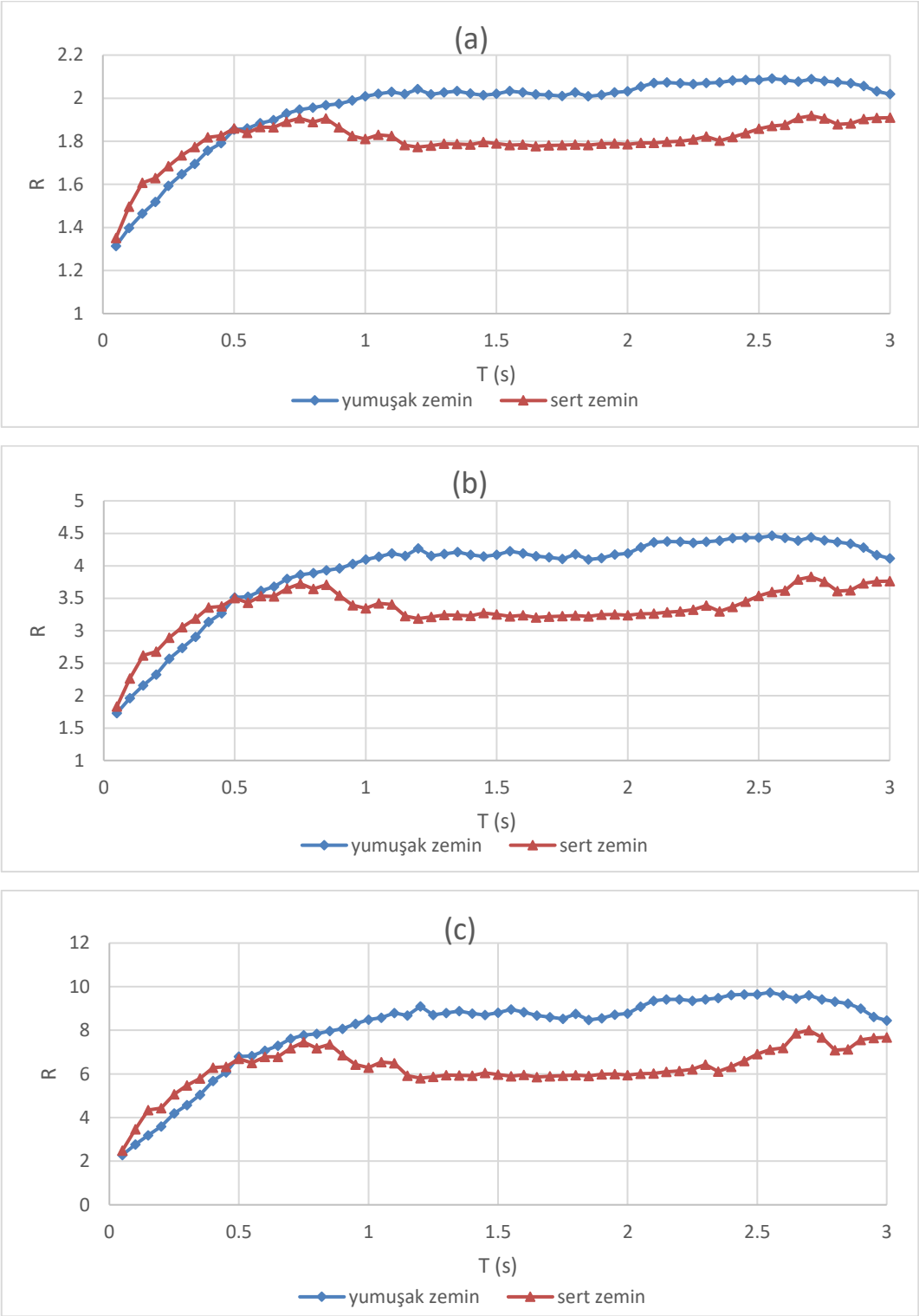
Şekil 38 a) μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması

Yumuşak ve sert zemin gruplarının sönüm oranı %5 için süneklik talepleri farkı grafikleri verilmiştir.



Şekil 39 μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması

Yumuşak ve sert zemin gruplarının sönüm oranı %10 için süneklik talepleri farkı grafikleri verilmiştir.



Şekil 40 μ=2, b) μ=4, c) μ=8 için yumuşak ve sert zeminin gruplarının süneklik taleplerinin karşılaştırılması

6.3 Ortalama Rμ- μ-T için Regresyon Analizi

Burada istatiksel sonuçlar neticesinde ve R μ için aşağıda verilen sınır koşullarına bağlı olarak ortalama R μ- μ-T için regresyon analizi yapılarak tahmini denklemi verilmiştir. T burada sistemin doğal titreşim periyodu, μ süneklik oranı ve a,b,c,d ise regresyon parametleri olarak sert ve yumuşak zemin sınıfları için verilen katsayılardır. Tablo 1 ise regresyon parametlerini özetlenmektedir.

Rμ (T→0, μ) =1 $$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{1 + \frac{aT + b}{cT^2 + dT}} + 1$$

Rμ (T, μ=1) =1

Tablo 4 Regresyon analizi sonucunda bulunan farklı zeminler için uygun katsayılar

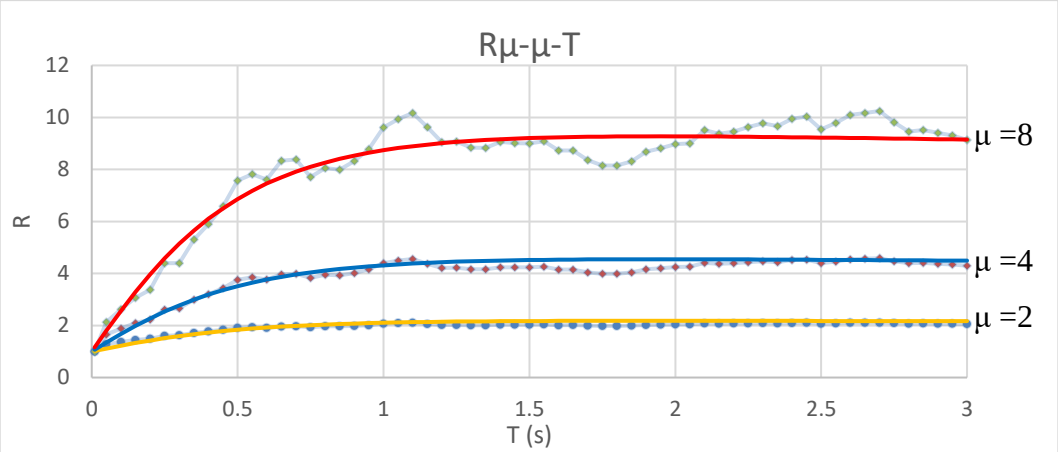
Zemin sınıfları	a	b	c	d
Sert Zemin	0.60	0.38	0.035	3.98
Yumuşak Zemin	-84.88	61.27	105.29	141.79

6.4 Ortalama R μ- μ-T Spektrumun Araştırmacılarla Karşılaştırılması

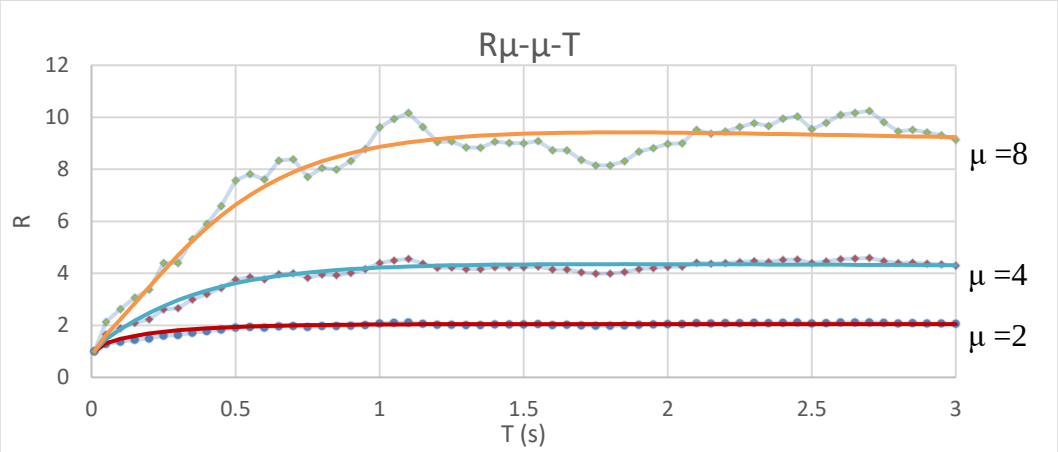
Sert ve yumuşak zeminlerin ortalama Rμ-μ-T spektrumu analizler sonucu elde edilen ve ortalama Rμ-μ-T spektrumu dikkate alınarak bulunan Rμ-μ-T regresyon eğrisi, Krawinkler ve Nassar ile Newmark ve Hall'ın önerdiği Rμ-μ-T tasarım spektrumuyla karşılaştırması yapılarak aralarındaki farklar irdelenmiştir

Yumuşak zemin grubunun sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu, regresyon eğrisi, Krawinkler ve Nassar, Newmark ve Hall Rμ-μ-T spektrumları ile karşılaştırılarak aralarındaki farklar incelenmiş ve grafikleri verilmiştir.

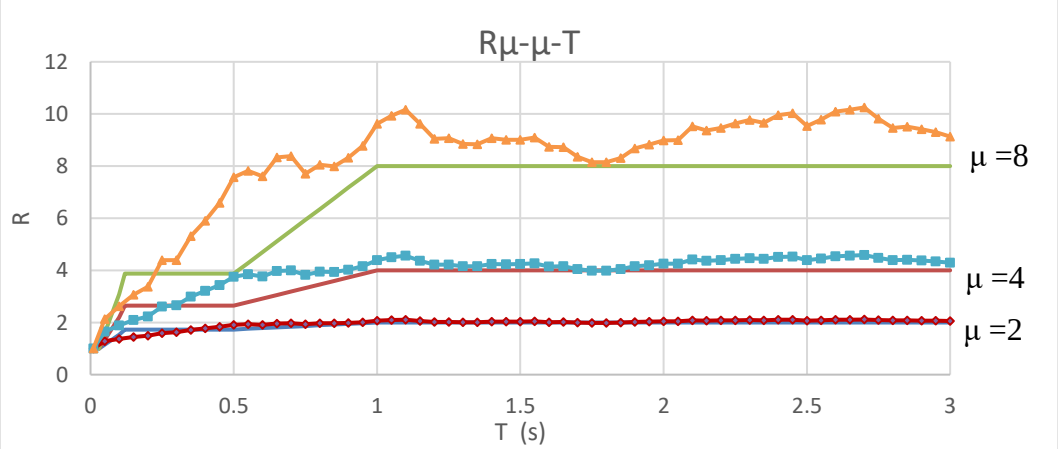
(a)



(b)

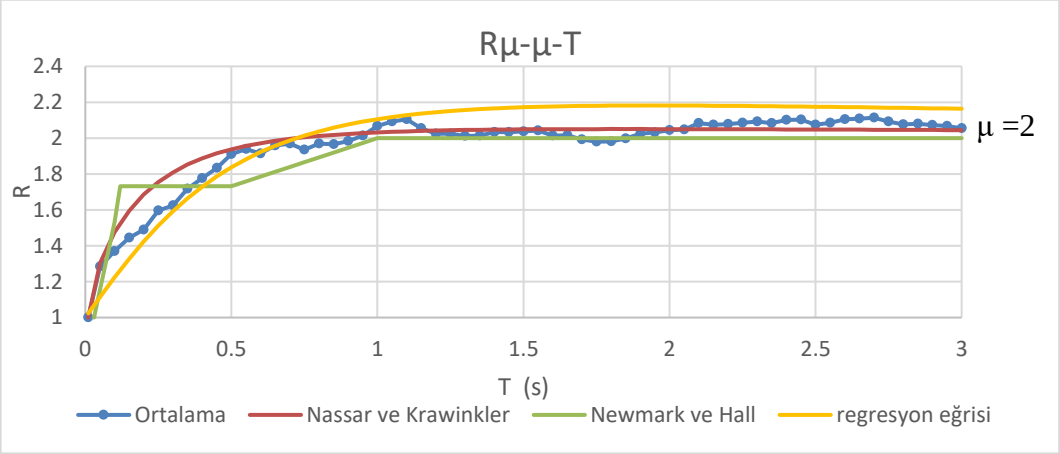


(c)

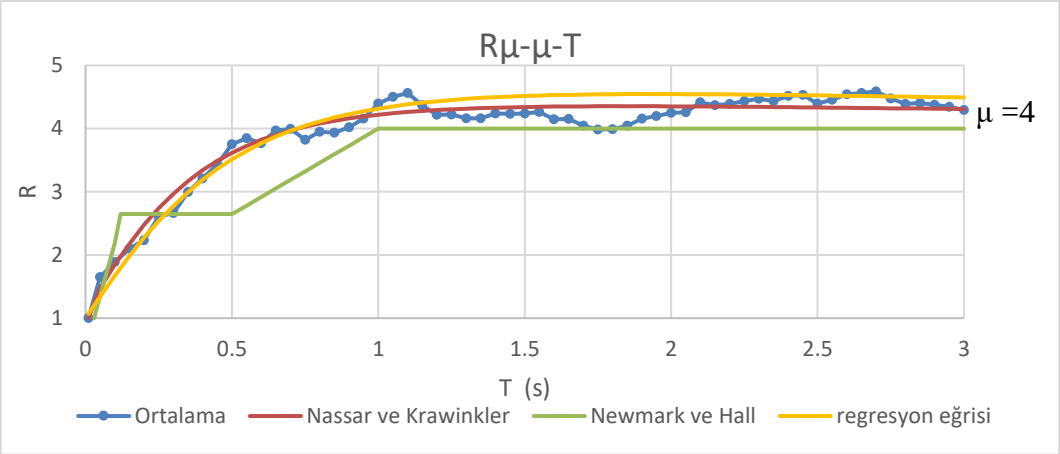


Şekil 41 sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumunun a) Regresyon eğrisi, b) Krawinkler ve Nassar, c) Newmark ve Hall karşılaştırılması

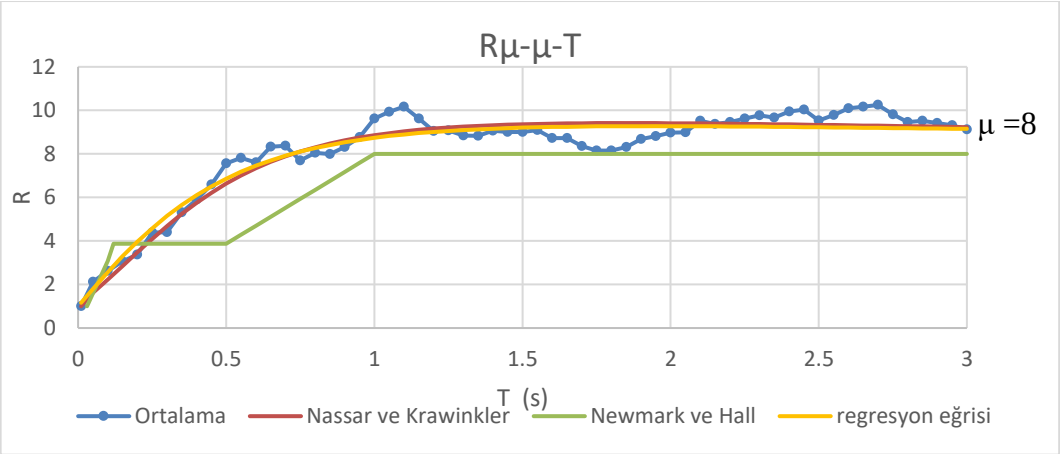
(a)



(b)



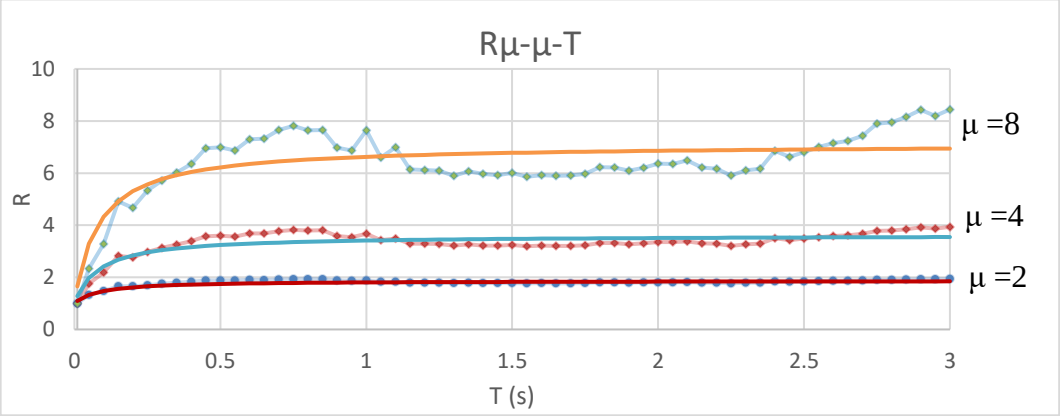
(c)



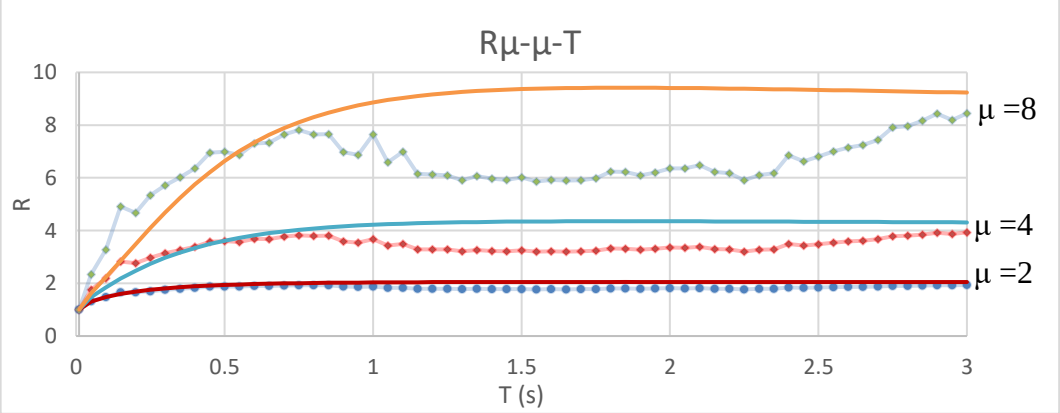
Şekil 42 a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 için ortalama Rμ-μ-T spektrumun, araştırmacıların spektrumlarıyla karşılaştırılması

Sert zemin grubunun sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumu, regresyon eğrisi, Krawinkler ve Nassar, Newmark ve Hall Rμ-μ-T spektrumları ile karşılaştırılarak aralarındaki farklar incelenmiş ve grafikleri verilmiştir.

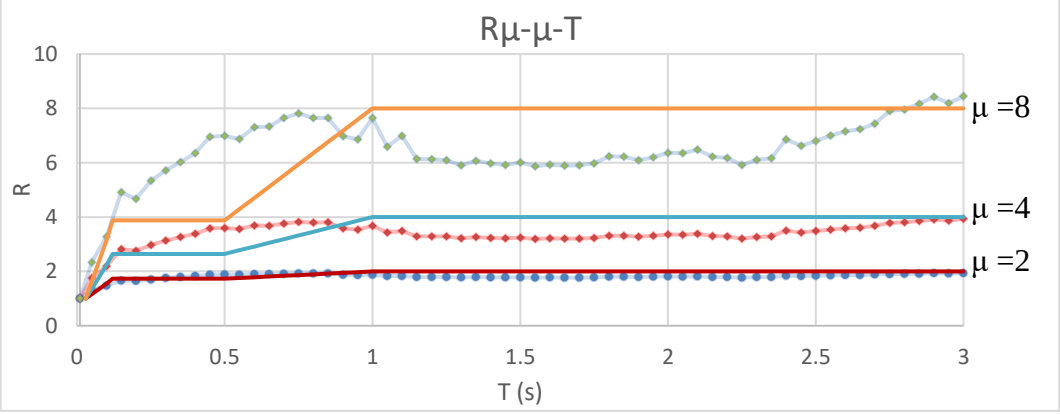
(a)



(b)

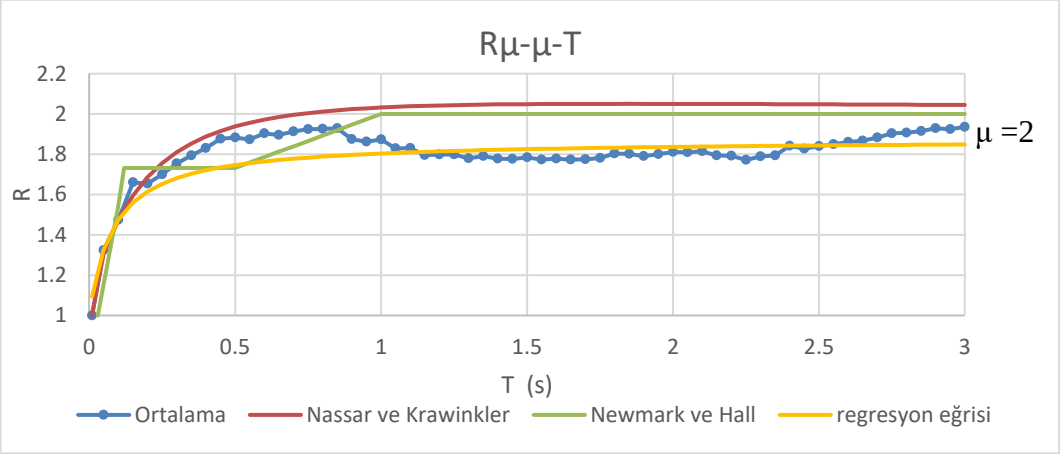


(c)

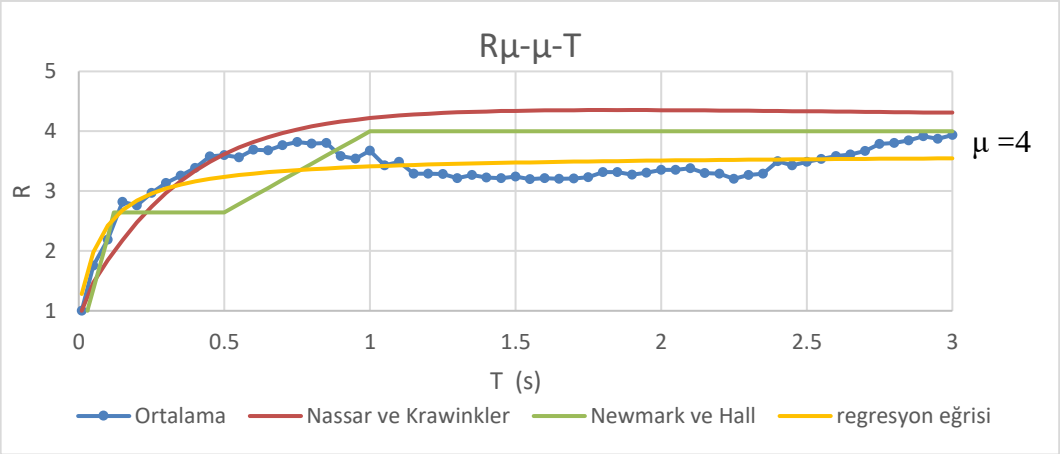


Şekil 43 sönüm oranı %5 için ortalama Rμ-μ-T spektrumunun a) Regresyon eğrisi, b) Krawinkler ve Nassar, c) Newmark ve Hall karşılaştırılması

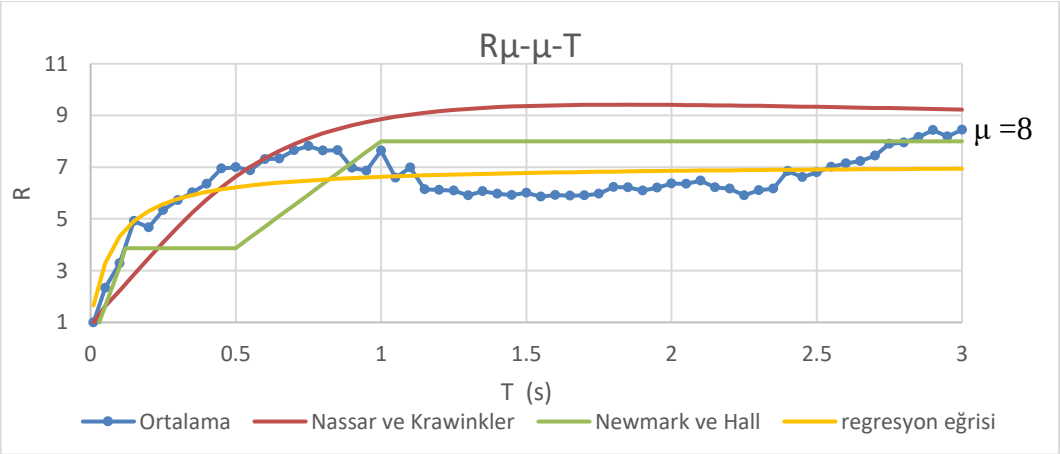
(a)



(b)



(c)

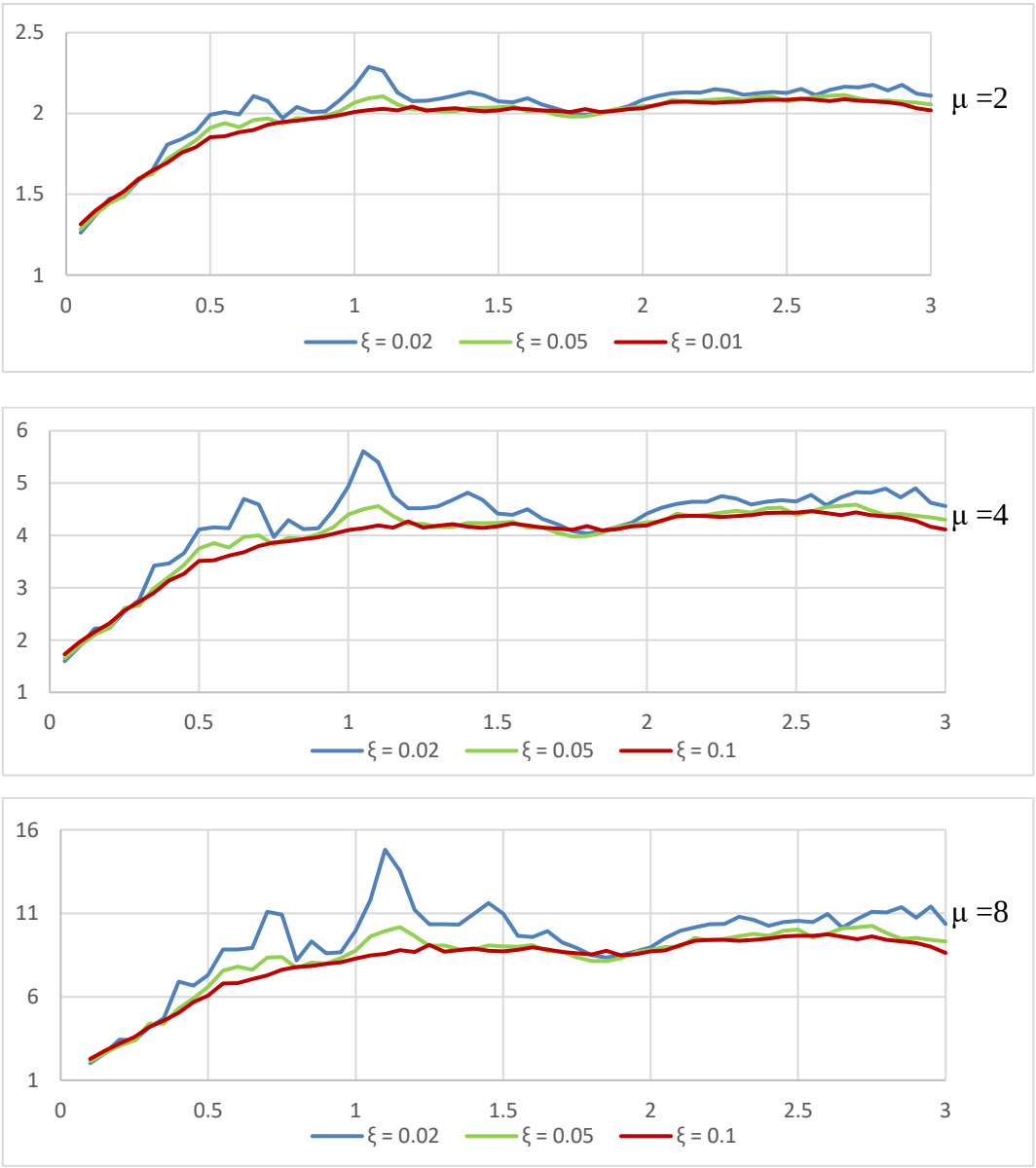


Şekil 44 a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 için ortalama Rμ-μ-T spektrumun, araştırmacıların spektrumlarıyla karşılaştırılması

6.6 sönümün ortalama Rμ-μ-T spektrumu üzerindeki etkisi

Sönüm oranları %2, %5 ve %10 ile sönümün ortalama Rμ-μ-T spektrumu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

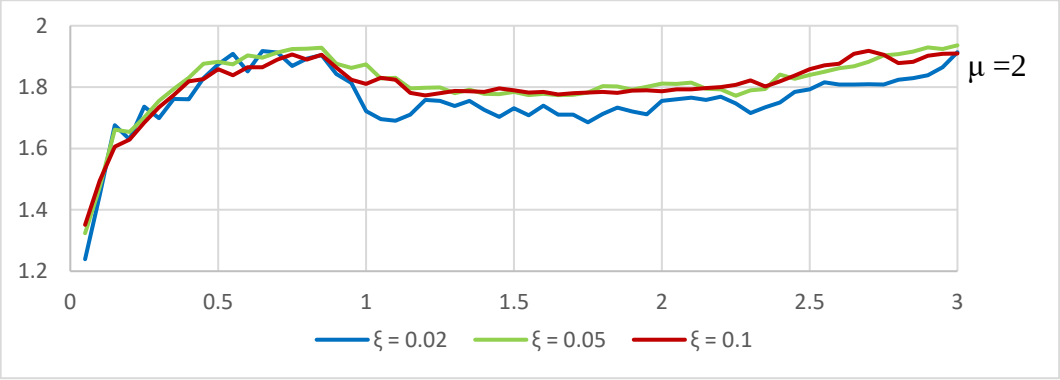
Yumuşak zemin grubu için farklı sönüm oranlarına bağlı olarak ortalama Rμ-μ-T spektrumunun sırasıyla μ = 2,4,8 grafikleri aşağıda verilmiştir.



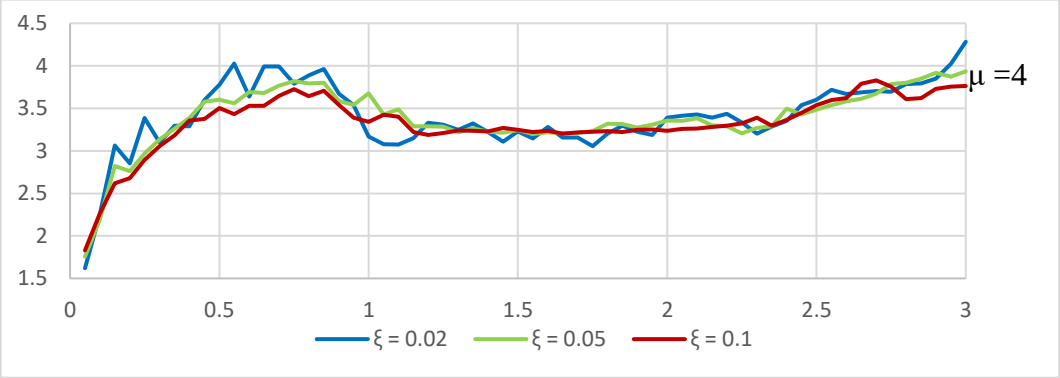
Şekil 45 farklı sönüm değerlerinin a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 süneklik spektrumu üzerindeki etkisi (yumuşak zemin grubu)

Sert zemin grubu için farklı sönüm oranlarına bağlı olarak ortalama Rμ-μ-T spektrumunun sırasıyla μ = 2,4,8 grafikleri aşağıda verilmiştir.

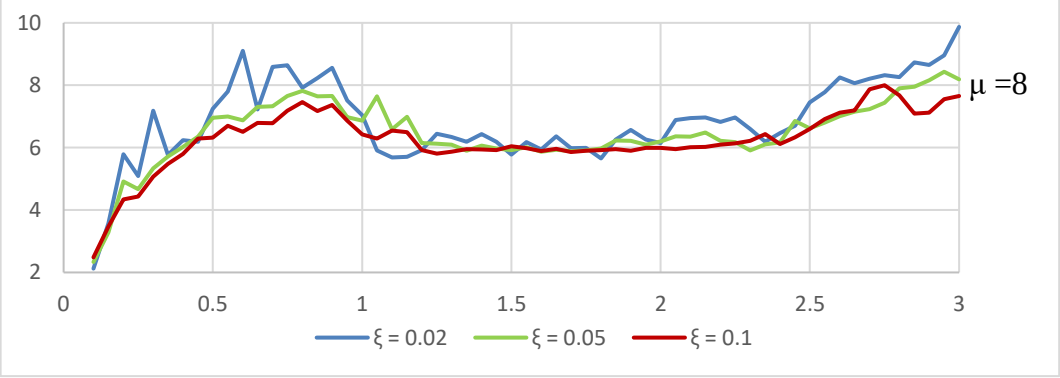
(a)



(b)



(c)



Şekil 46 farklı sönüm değerlerinin a) μ =2, b) μ =4, c) μ =8 süneklik spektrumu üzerindeki etkisi (sert zemin grubu)

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada TSD sistemin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi ile elastoplastik çevrimsel davranış modeli kullanılarak düzeltilmiş 44 adet kuvvetli yer hareketi yumuşak ve sert zemin grubu olarak gruplandırılmış ve TSD sitemi için analizler yapılmıştır. Belirli sabit μ değerlerine karşılık ivme, hız, yer değiştirme spektrumları ve R μ -μ-T arasındaki ilişki elde edilmiştir.

Elastik ötesi davranışa izin verilen TSD sisteminin akma dayanımı, TSD sistemin elastik kalması için gereken dayanımdan daha küçüktür. Şekil 22-25-28-31'de anlaşıldığı gibi süneklik oranı artıkça gereken akma dayanımın azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak Süneklik oranı artıkça dayanımdan azalma artsa da bu artma hızı giderek düşmüştür.

um ile ue arasında göreceli bir ilişki olduğu ve bu ilişkinin sistemin doğal periyodu Tn, yer hareketi özelliklerine ve diğerlerine göre önemli ikinci husus olan sönümüne bağlıdır.

Elastik ötesi yer değiştirme spektrumlarında gözlemlendiği gibi şekil 24-27-30-33 kısa periyot bölgesinde um Elastik ötesi yer değiştirmenin tepe değeri, elastik sistemin yer değiştirme tepe değeri ue, akma dayanımı düştükçe ve Tn periyodu azaldıkça um değerinin ue yi aştığı gözlemlenmiş. Orta periyot bölgesinde um değerinin ue değerinden büyük veya küçük olduğu ve hem um hem de ue, R μ etkisinde küçük ama göz ardı edilmeyecek kadar düzensiz bir şekilde etkilendiği gözlemlenmiştir. Burada süneklik talebi R μ değerinden büyük veya küçük olabileceğini gösterir. İleri periyot bölgelerinde ise um değerinin akma dayanımdan bağımsız olduğu ve nerdeyse ue elastik yer değiştirme tepe değerine yakınsayacağını gösterir.

Süneklik oranı için izin verilen dayanım azaltması T'ye bağlı olarak değişir. Kısa periyot bölgesinde R μ = 1 yakınlaştığı bu da azaltmanın olmadığı anlamına geldiği ve süneklik talebinin dayanım azaltma faktöründen büyük olduğunu gösterir. Orta periyot bölgelerinde ise R μ değerlerinin Tn'ye bağlı olarak düzensiz şekilde değişmiş ve ileri periyot bölgelerinde R, μ'ya yakınsamıştır. Burada tek yer hareketi için Şekil 34-36'de gözlemlendiği gibi Tn periyoduna bağlı olarak spektrum eğrileri düzensiz biçimde değişse de ortalama R μ- μ-T şekil 35-37 daha düzgün biçimde değişmiştir.

Yumuşak zemin sahalarından kaydedilen yer hareketlerinin, sert zemin sahalarından kaydedilen yer hareketlerinin sistemden talep ettiği dayanım azaltma faktörü arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Kısa periyot yapılarda genellikle yumuşak zeminlerin sismik tepkisi, sert zeminlerin sismik tepkisinden büyük olur. Belirli bir $0 \leq T \leq 0.5s$ periyod aralığına kadar sert zemin sismik tepkisi yumuşak zemin tepkisinden azdır. Bu nedenle sert zemin grubunun dayanımı azaltma faktörü, yumuşak zemin grubu dayanımı azaltma faktöründen daha büyük değer almıştır. İleri periyot bölgelerinde ise birbirine yakınsayacağını gösterir.

Burada istatiksel sonuçlar neticesinde ve R μ için verilen sınır koşullarına bağlı olarak ortalama R μ- μ-T için regresyon analizi yapılmıştır ve elde edilen sonuçlara göre regresyon analizi sert zemin R μ- μ-T spektrumu için daha uyumlu davranış göstermiştir.

Süneklik değerleri için μ = 4,8 için yumuşak zemin grubunun şekil 42'de ortalama R μ- μ-T spektrumun, Newmark ve hall ile Nassar ve Krawinkler R μ- μ-T spektrumları ile karşılaştırılmış ve ortalama R μ- μ-T spektrumunun Nassar Krawinkler spektrumuyla daha uyumlu davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Yumuşak zemin grubu μ=2 değeri $0 \leq T \leq 0.5s$ periyoduna kadar ortalama dayanım azaltma faktörü değeri Nassar Krawinkler dayanım azaltma faktörü değeri altında kalsa da ileri periyot bölgelerinde uyumlu davranış göstermiştir. Süneklik değerleri için μ = 4,8 için sert zemin grubunun şekil 44'de $0 \leq T \leq 0.5s$ periyodu arasında ortalama R μ- μ-T spektrumunun dayanım azaltma faktörü talebi tasarım spektumlarının dayanım azaltma faktörü talebi değerinden yüksek olsa da orta periyot bölgesinde tasarım spektrumuna göre R μ değeri daha düşük kalmıştır. İleri periyot bölgesinde ise R değeri μ değerine yakınsayacağını gösterir.

Akmanın ve sönümün etkilerinin hem benzerlik hem de farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Üç farklı sönüm oranı (%2 %5 %10) ve μ =2, 4, 8 için aynı grafik üzerinde birbirlerine göre görece etkileri gözlemlenebilir. Her ikisi de Şekil 22-25-28-31 de gözlemlendiği gibi ivme Sai'yi tepe değerini ve yanal kuvvetin tepe değerini azaltmasıdır. Doğal titreşim periyodunun sıfıra yakınlaştığı durumda ivme değerinin maksimum yer ivmesi tepe değerine yakınlaştığı akma ve sönümden etkilenmediği gözlemlenmiştir. Şekil 27-33 de ileri periyot bölgelerinde, sönümün etkisinin yer değiştirme spektrumu üzerinde etkisi çok küçüktür. Akmanın etkisi ileri periyot bölgelerinde um üzerinde etkisi pek hissedilmez. Sönümün şekil 23-26-29-32

gözlemlendiği gibi hız spektrumlarında sönüm sistemin tepkisini azaltmakta ve akmanın etkisi hız spektrumlarında daha da kuvvetlidir.

Elastik ötesi davranış gösteren sistemler, elastik davranış gösteren sistemlere göre sönümün etkisi daha küçüktür ve Elastik ötesi yer değiştirme artıkça sönümün etkisi azalır.

Sönümün, dayanım azaltma faktörü üzerinde etkisi olsa da bu etki kuvvetli olmadığından tasarımda göz ardı edilir.

EK'LER

Filtrelenmiş kuvvetli yer hareketi kayıtlarından TSD sistemlerin doğrusal elastik ve elastik ötesi sistemlerin deplasman, hız ve ivme tepki spektrumlarını elde etmek için sunulan bilgisayar hesap algoritmaları verilmiştir. Diğer ekler kısmında ise yer değiştirme, hız ve ivme tepki spektrumları ve R μ- μ-T spektrumları verilmiştir.

EK1a: Newmark sabit ortalama yöntemi ile doğrusal sistemler için çözüm algoritması

1) Başlangıç hesaplamaları

a) $\hat{u}=0$ ve $u=0$

b) m,c,k, ωn

c) $\ddot{u}o = \frac{1}{m}(F_0 - c\hat{u}_0 - ku_0)$

2) uygun zaman adımı Δt seçilir

3) efektif rijitliği hesaplanır

$$\hat{k} = k + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4m}{\Delta t^2}$$

4) her zaman adımı için dinamik artım kuvveti hesapla

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + [\frac{4m}{\Delta t} + 2c]\,\hat{u}_i + 2m\ddot{u}_i$$

5) artımlı yer değiştirme için

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta\hat{P}$$

6) artımlı hız ve ivme için hesaplama

$$\Delta\hat{u}_i = \frac{2}{\Delta t}\Delta u_i - 2\hat{u}_i$$

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{4}{\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{4}{\Delta t}\hat{u}_i - 2\ddot{u}_i$$

7) zamandaki yer değiştirme, hız ve ivmeyi hesapla

$$u_{i+1} = \Delta u + u_i$$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta\hat{u}_i + \hat{u}$

$\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

EK1b: Newmark doğrusal ortalama yöntemi ile doğrusal sistemler için çözüm algoritması

1) Başlangıç hesaplamaları

a) $\hat{u}=0$ ve $u=0$

b) m,c,k, ωn

c) $\ddot{u}o = \frac{1}{m}(F_0 - c\hat{u}_0 - ku_0)$

2) Uygun zaman adımı Δt seçilir

3) Efektif rijitliği hesaplanır

$$\hat{k} = k + \frac{3c}{\Delta t} + \frac{6m}{\Delta t^2}$$

4) Her zaman adımı için dinamik artım kuvveti hesapla

$$\Delta\hat{P}_i = \Delta P_i + [\frac{6m}{\Delta t} + 3c]\hat{u}_i + [3m + c\frac{\Delta t}{2}]\ddot{u}_i$$

5) Artımlı yer değiştirme için

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta\hat{P}$$

6) Artımlı hız ve ivme için hesaplama

$$\Delta\hat{u}_i = \frac{3}{\Delta t}\Delta u_i - 3\hat{u}_i - \frac{\Delta t}{2}\ddot{u}_i$$

$$\Delta\ddot{u}_i = \frac{6}{\Delta t^2}\Delta u_i - \frac{6}{\Delta t}\hat{u}_i - 3\ddot{u}_i$$

7) Zamandaki yer değiştirme, hız ve ivmeyi hesapla

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta\hat{u}_i + \hat{u}_i$

$\ddot{u}_{i+1} = \Delta\ddot{u}_i + \ddot{u}_i$

EK1c: Elastoplastik tek serbestlik dereceli sistemler için adım adım çözüm algoritması

1) Başlangıç hesaplamaları

a) $\hat{u}=0$ ve $u=0$

b) m,c,k, $\omega n, f_y, -f_y$

c) $\ddot{u}o = \frac{1}{m}(F_0 - c\hat{u}_0 - ku_0)$

2) Uygun zaman adımı Δt seçin

3) Akma noktalarını hesapla

$$_{+}uy = \frac{fy}{k} \quad \text{ve} \quad _{-}uy = \frac{-fy}{k}$$

Her zaman için;

1) Sistemin elastik veya plastik durumunu belirlemek için aşağıdaki kodu kullan

Anahtar = 0 (elastik davranış)

Anahtar = -1 (elastik davranış basınçta)

Anahtar = 1 (elastik davranış çekmede)

2) Zaman adımının sonunda yer değiştirme ve hızı hesaplayın ve aşağıdaki koşullara göre anahtar değerini verin

a) Sistem zaman adımı başlangıcında elastik davranıyorsa

$_{-}uy < ui < +uy$ anahtar = 0

$u_i > {}_{+}uy$ anahtar = 1

$u_i < {}_{-}uy$ anahtar = -1

b) Sistem zaman adımı başlangıcında çekmede plastik davranıyorsa

$\hat{u} > 0$ anahtar = 1

$\hat{u} < 0$ anahtar = 0

c) Sistem zaman adımı başlangıcında basınçta plastik davranıyorsa

$\hat{u} < 0$ anahtar = -1

$\hat{u} > 0$ anahtar = 0

4) Efektif rijitliği hesapla

$$\hat{k} = k + \frac{3c}{\Delta t} + \frac{6m}{\Delta t^2}$$

Eğer;

Anahtar = 0 (elastik davranışta) ise $k = k_{elastik}$

Anahtar = 1 veya -1 (plastik davranışta) ise k = 0

5) Artımlı yer değiştirme için

$$\hat{k}_i \Delta u_i = \Delta \hat{P}$$

6) Artımlı hız

$$\Delta \hat{u}_i = \frac{3}{\Delta t} \Delta u_i - 3\hat{u}_i - \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i$$

7) Zamandaki yer değiştirme, hızı hesapla

$u_{i+1} = \Delta u + u_i$

$\hat{u}_{i+1} = \Delta \hat{u}_i + \hat{u}_i$

8) İvmeyi hesapla $\ddot{u}_{i+1}$ dinamik denge denklemini kullanarak hesapla

$\ddot{u}_{i+1} = [P_{i+1} - c\hat{u}_{i+1} - fs(i+1)]$

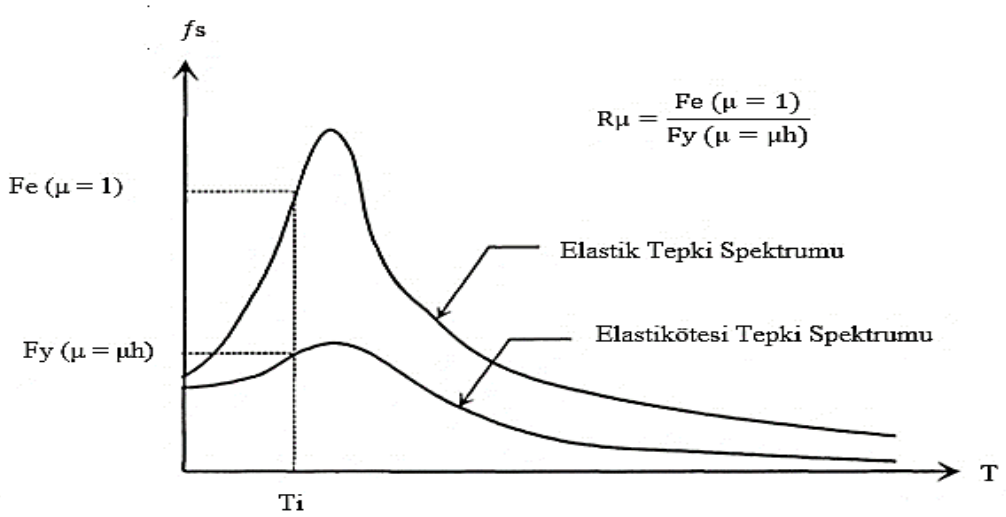
Eğer;

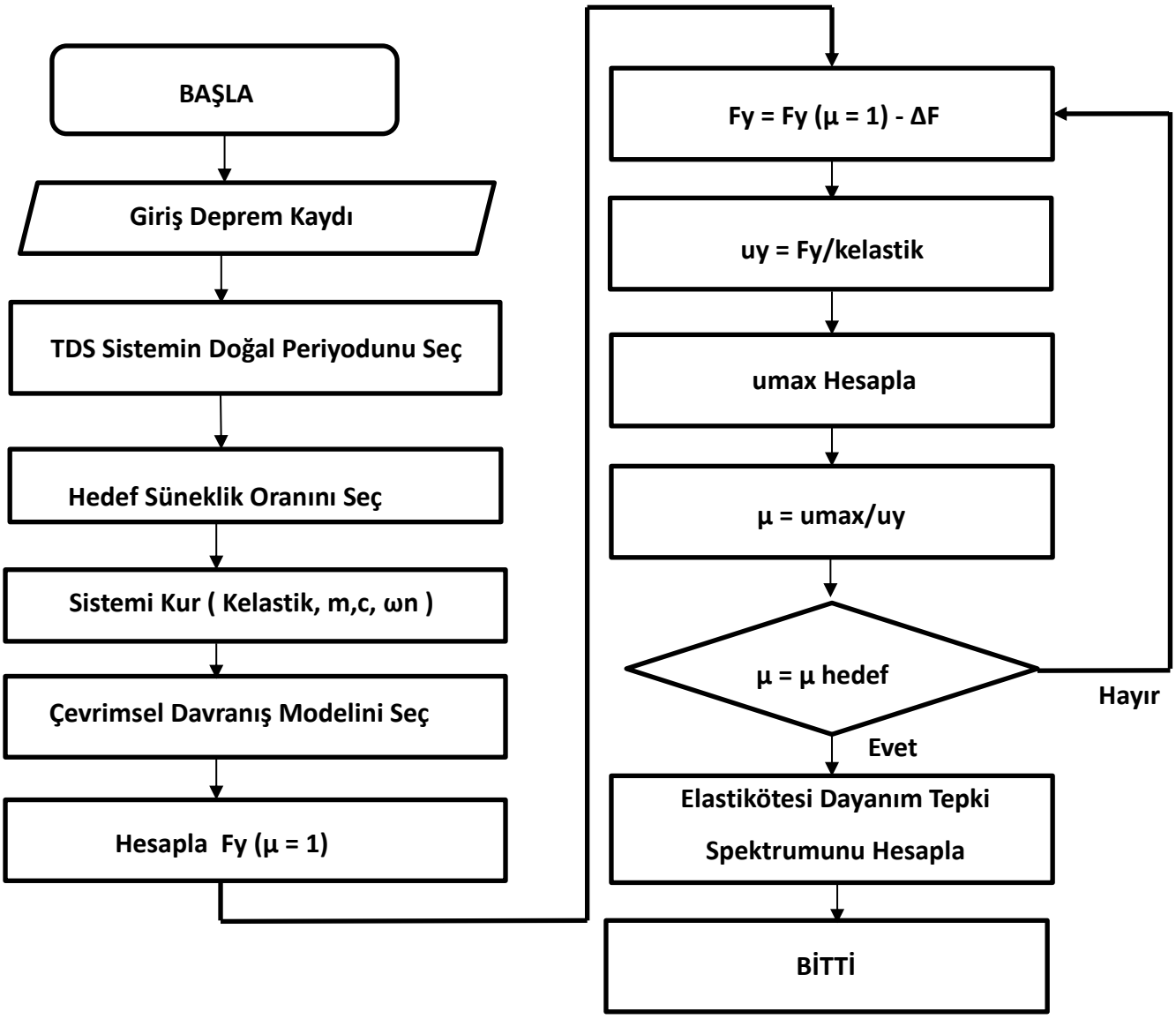
Anahtar = 0 ise $fs_{i+1} = fy - (uy - u_{i+1})k$

Anahtar = 1 ise $fs_{i+1} = fy$

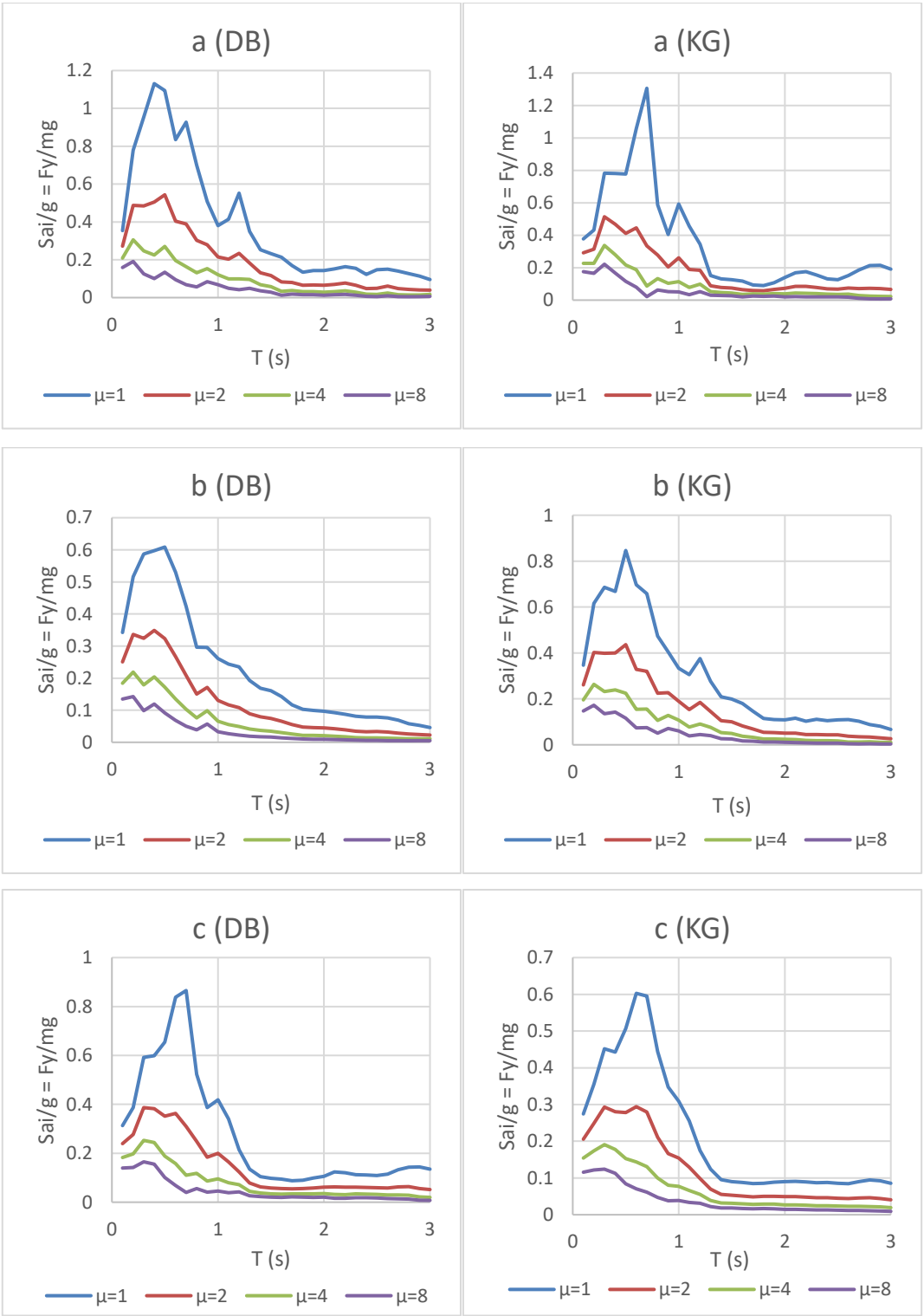
Anahtar = -1 ise $fs_{i+1} = -fy$

EK1d: Elastoplastik tek serbestlik dereceli sistemler için algoritma akış şeması

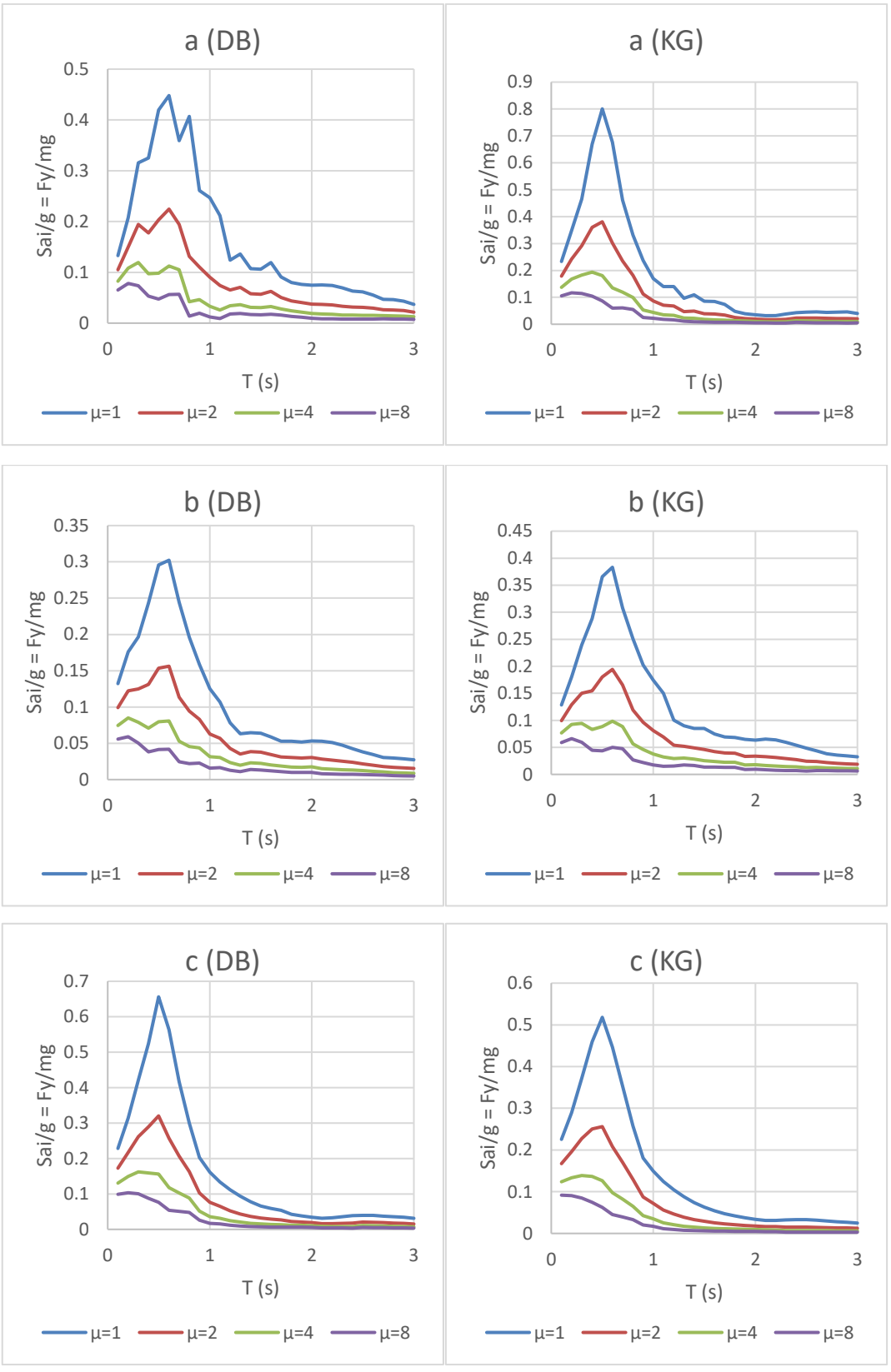




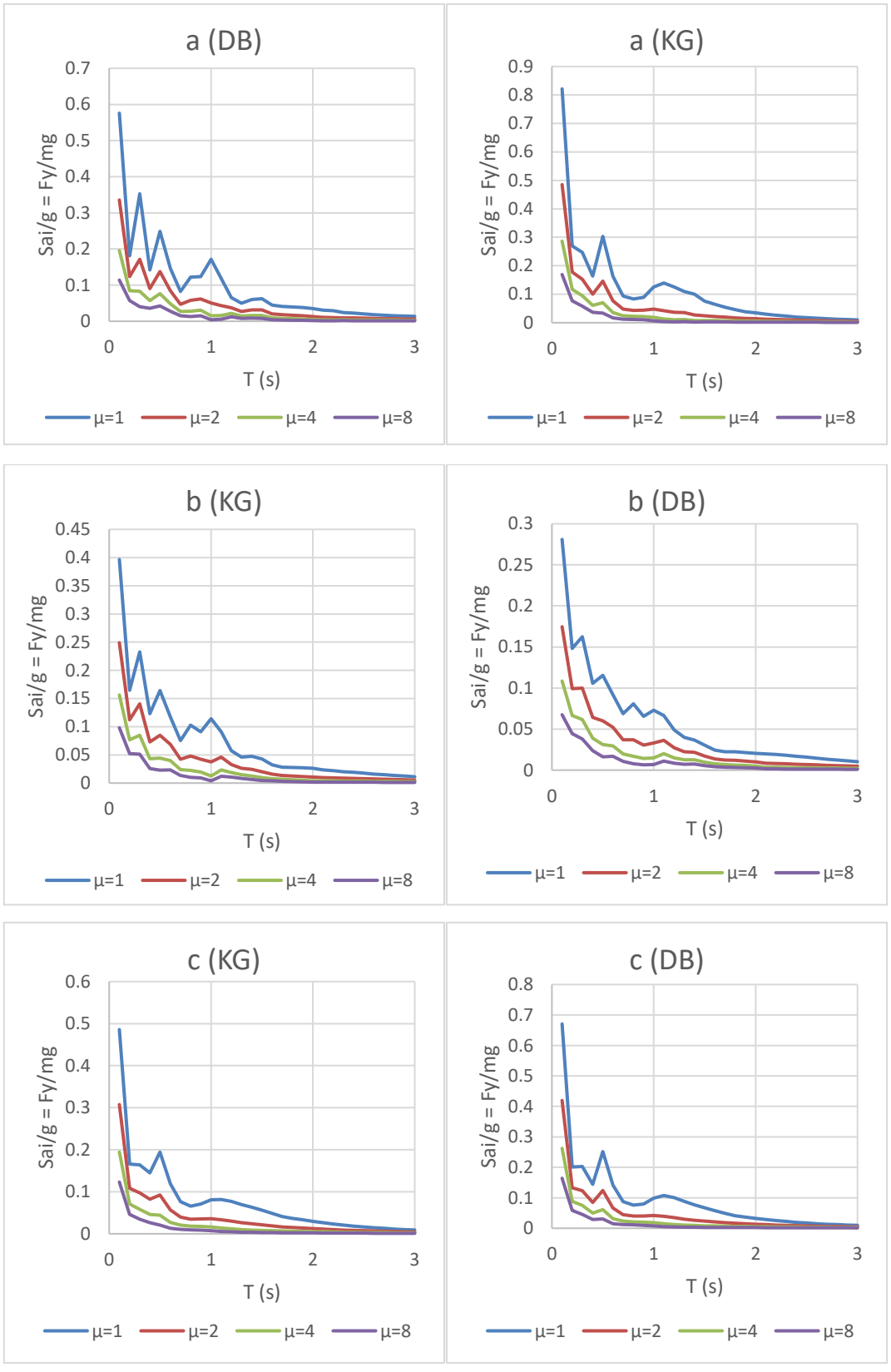
EK2a: Yumuşak zemin grubunun ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumları



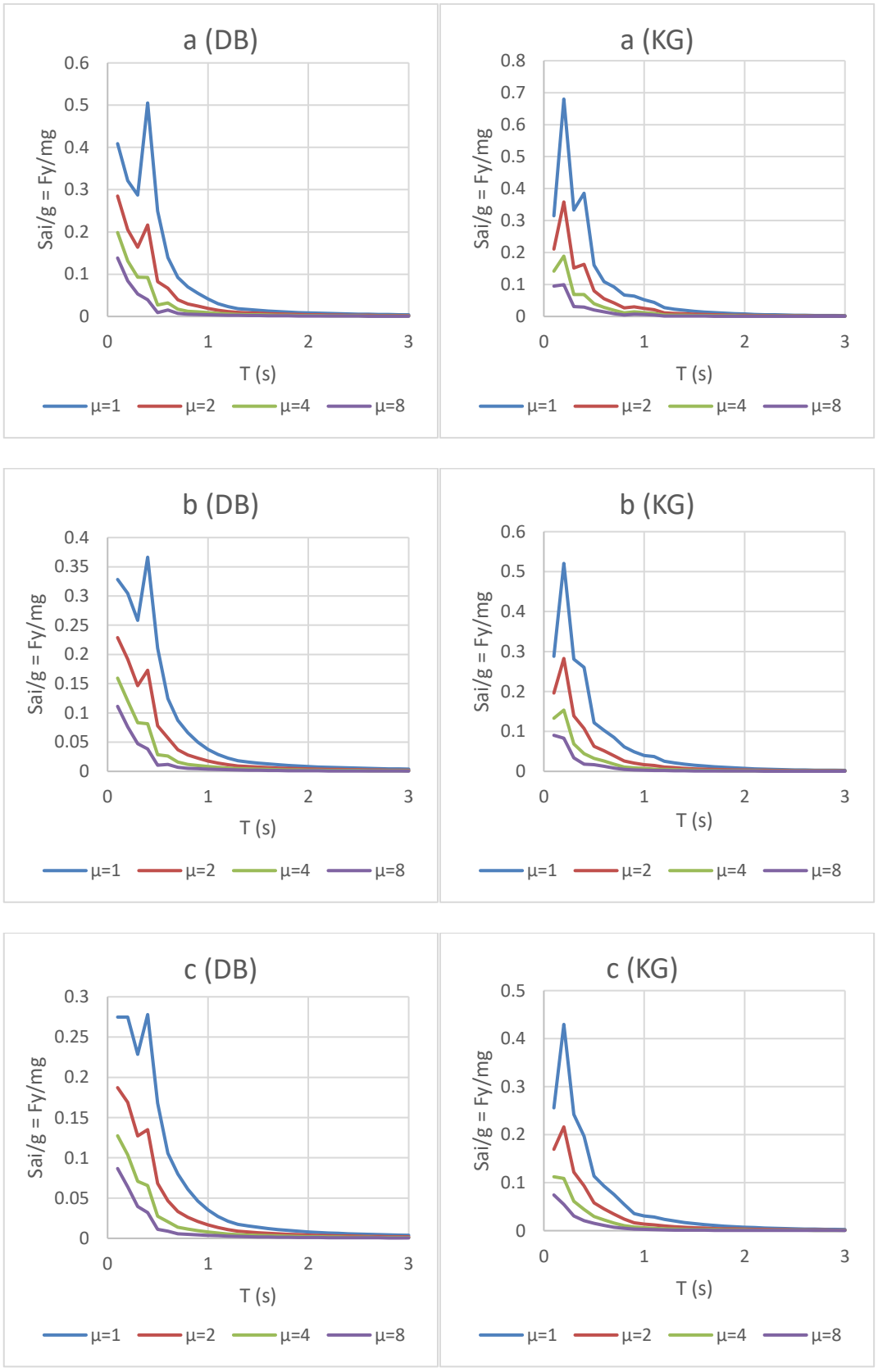
Şekil 47 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b= %5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



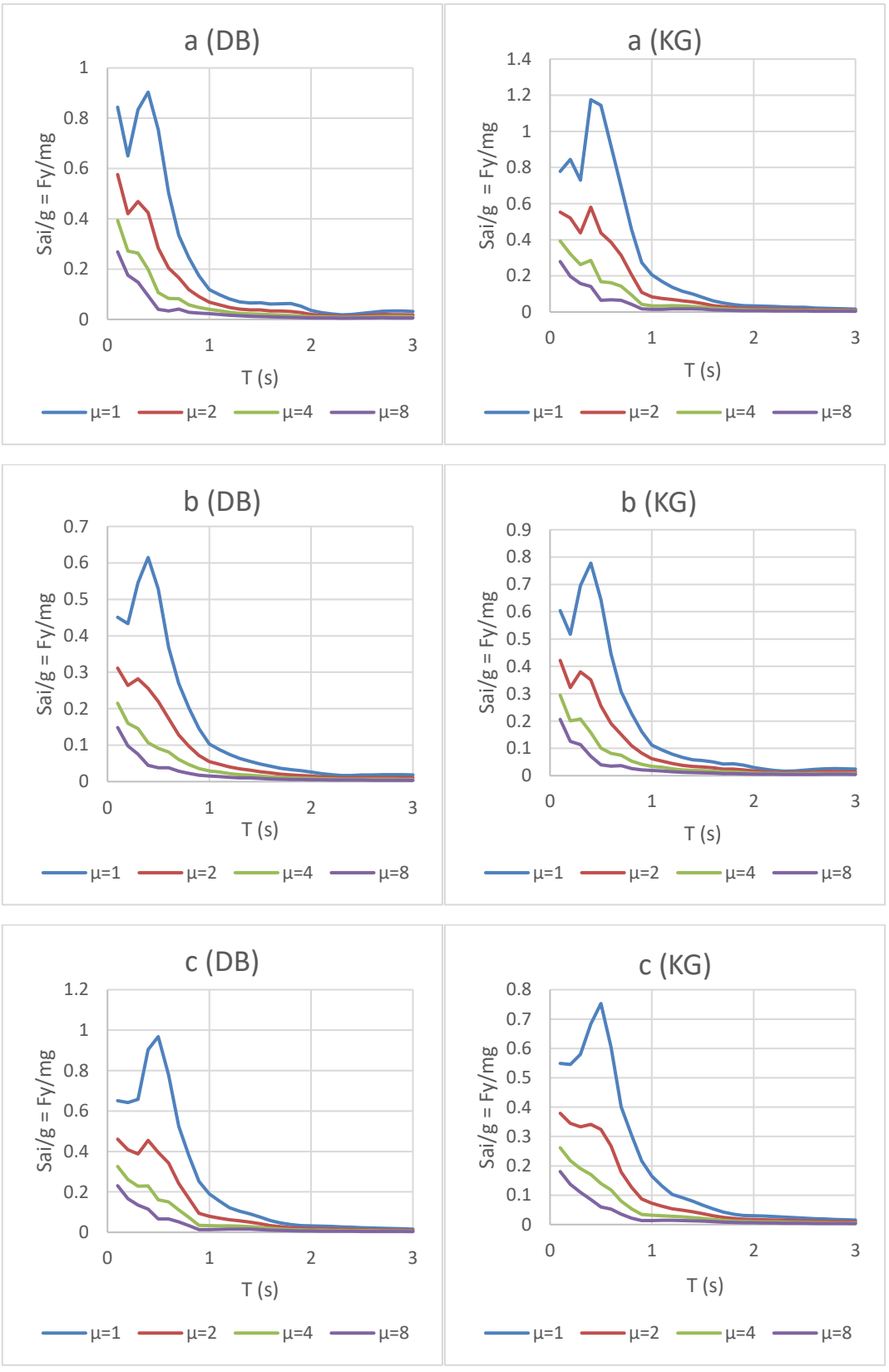
Şekil 48 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



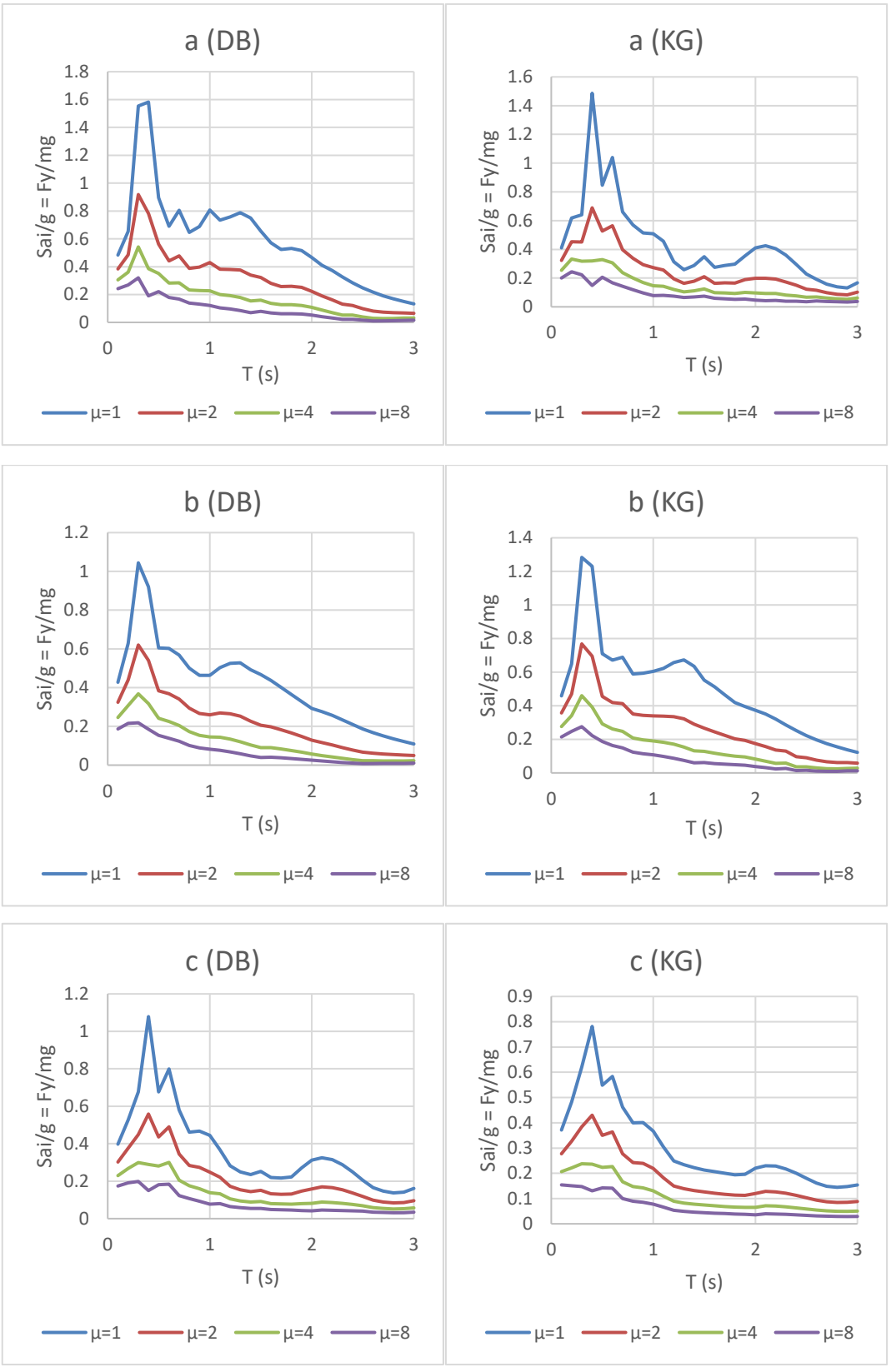
Şekil 49 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



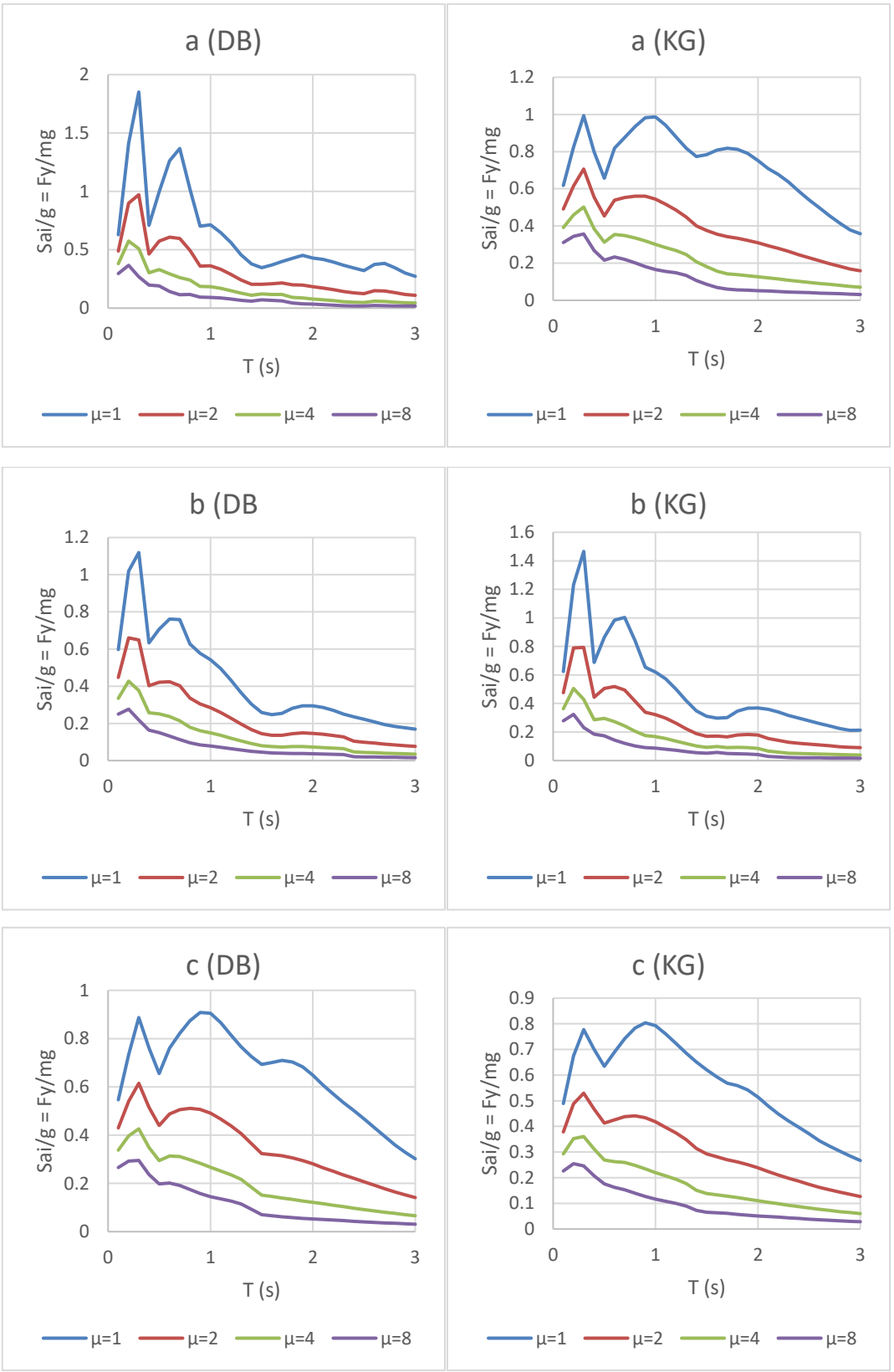
Şekil 50 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



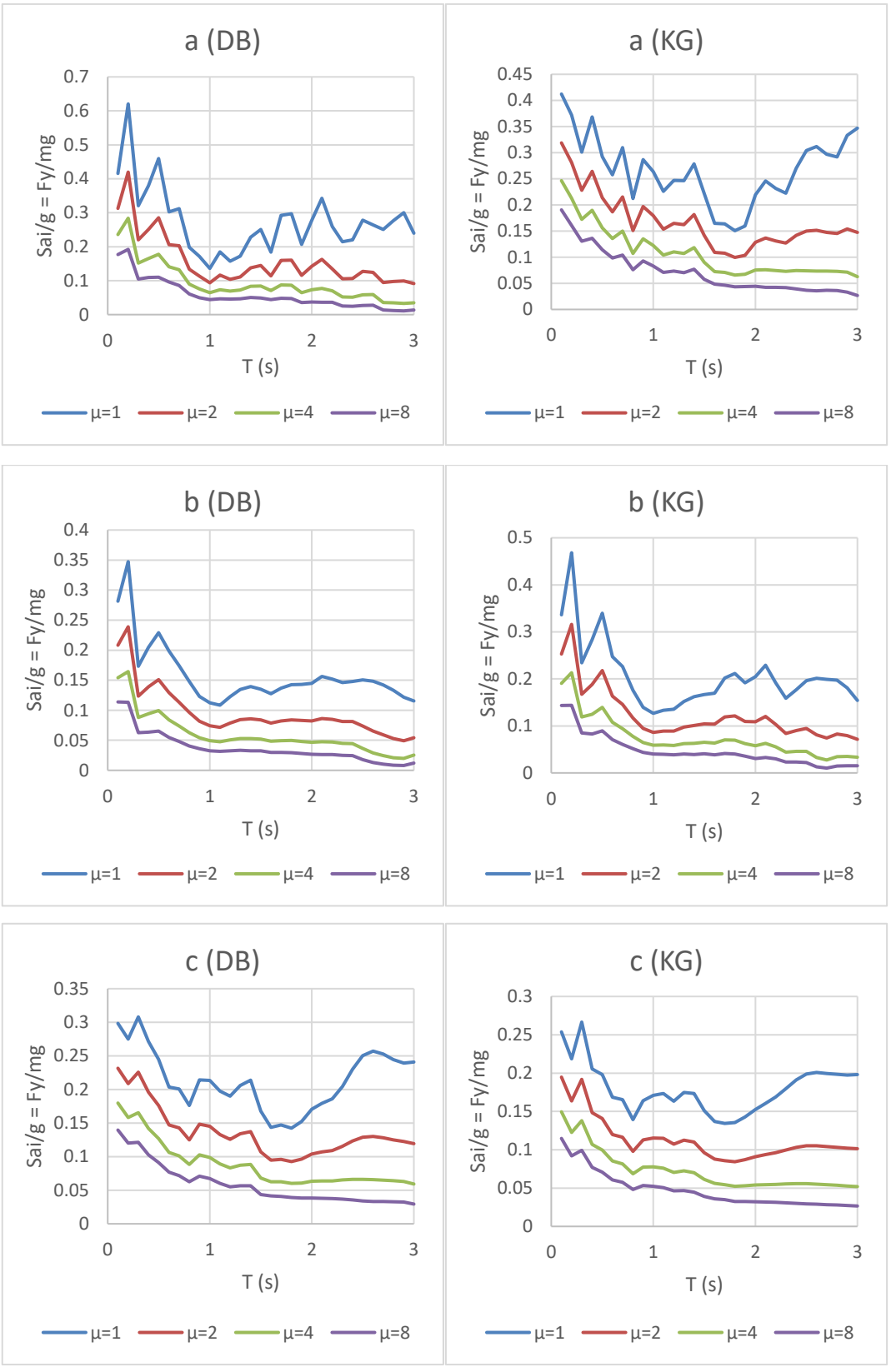
Şekil 51 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



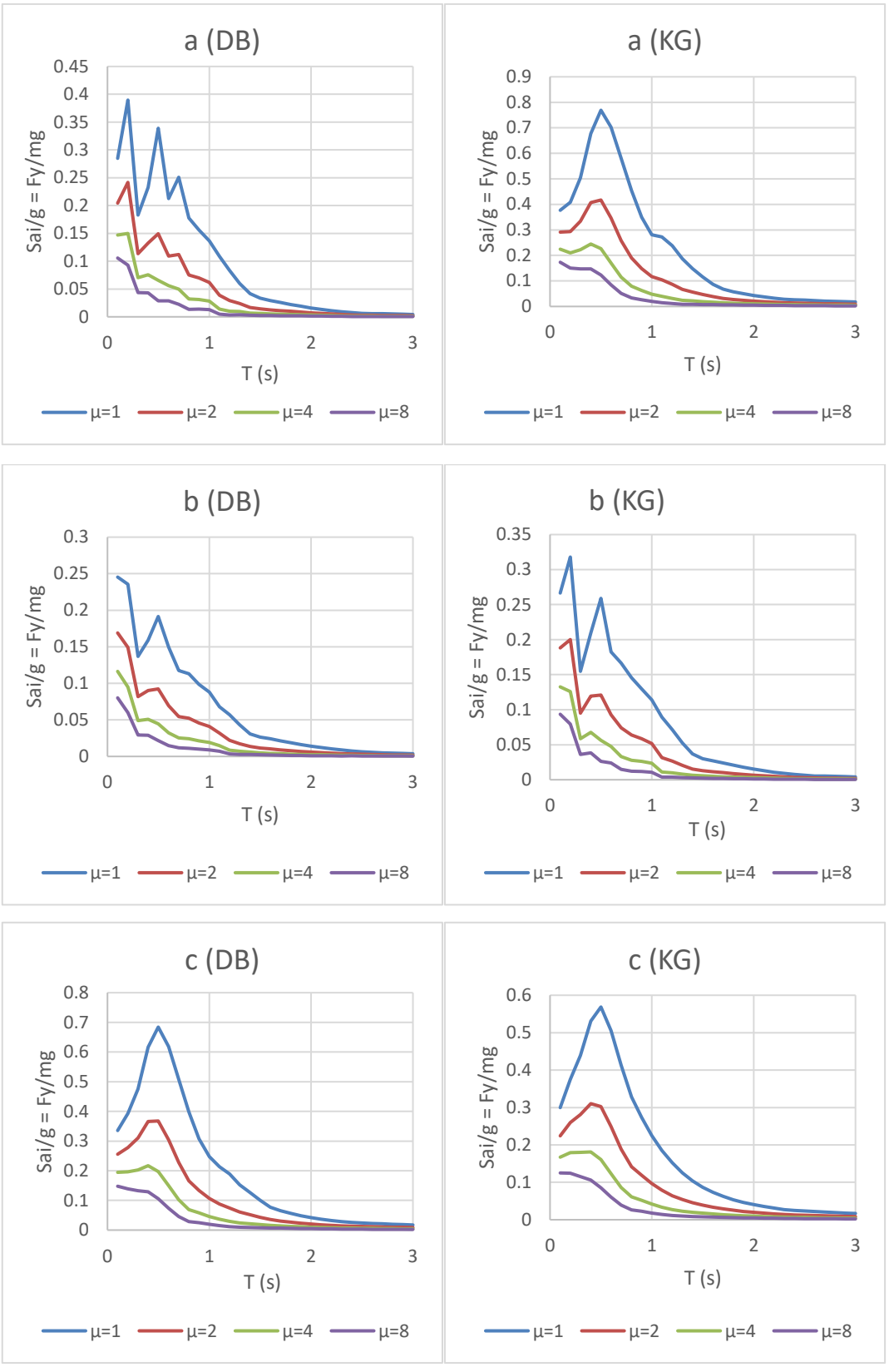
Şekil 52 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



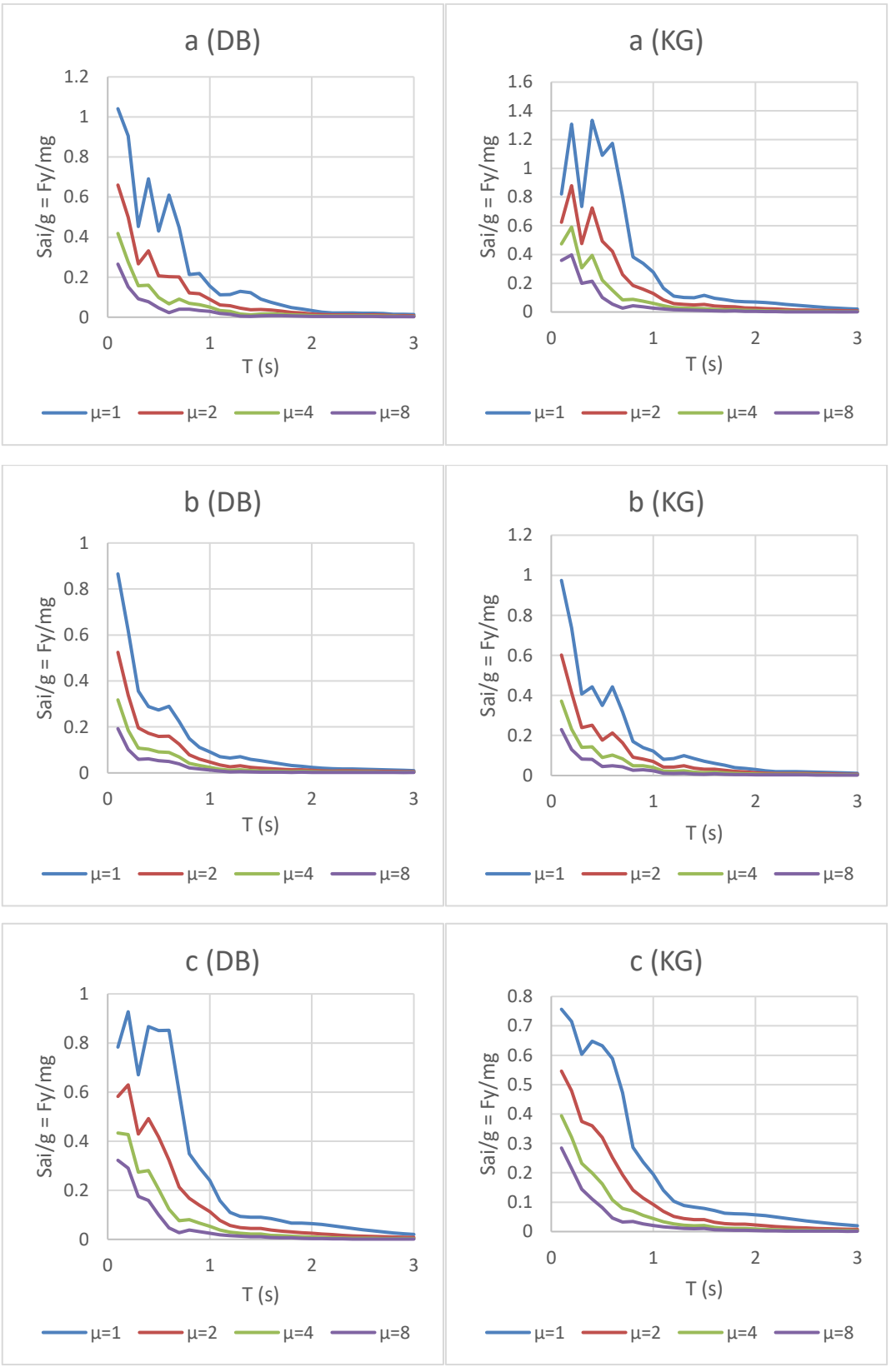
Şekil 53 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2 b=%5 c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



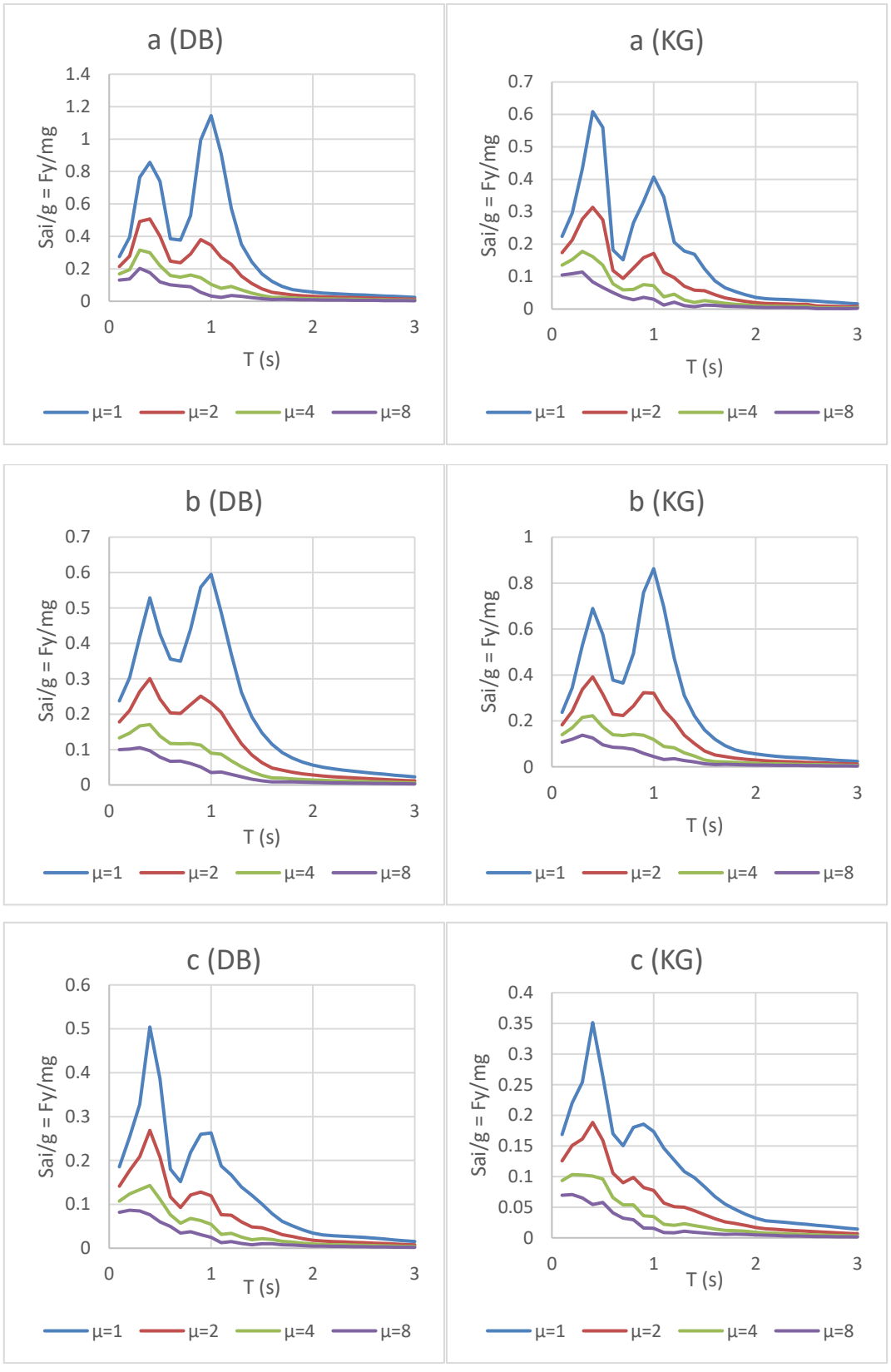
Şekil 54 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



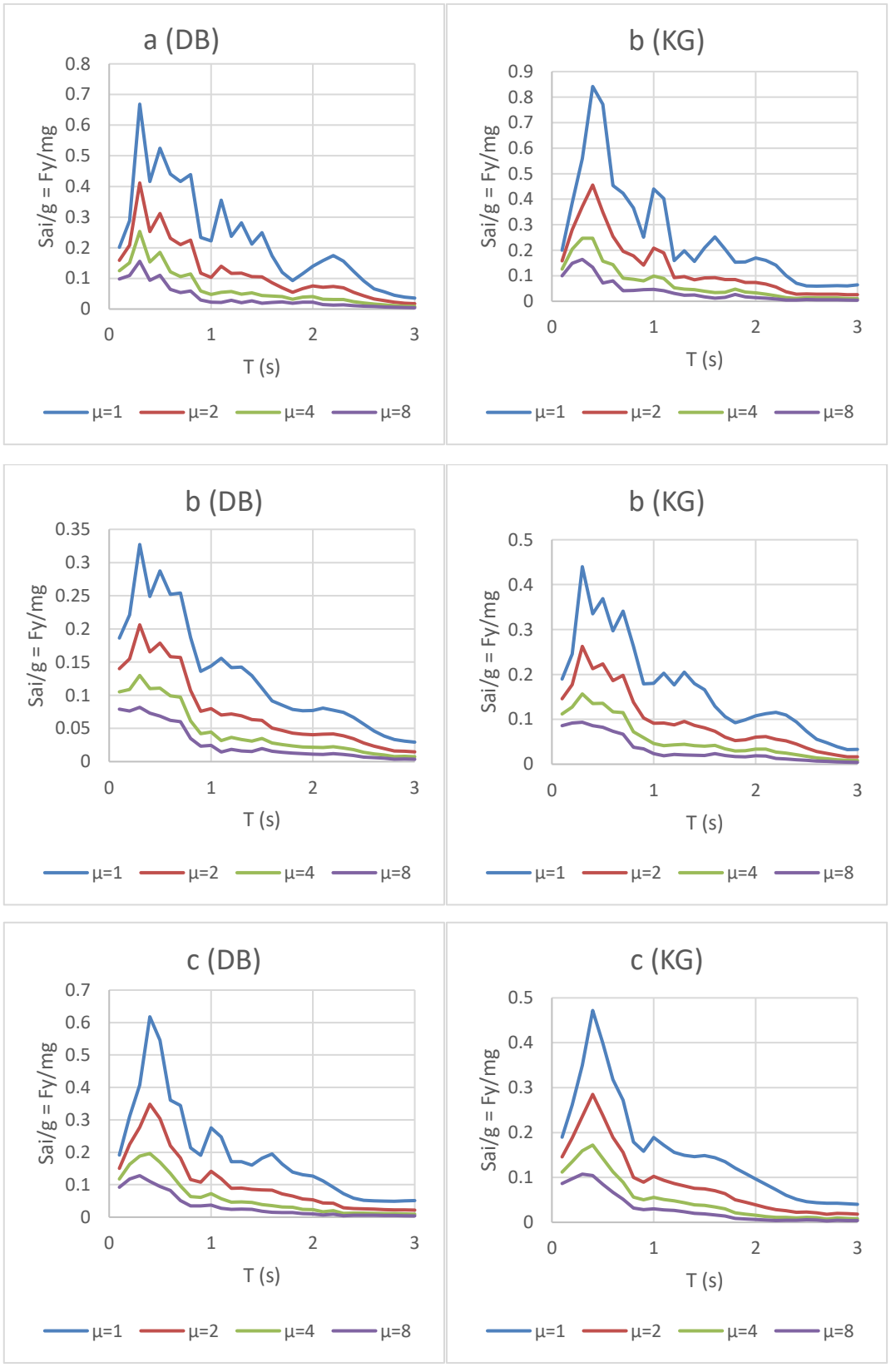
Şekil 55 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



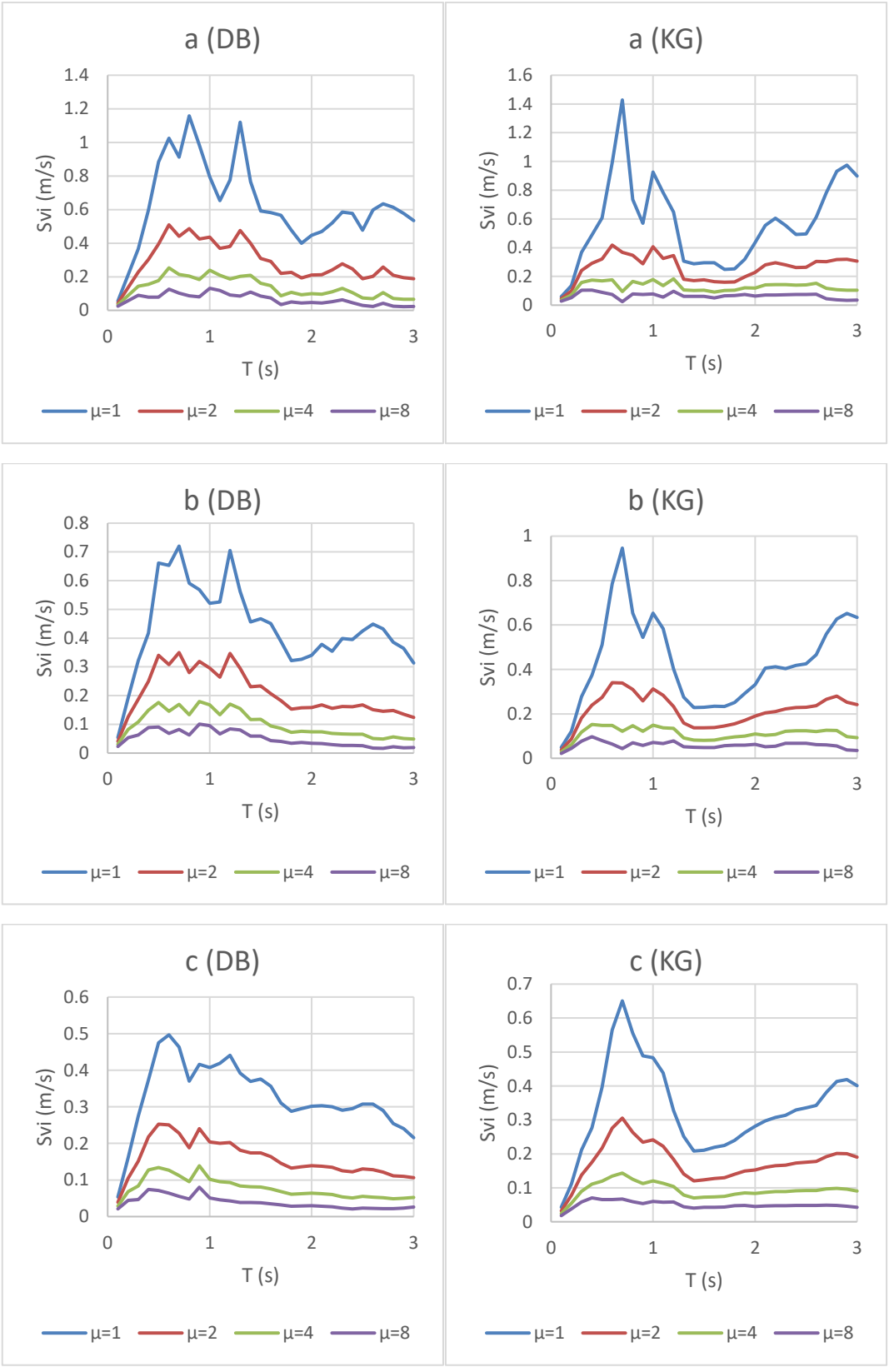
Şekil 56 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



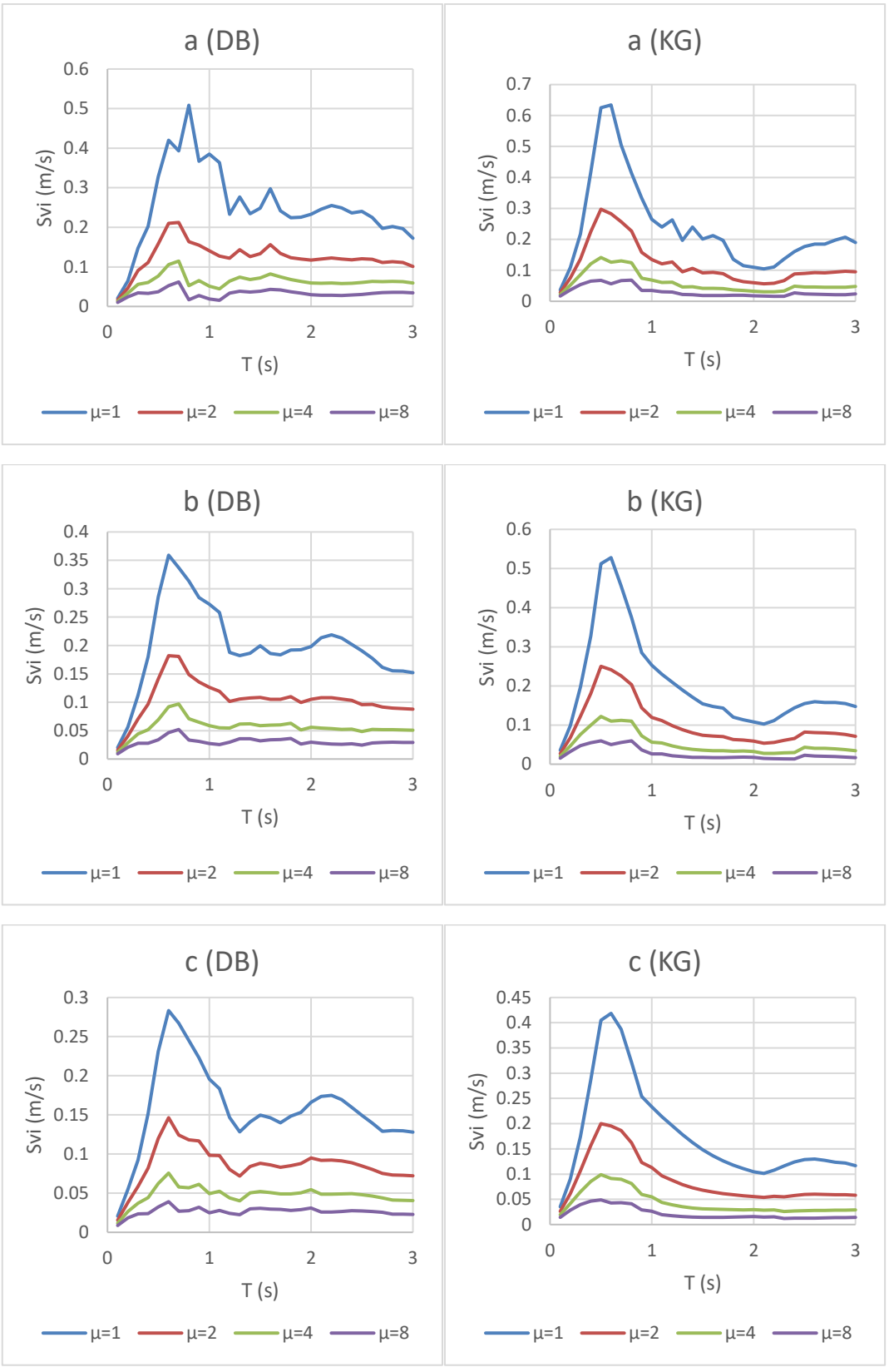
Şekil 57 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



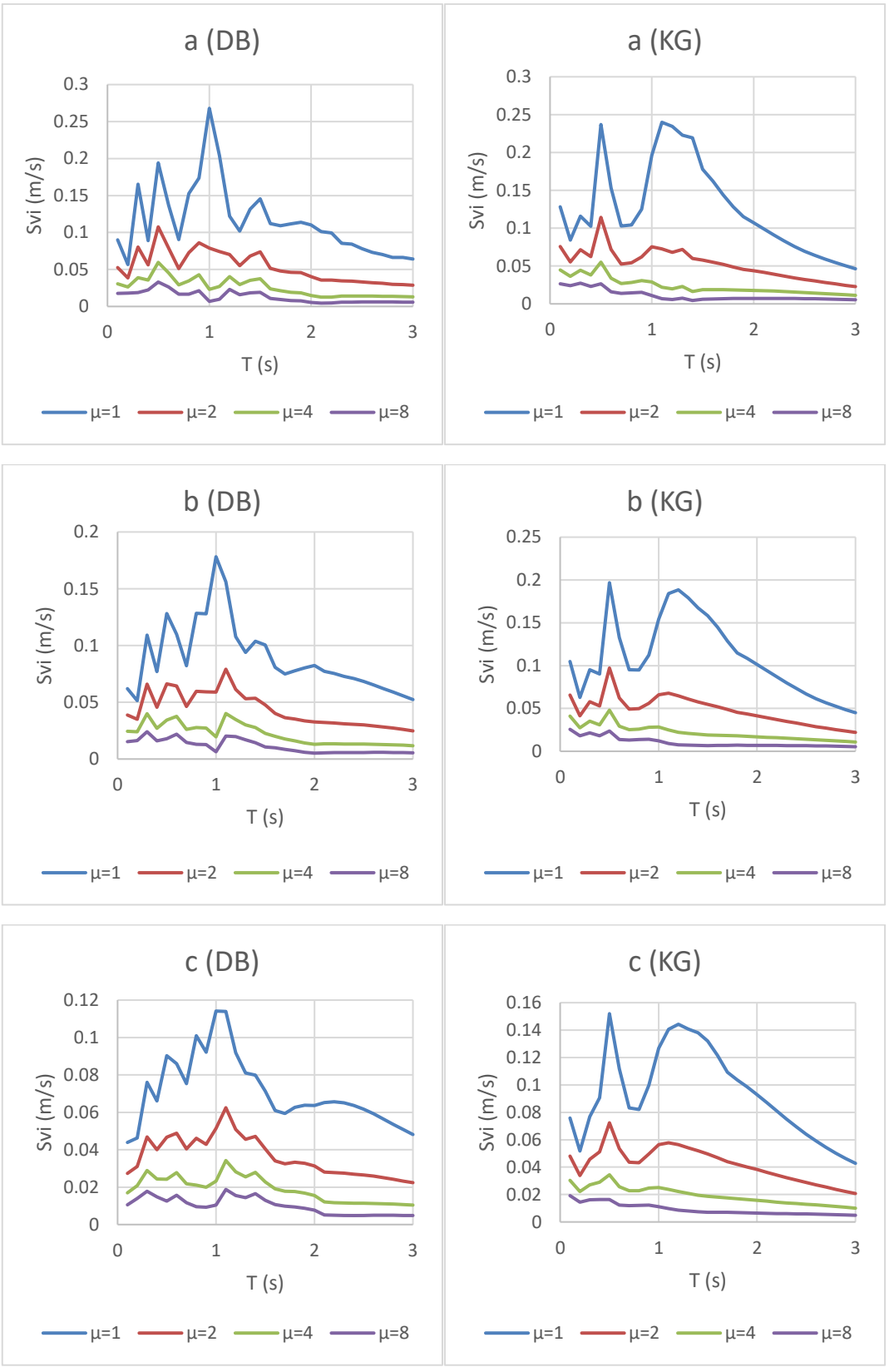
Şekil 58 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



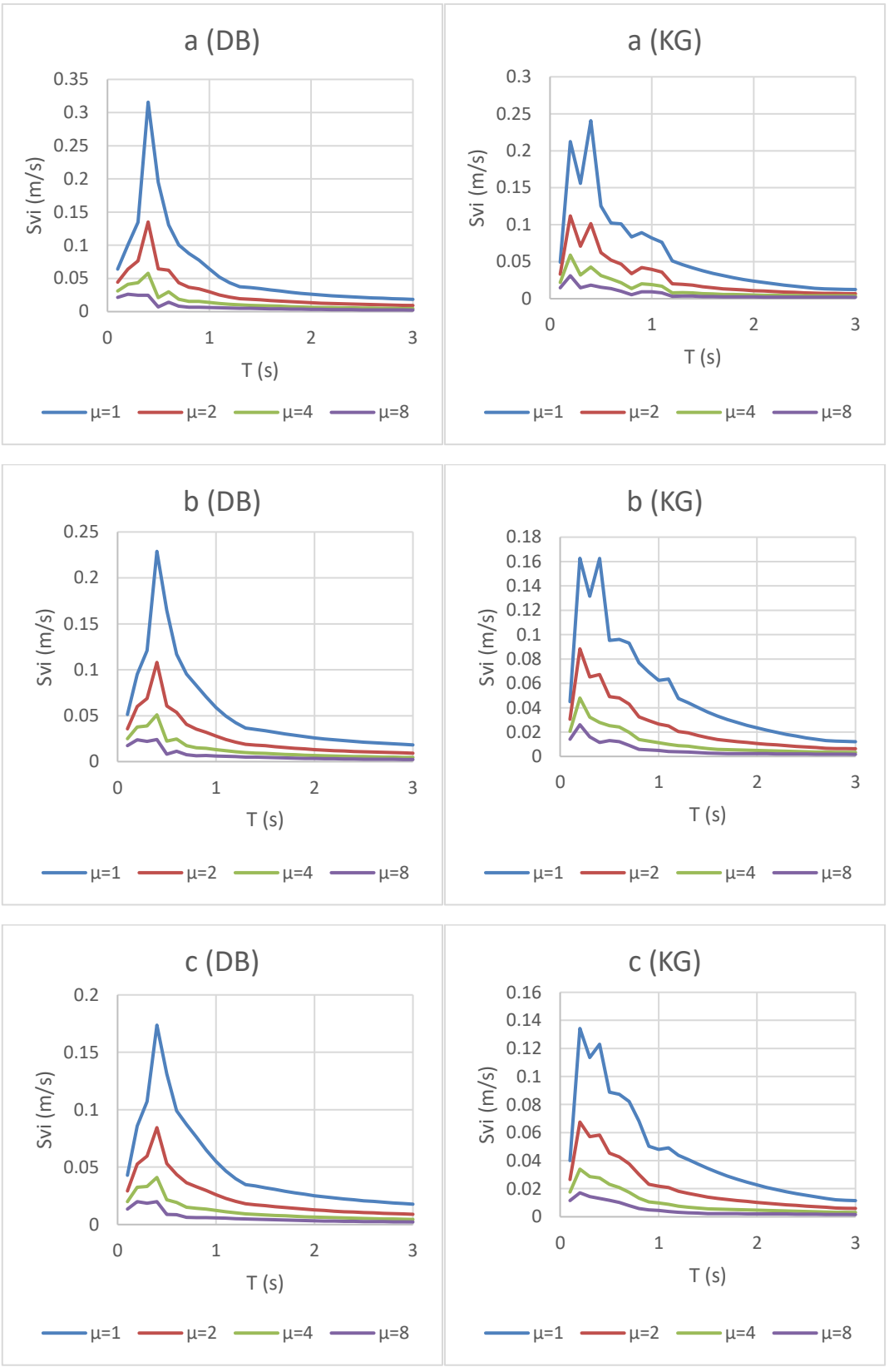
Şekil 59 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



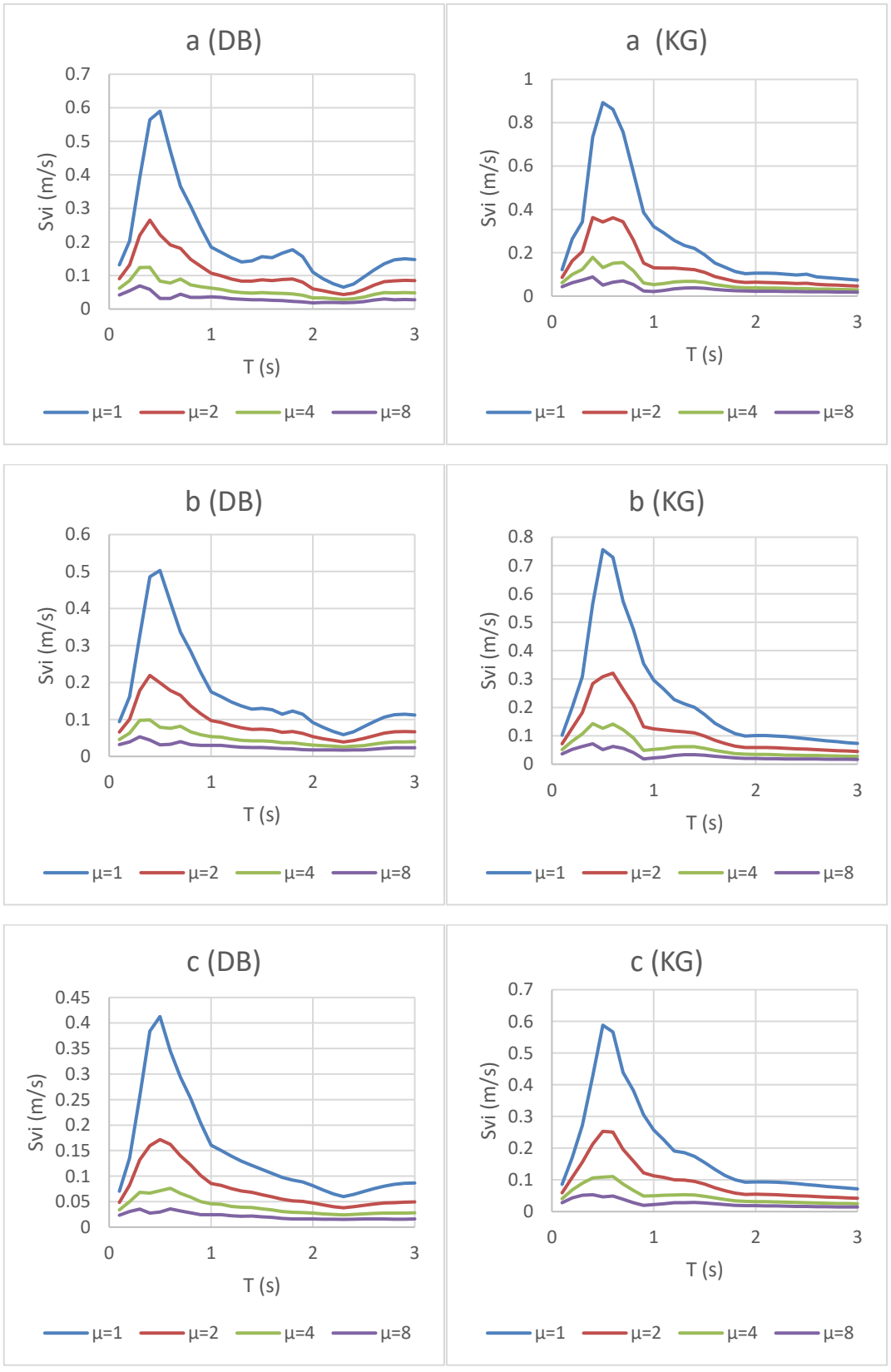
Şekil 60 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



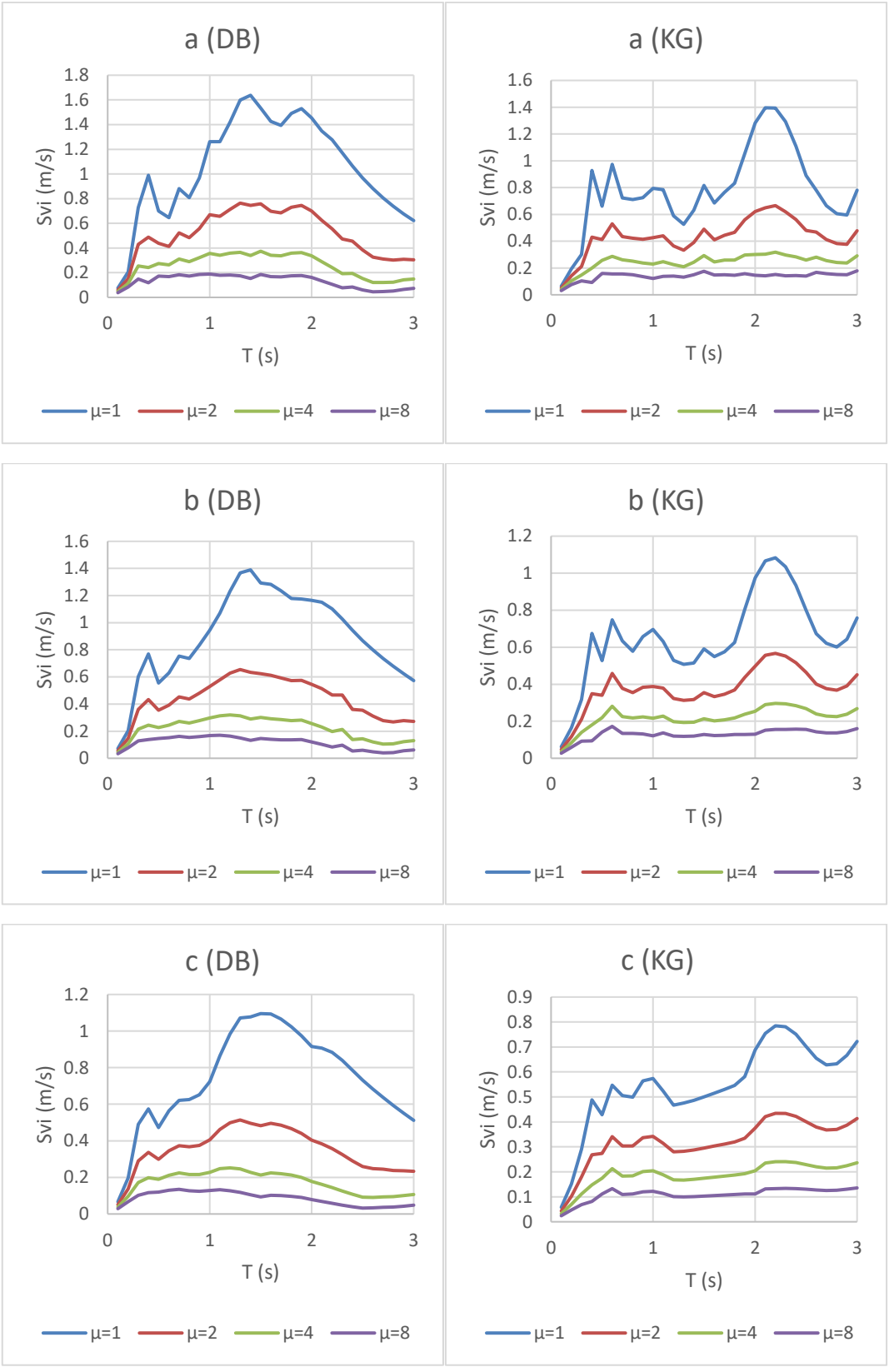
Şekil 61 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



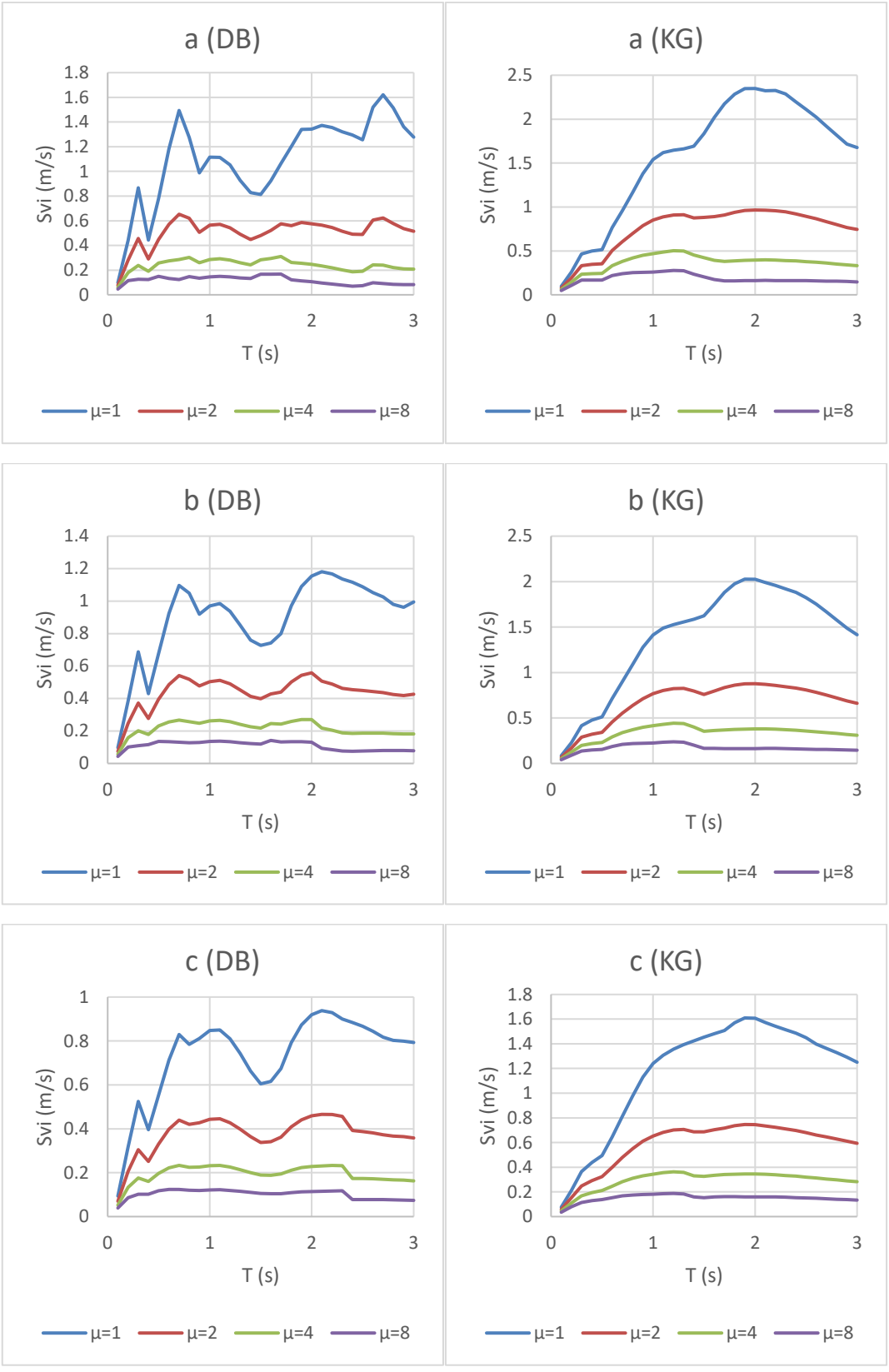
Şekil 62 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2 b=%5 c=%10 için hız spektrumu



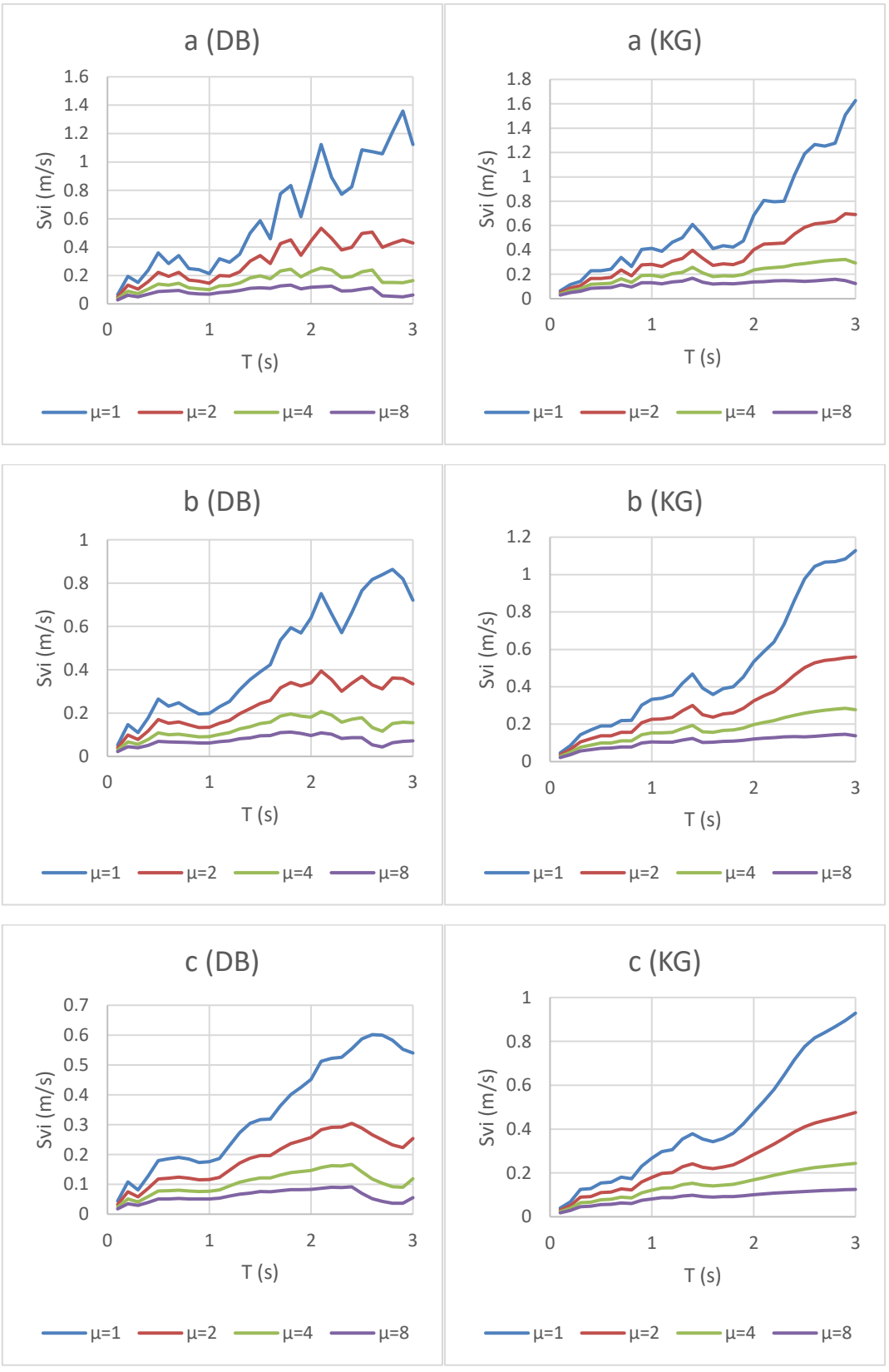
Şekil 63 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



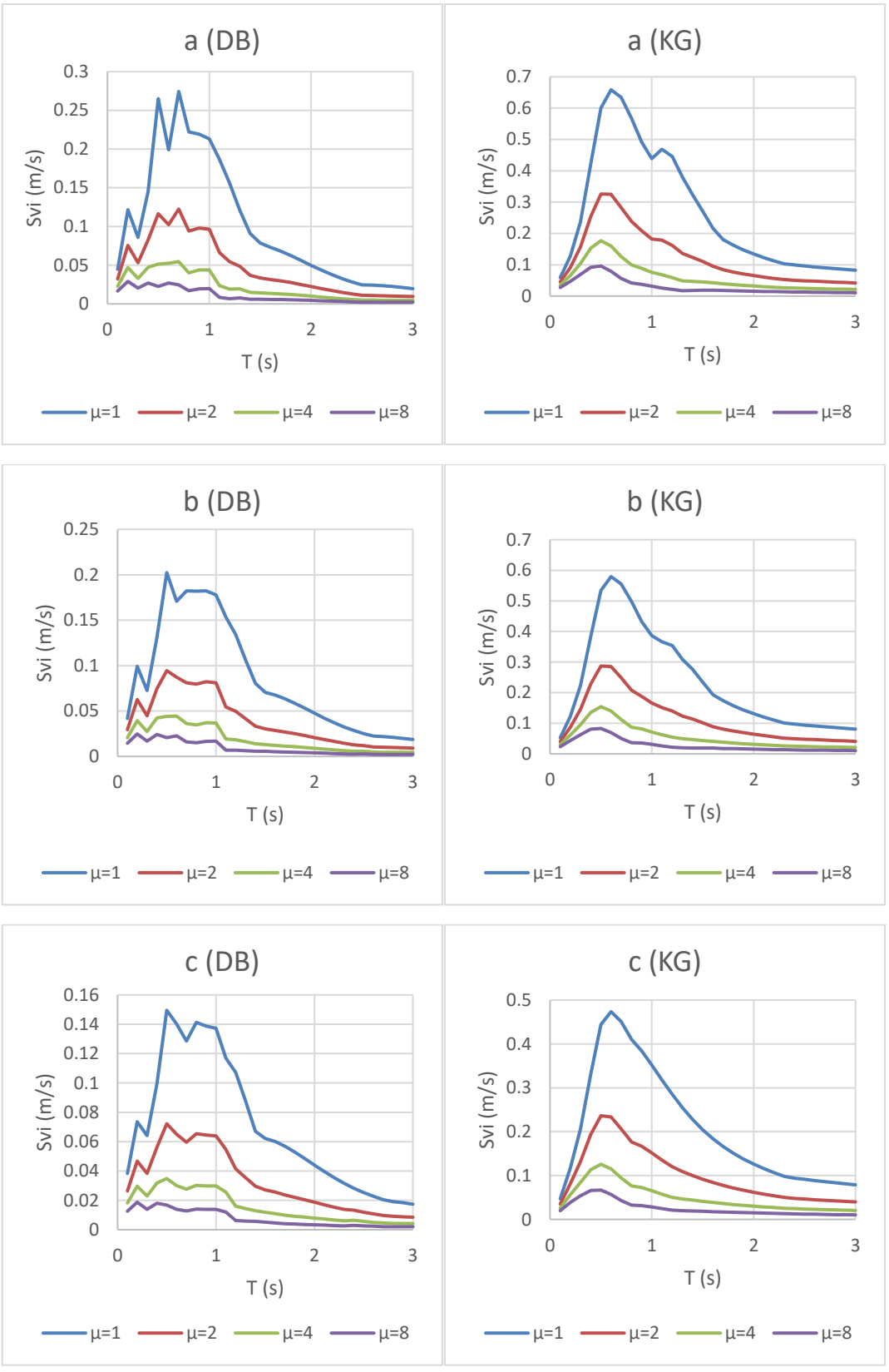
Şekil 64 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



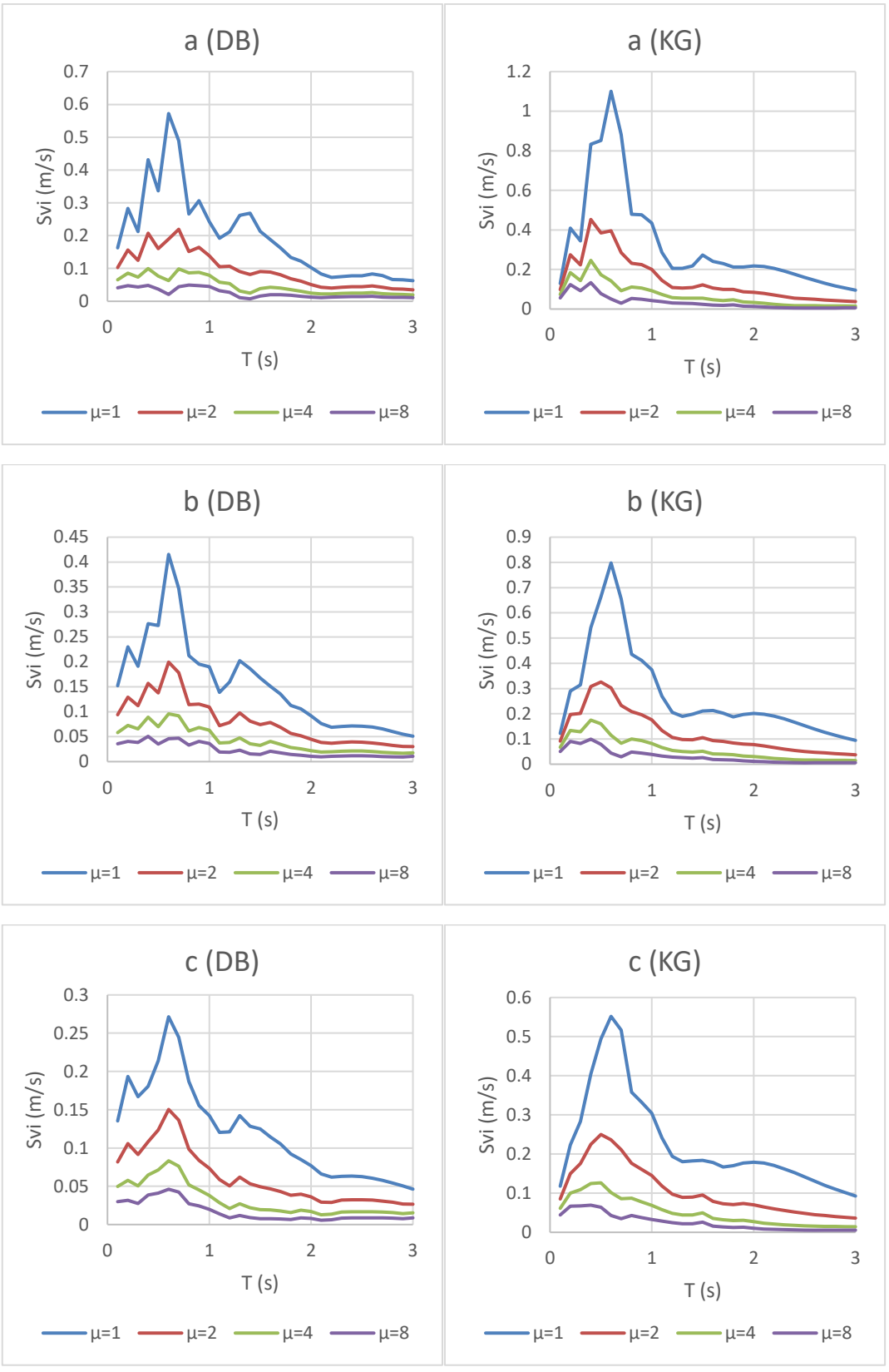
Şekil 65 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



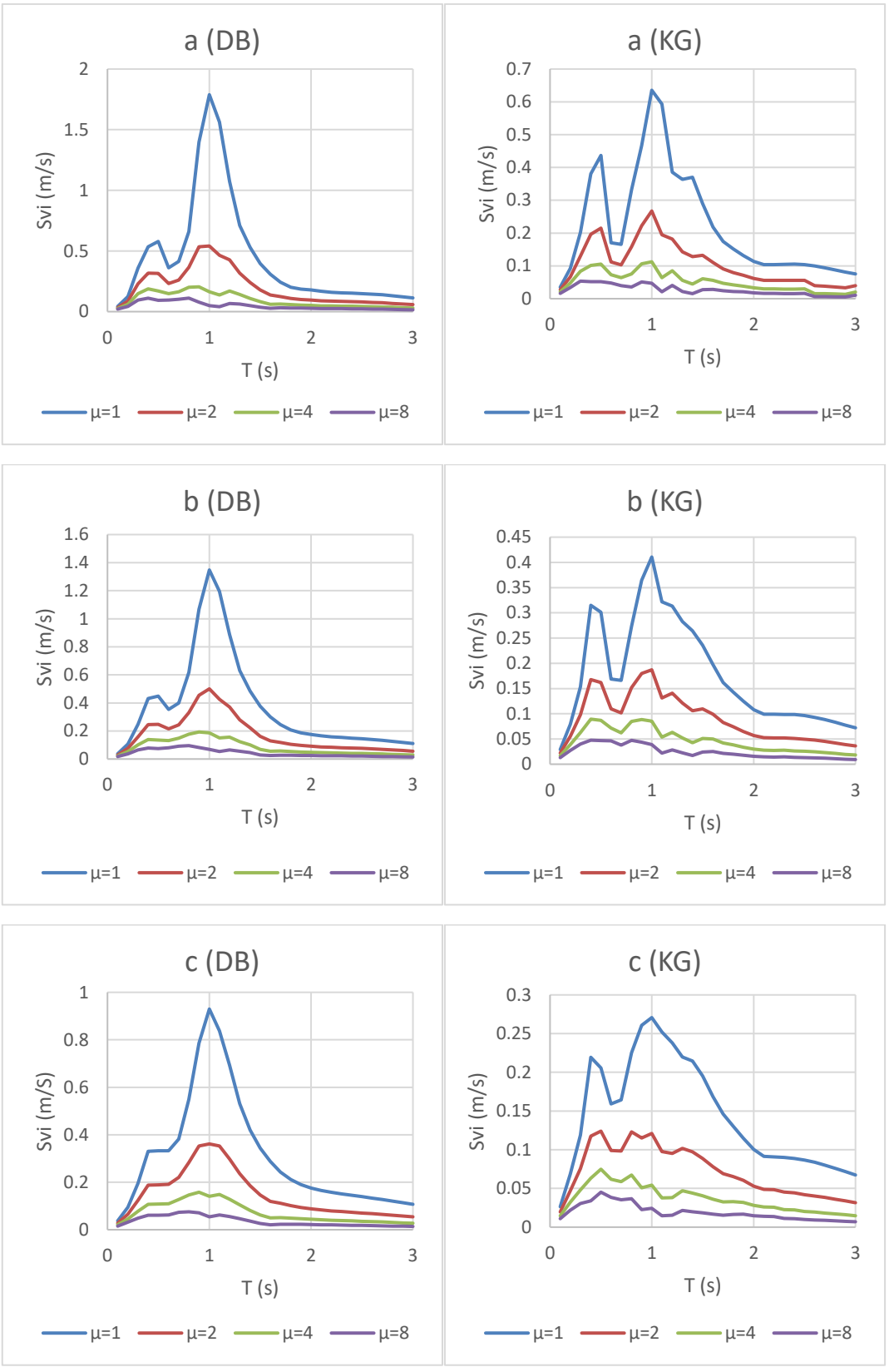
Şekil 66 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



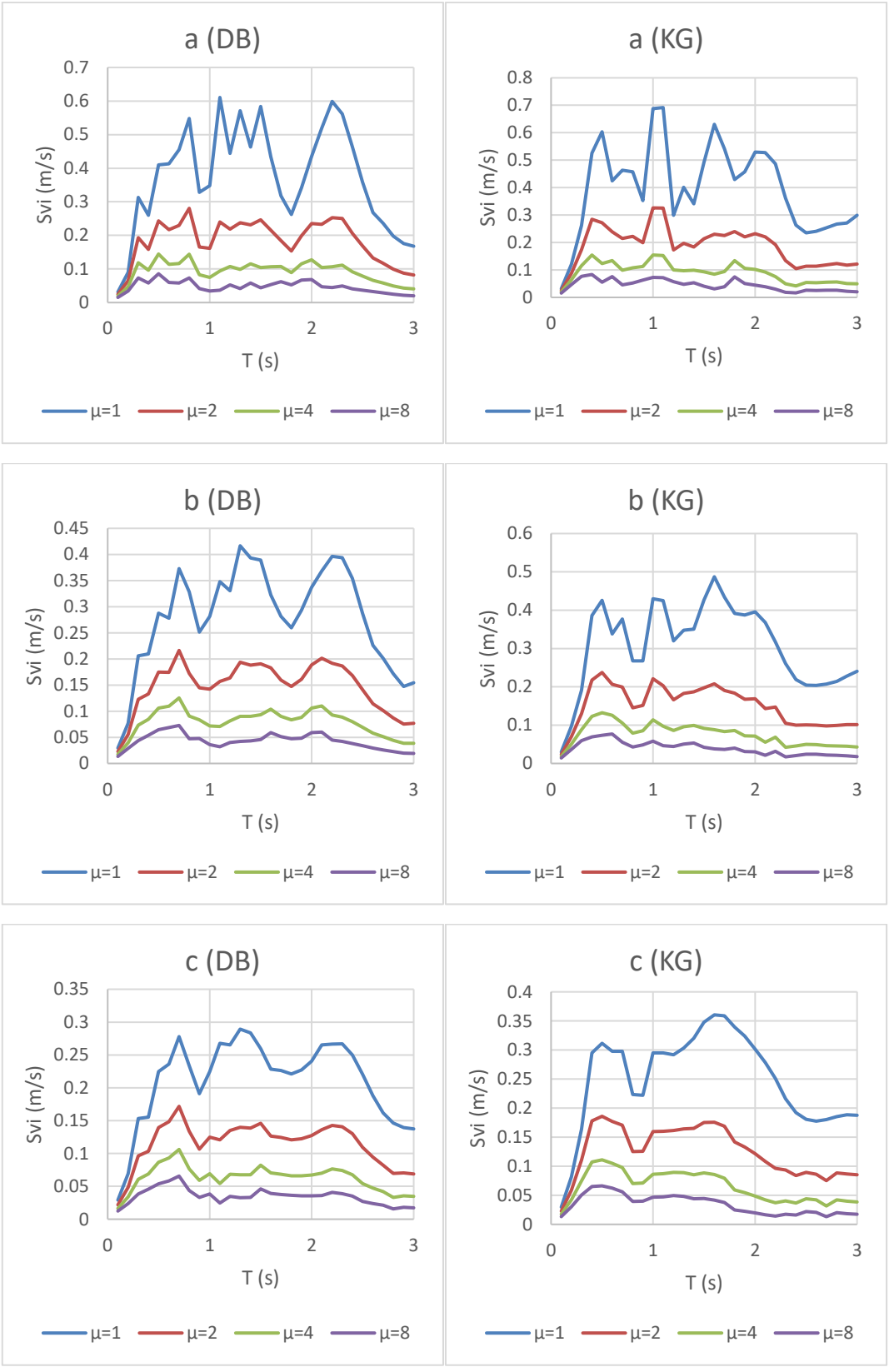
Şekil 67 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



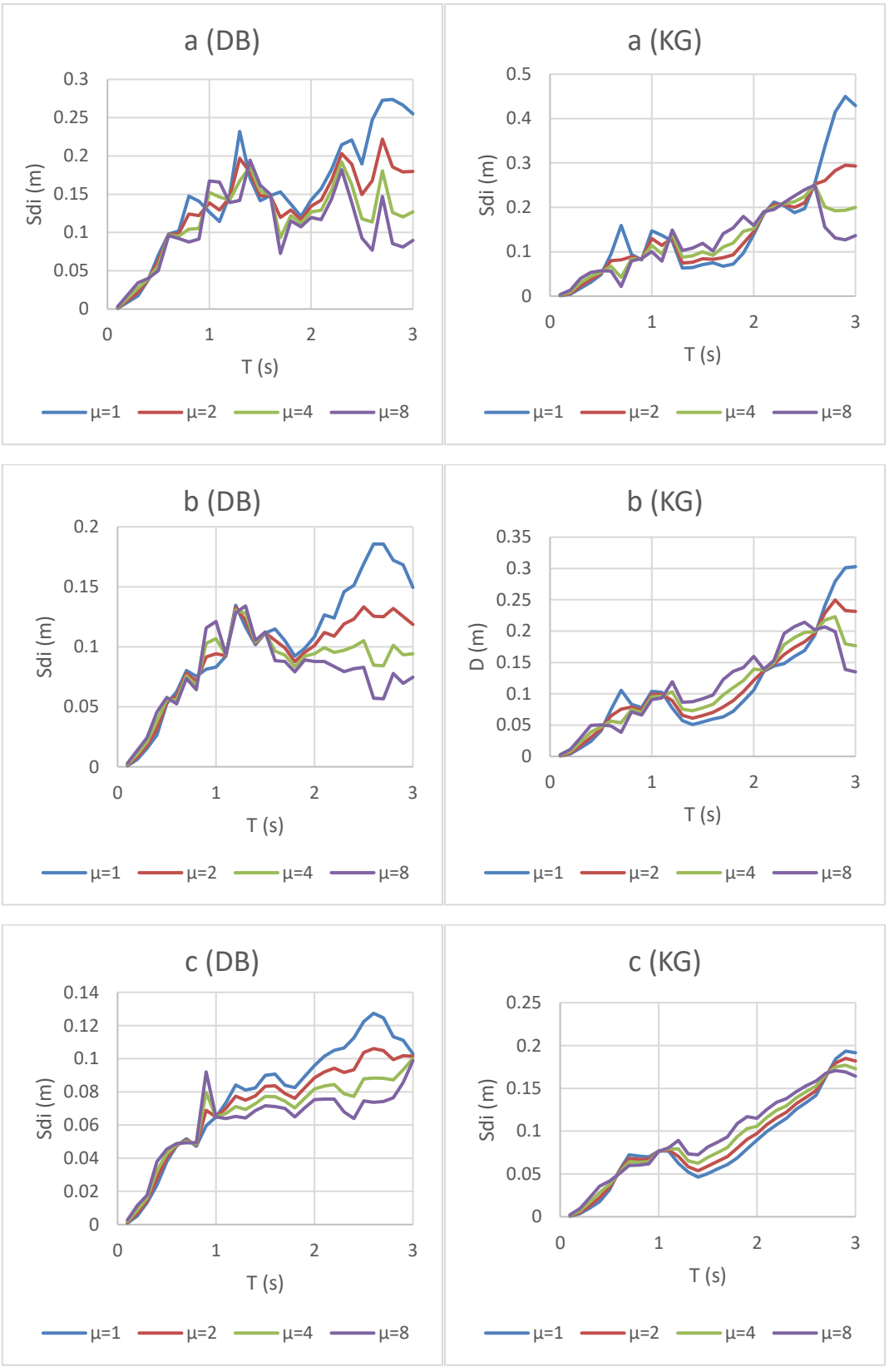
Şekil 68 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



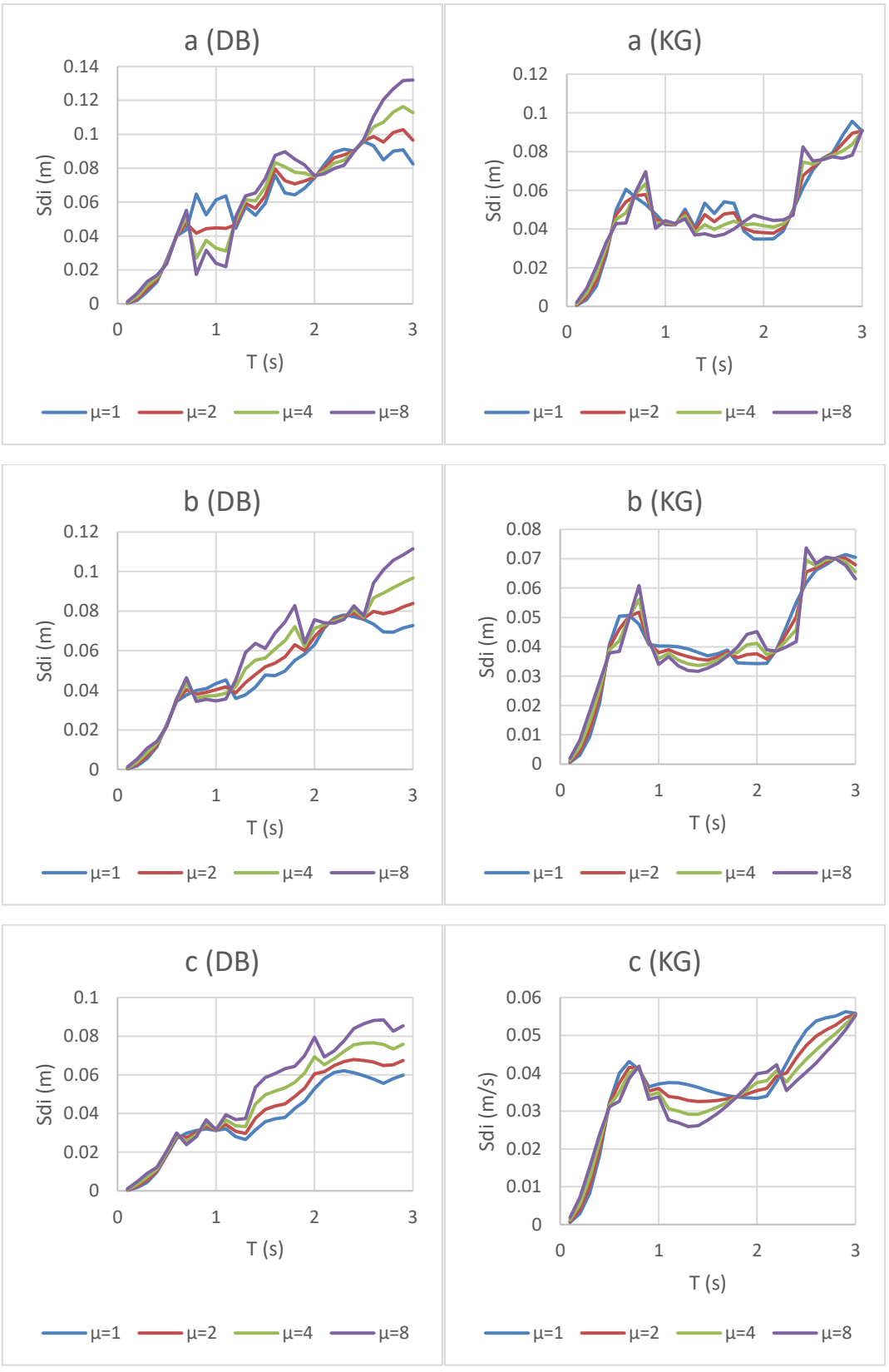
Şekil 69 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



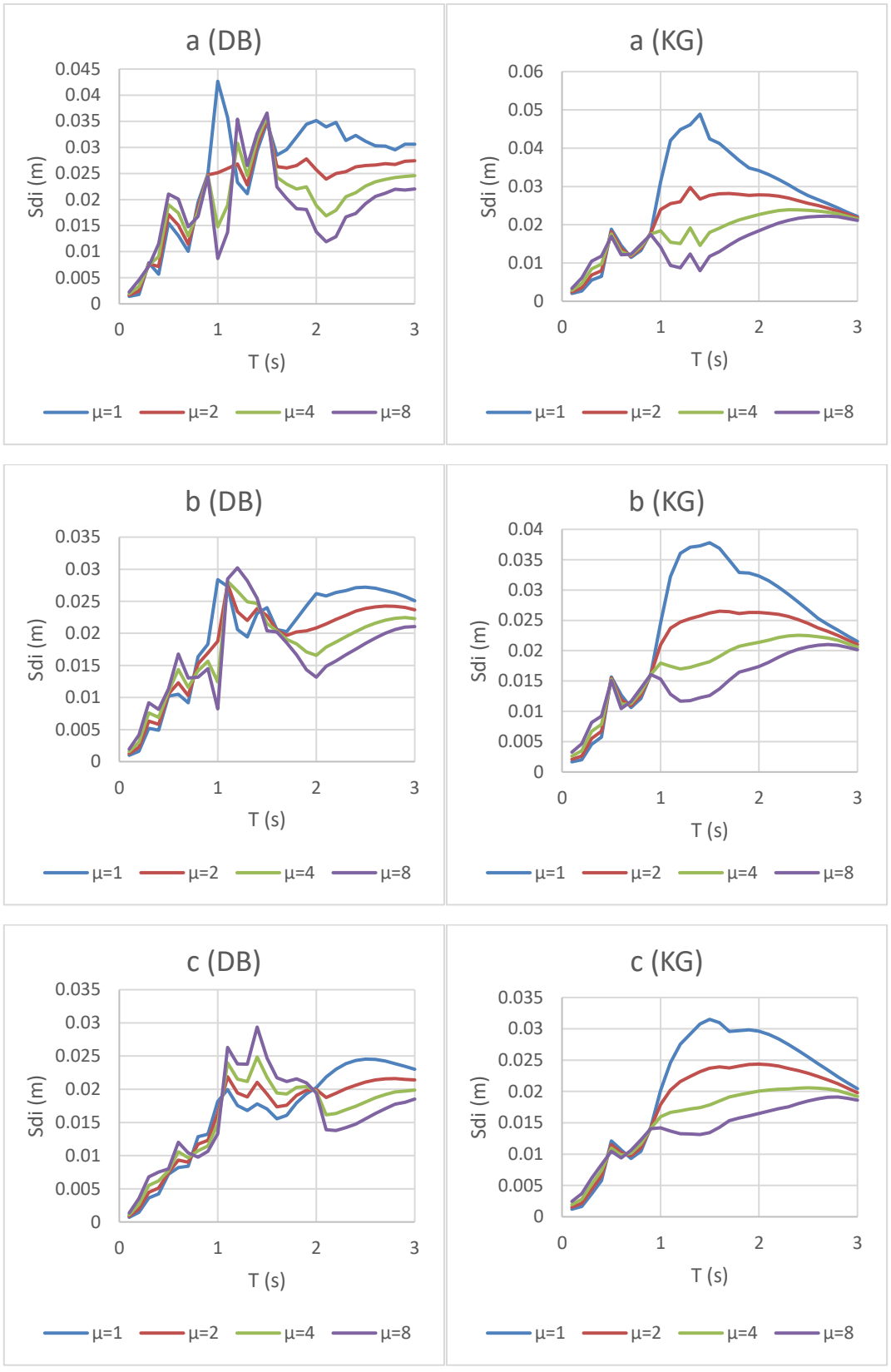
Şekil 70 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



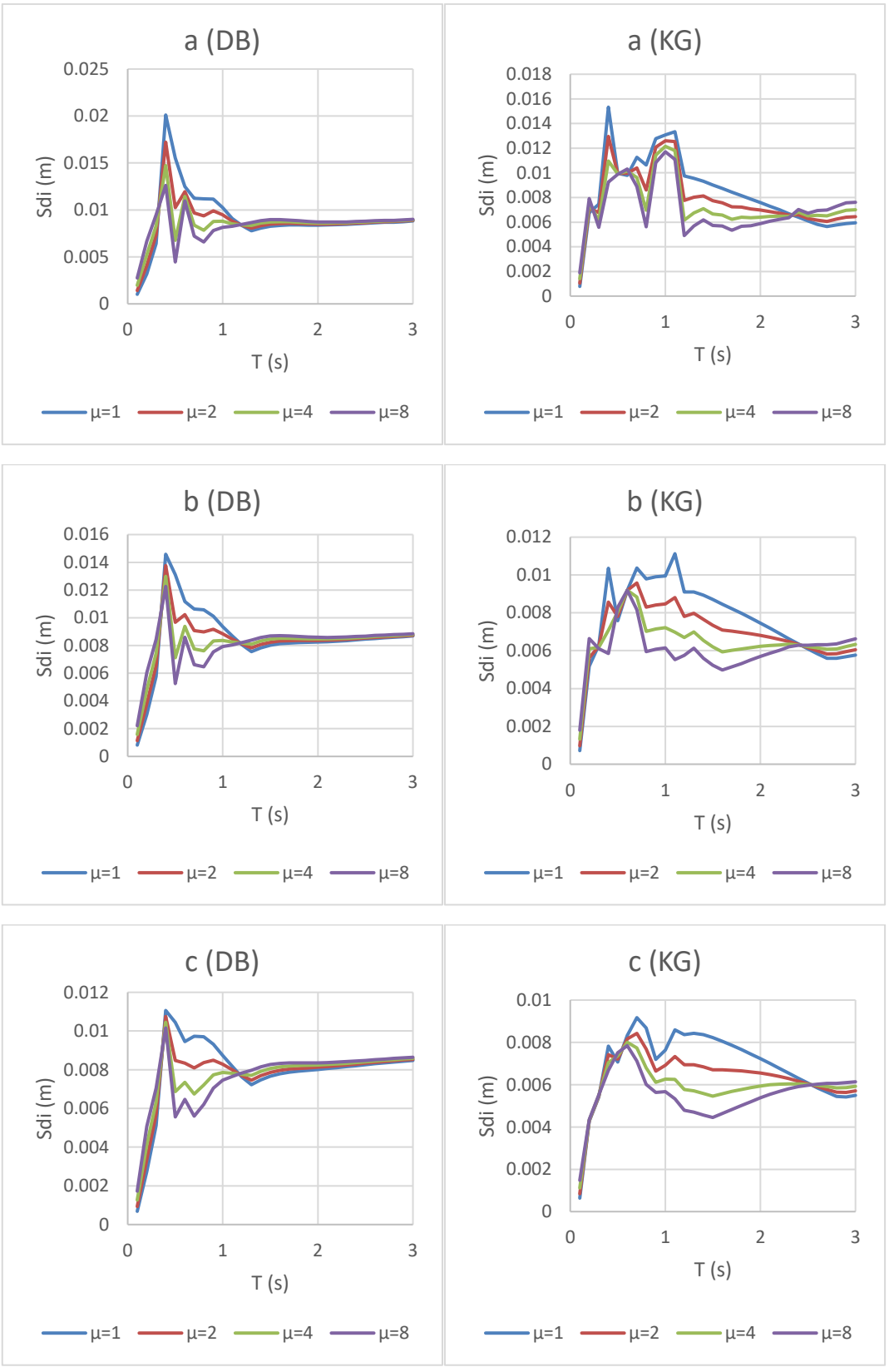
Şekil 71 Adana depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



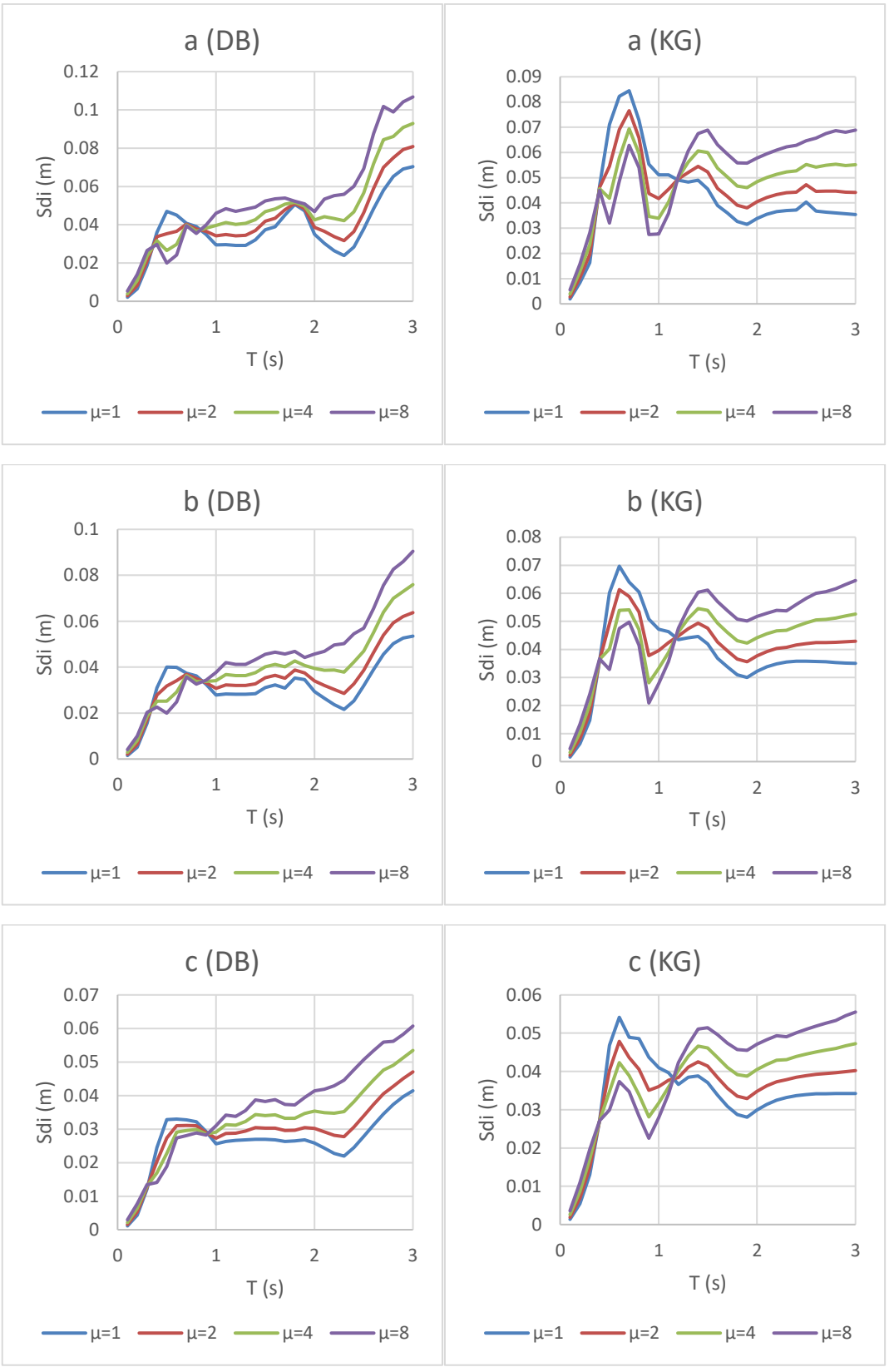
Şekil 72 Afyon depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



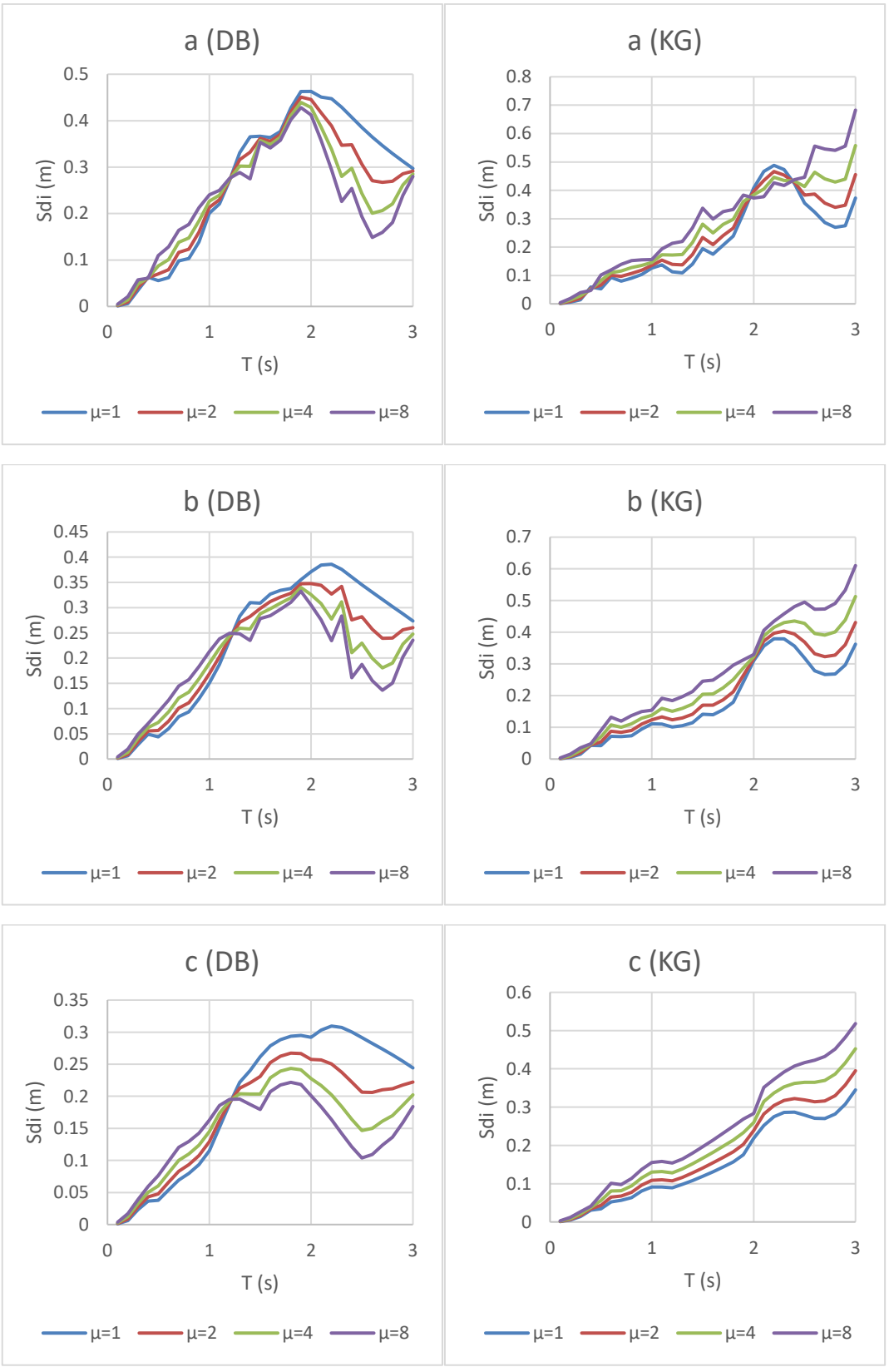
Şekil 73 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



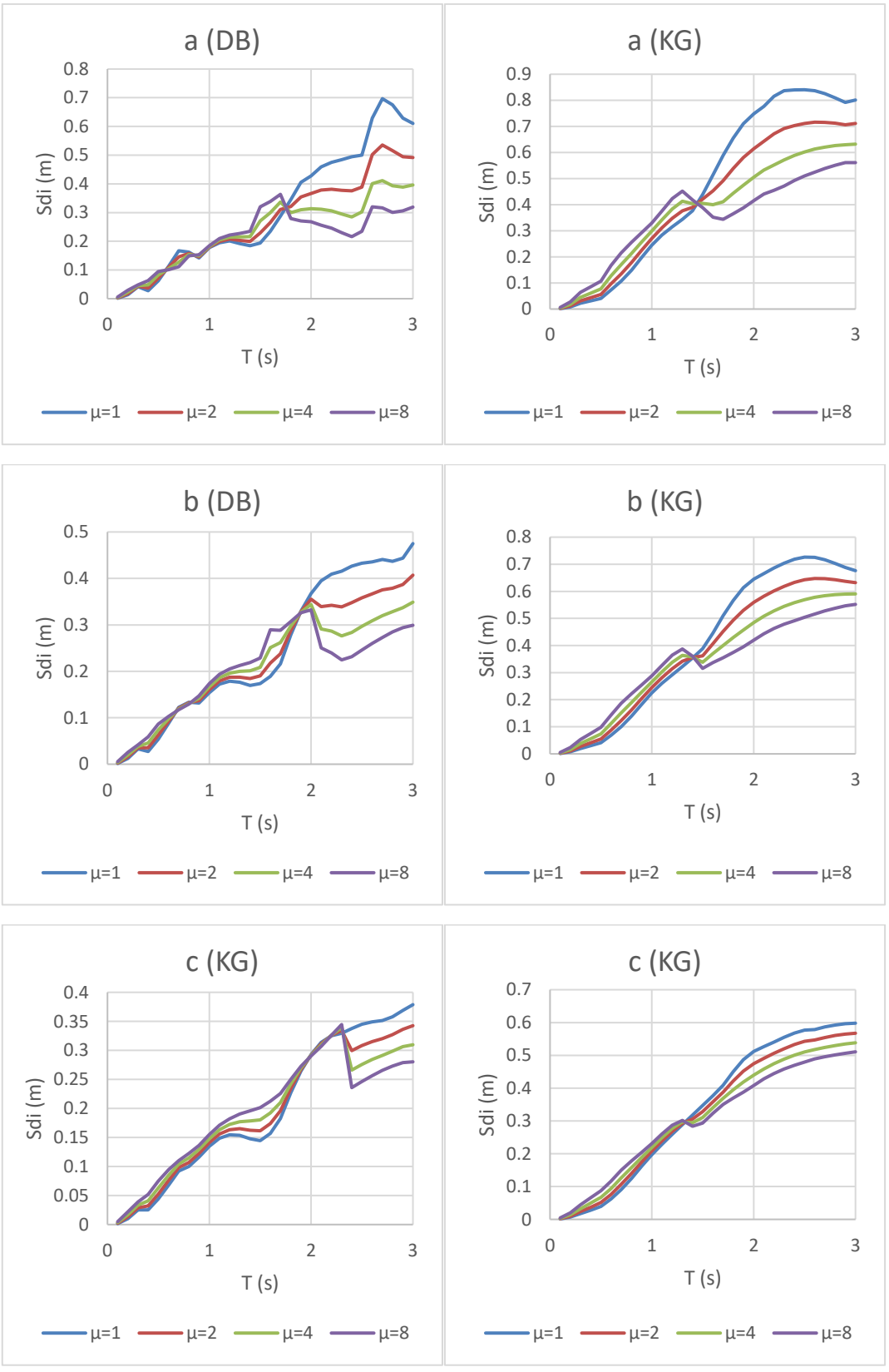
Şekil 74 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



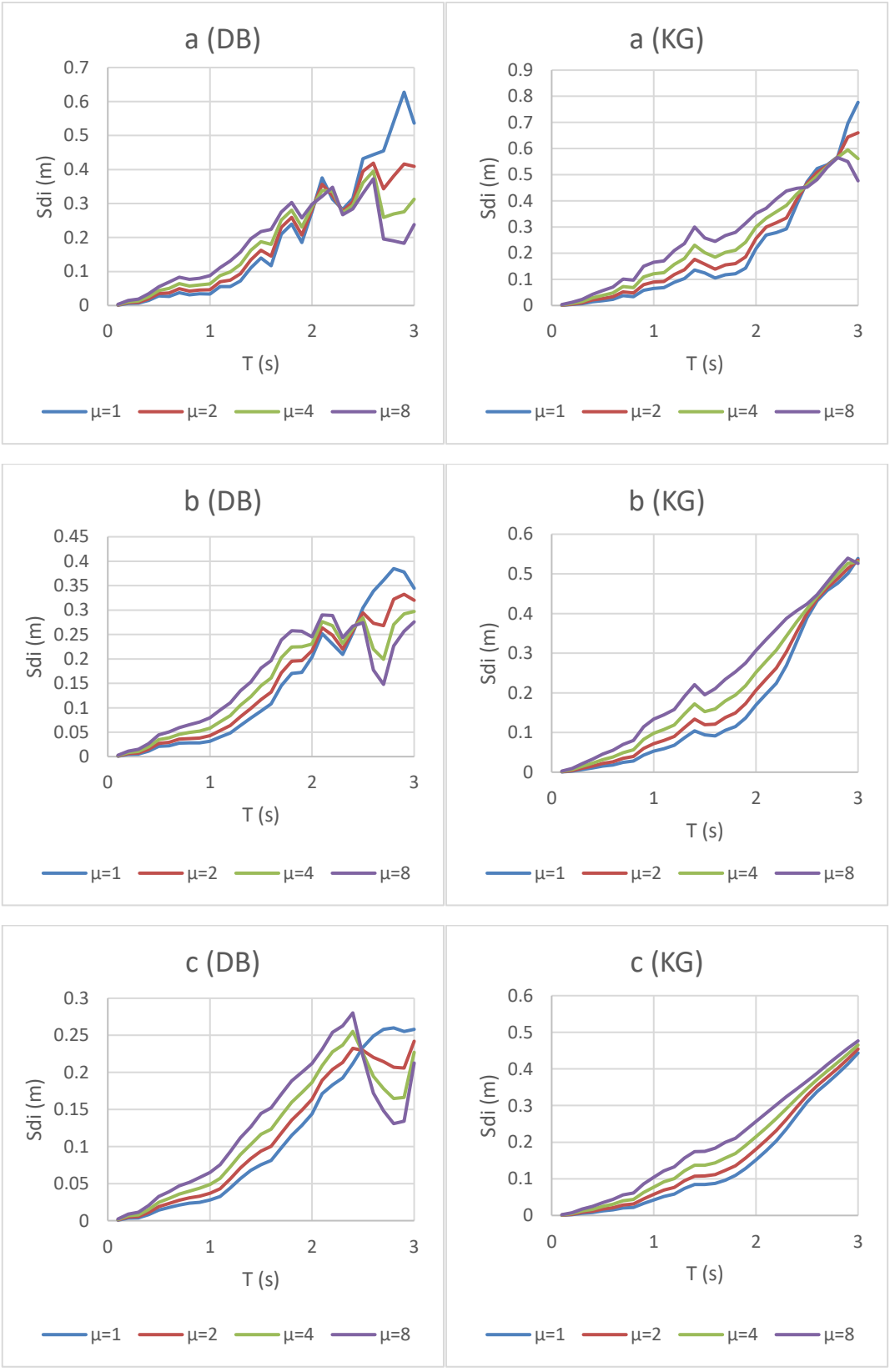
Şekil 75 Denizli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



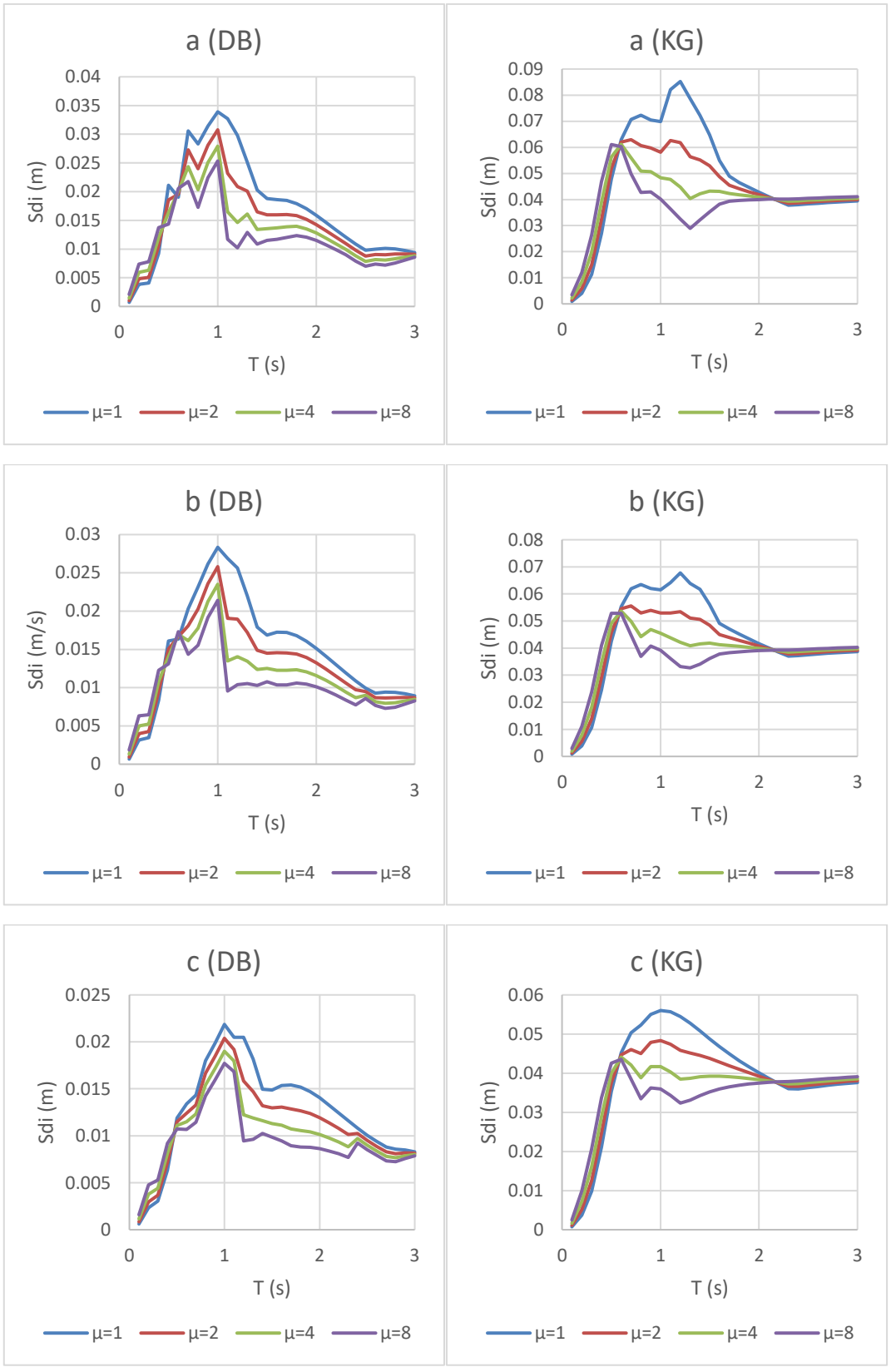
Şekil 76 Düzce depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



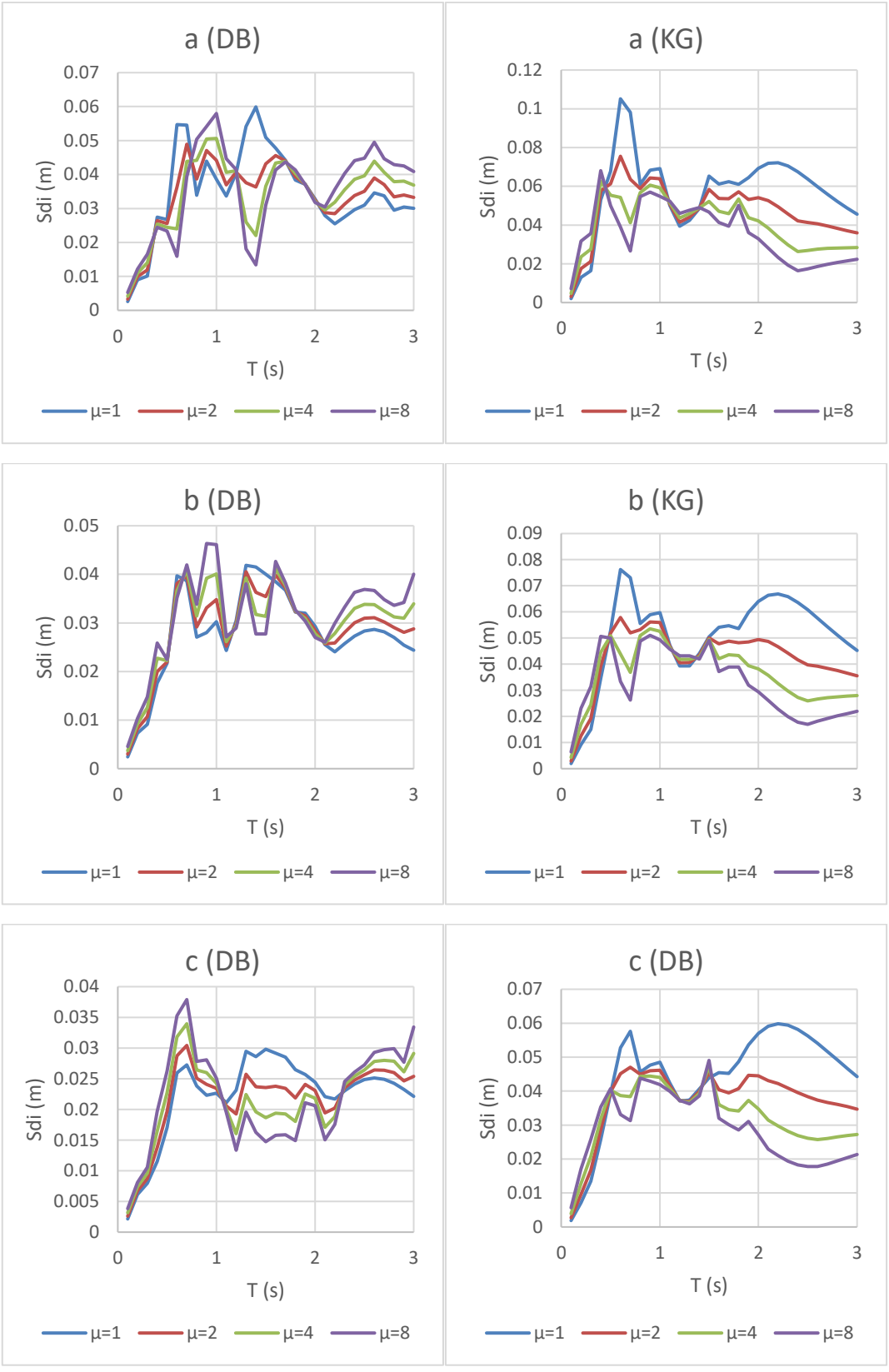
Şekil 77 Erzincan depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



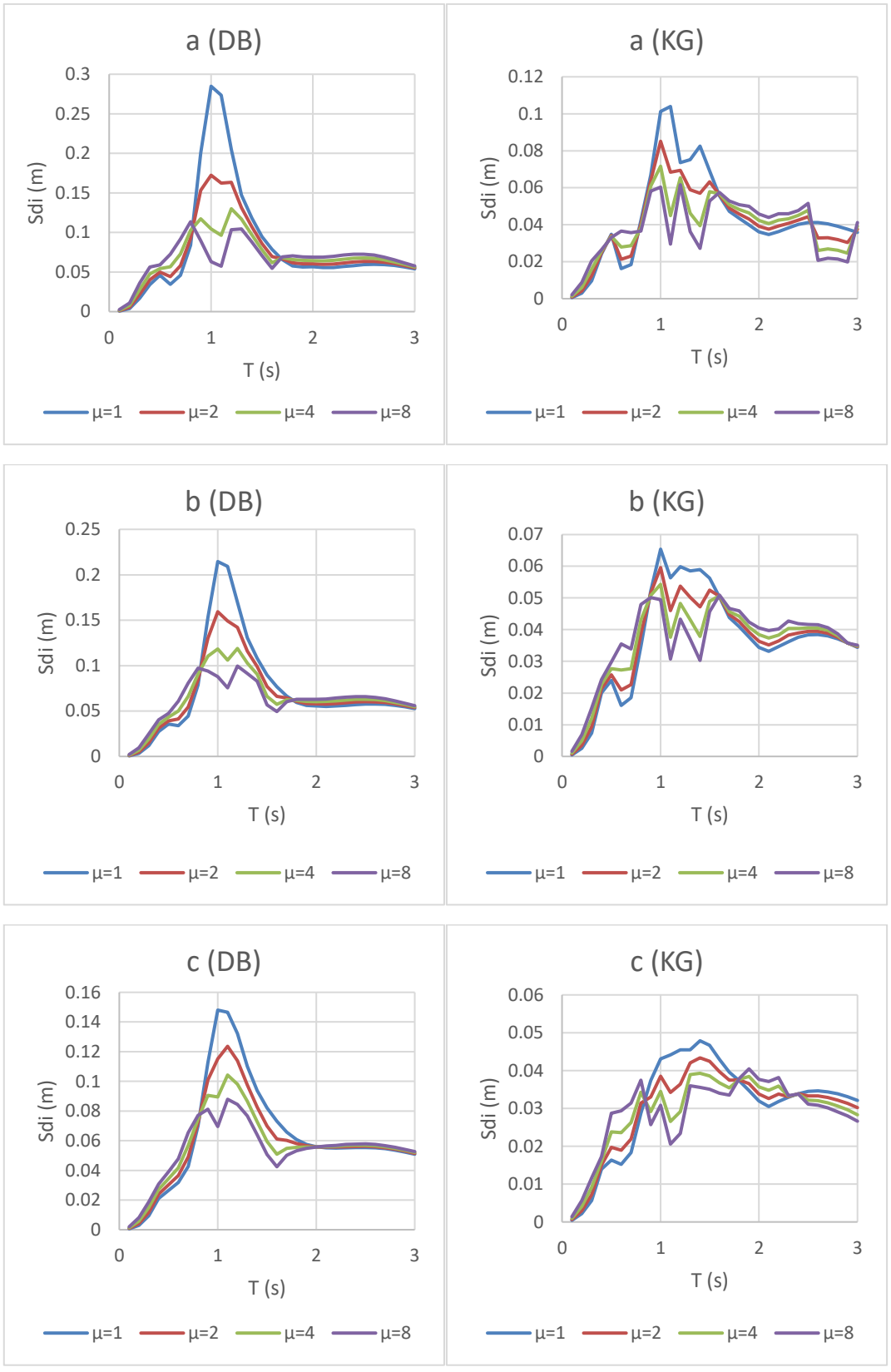
Şekil 78 Erzurum depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



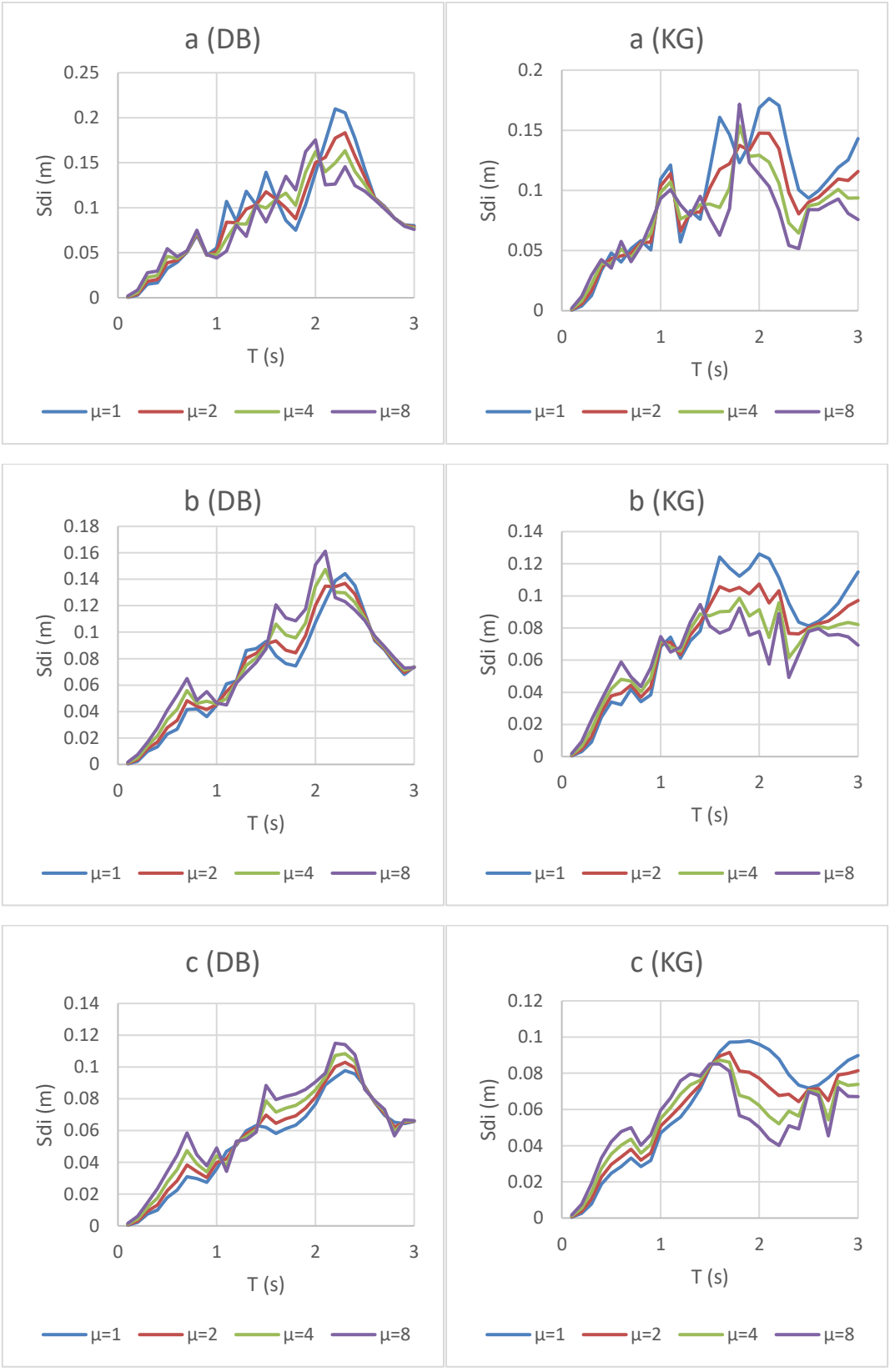
Şekil 79 Kütahya depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



Şekil 80 Manisa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu

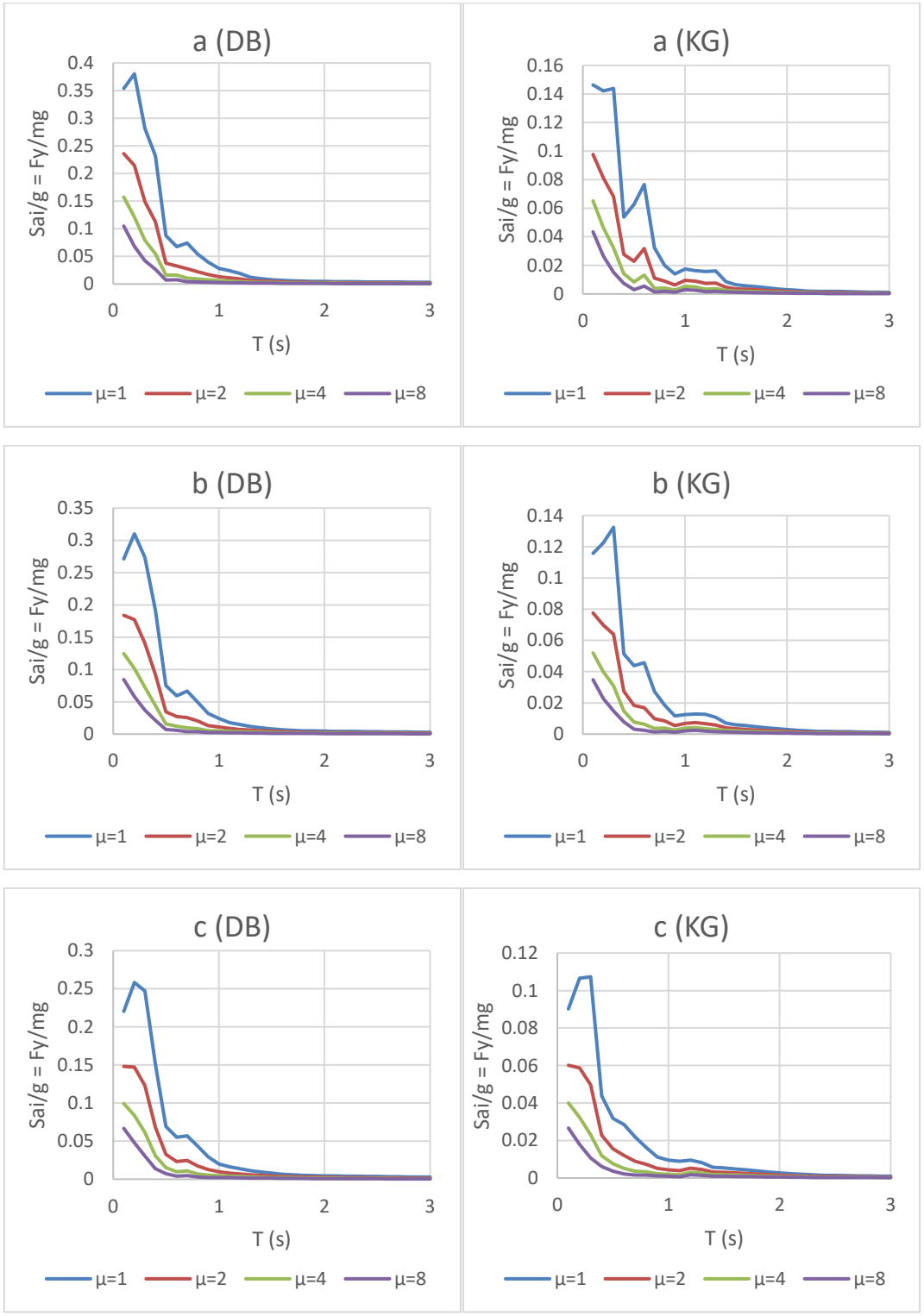


Şekil 81 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu

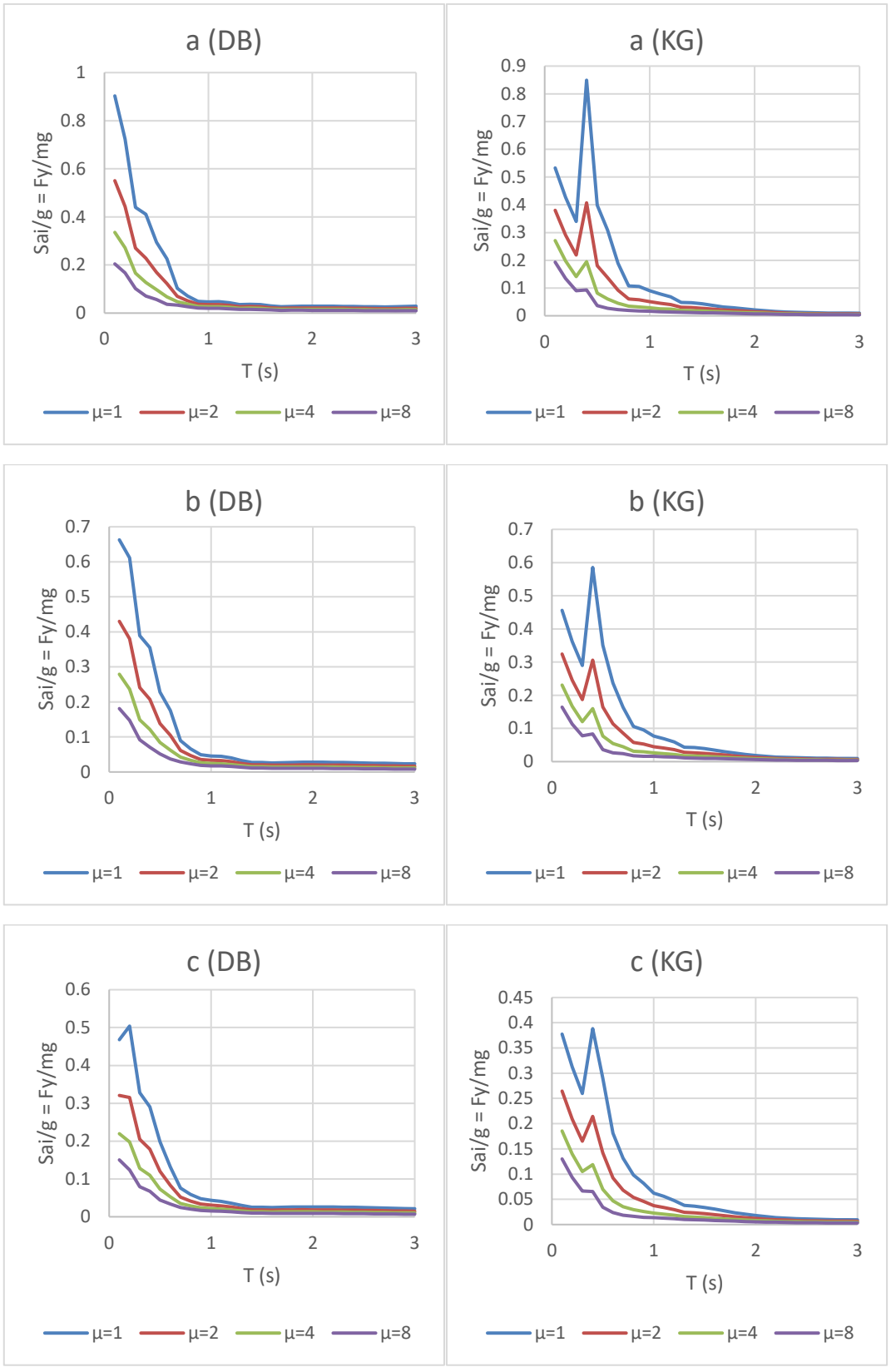


Şekil 82 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu

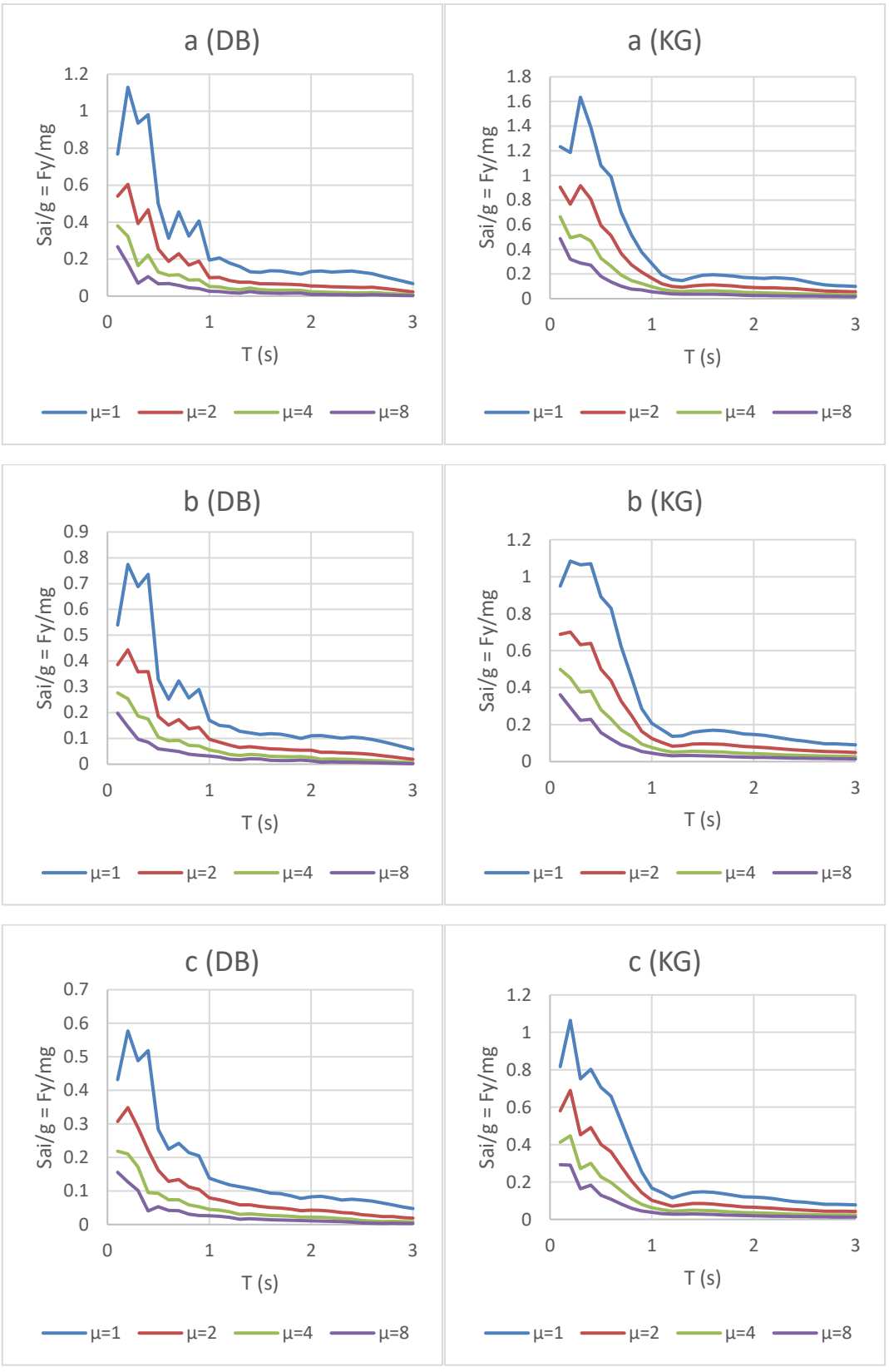
Ek2b: Sert zemin grubunun ivme, hız, yer değiştirme davranış spektrumları



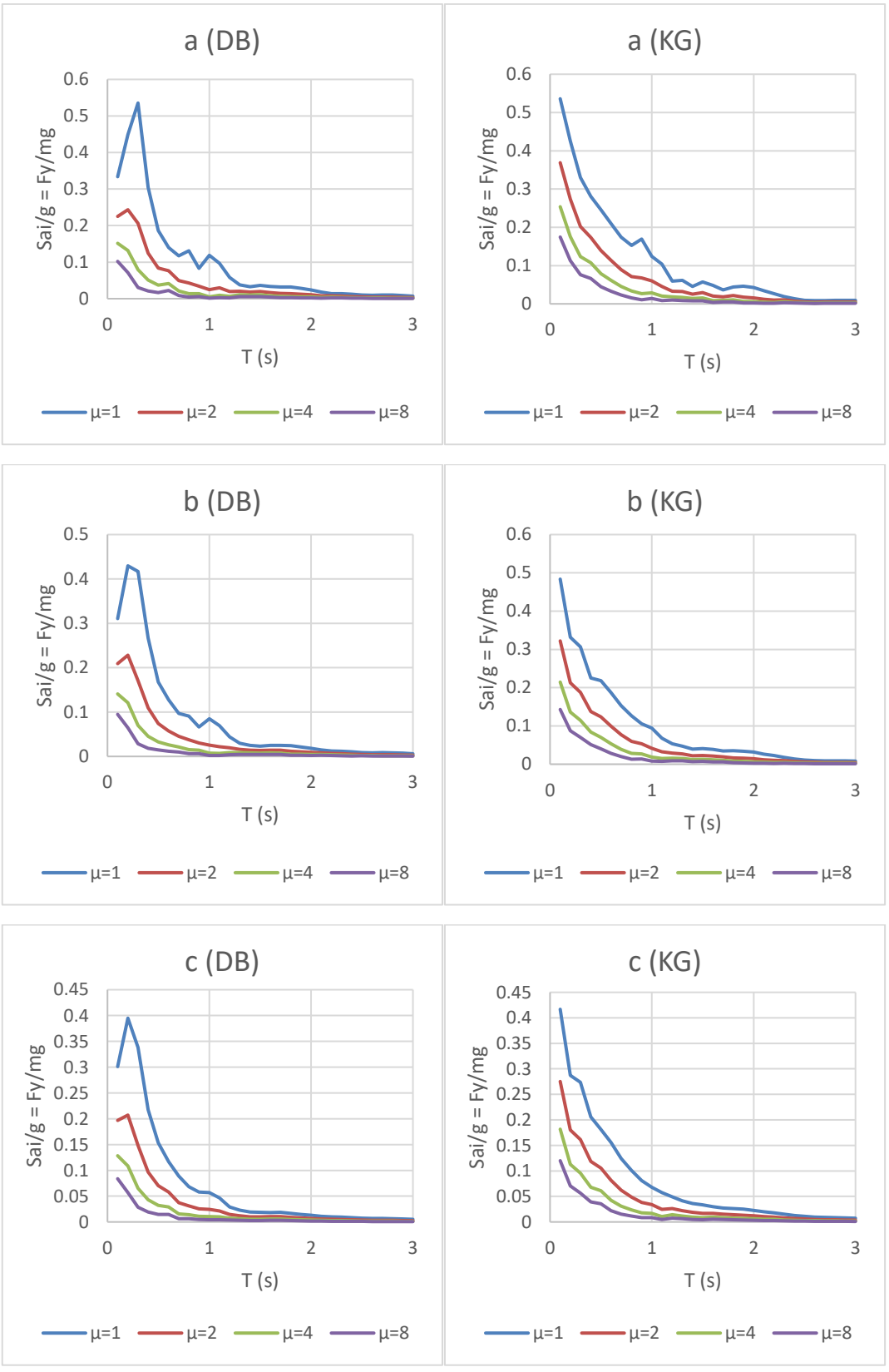
Şekil 83 Aydın depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



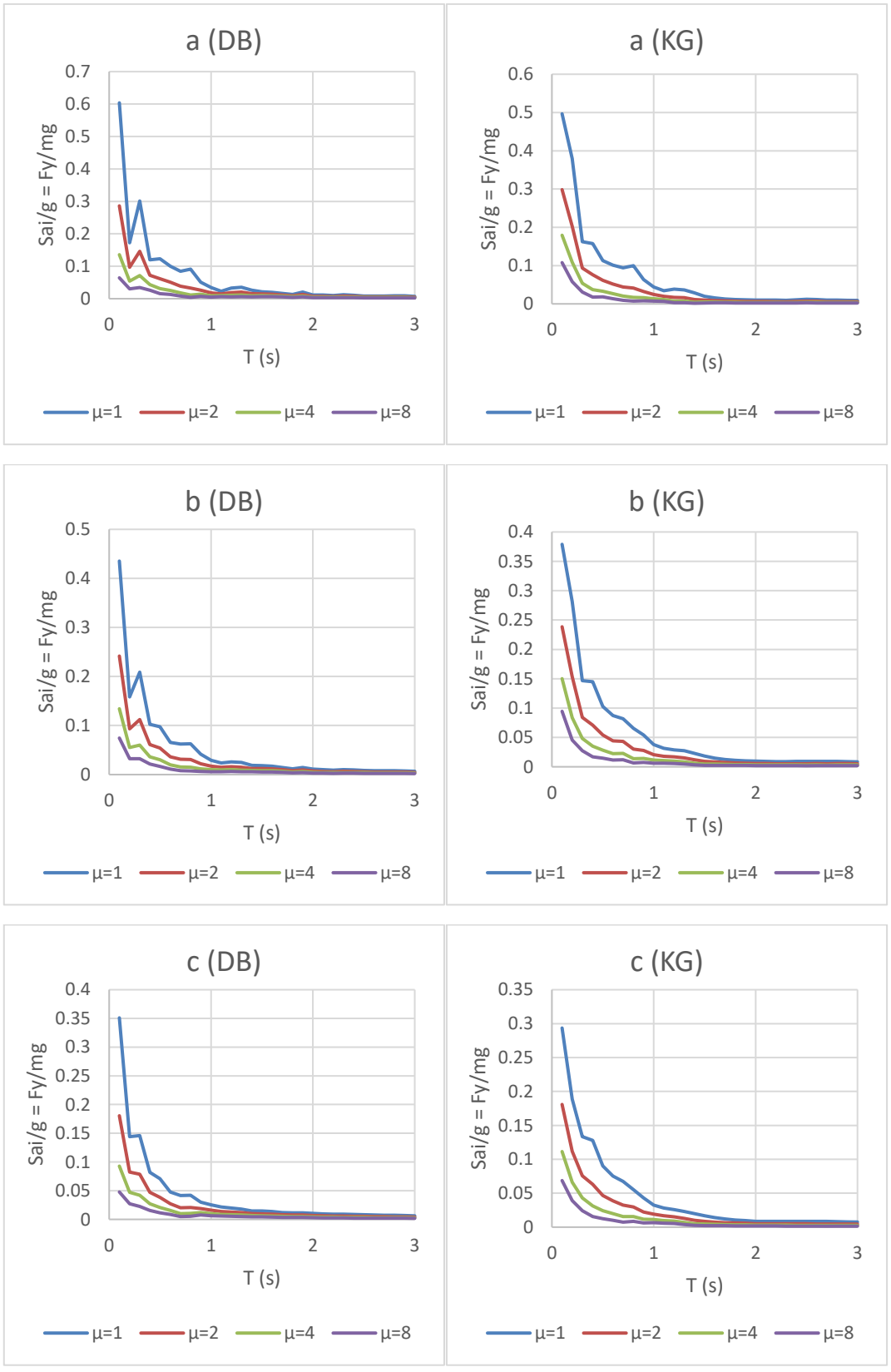
Şekil 84 Balıkesir depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



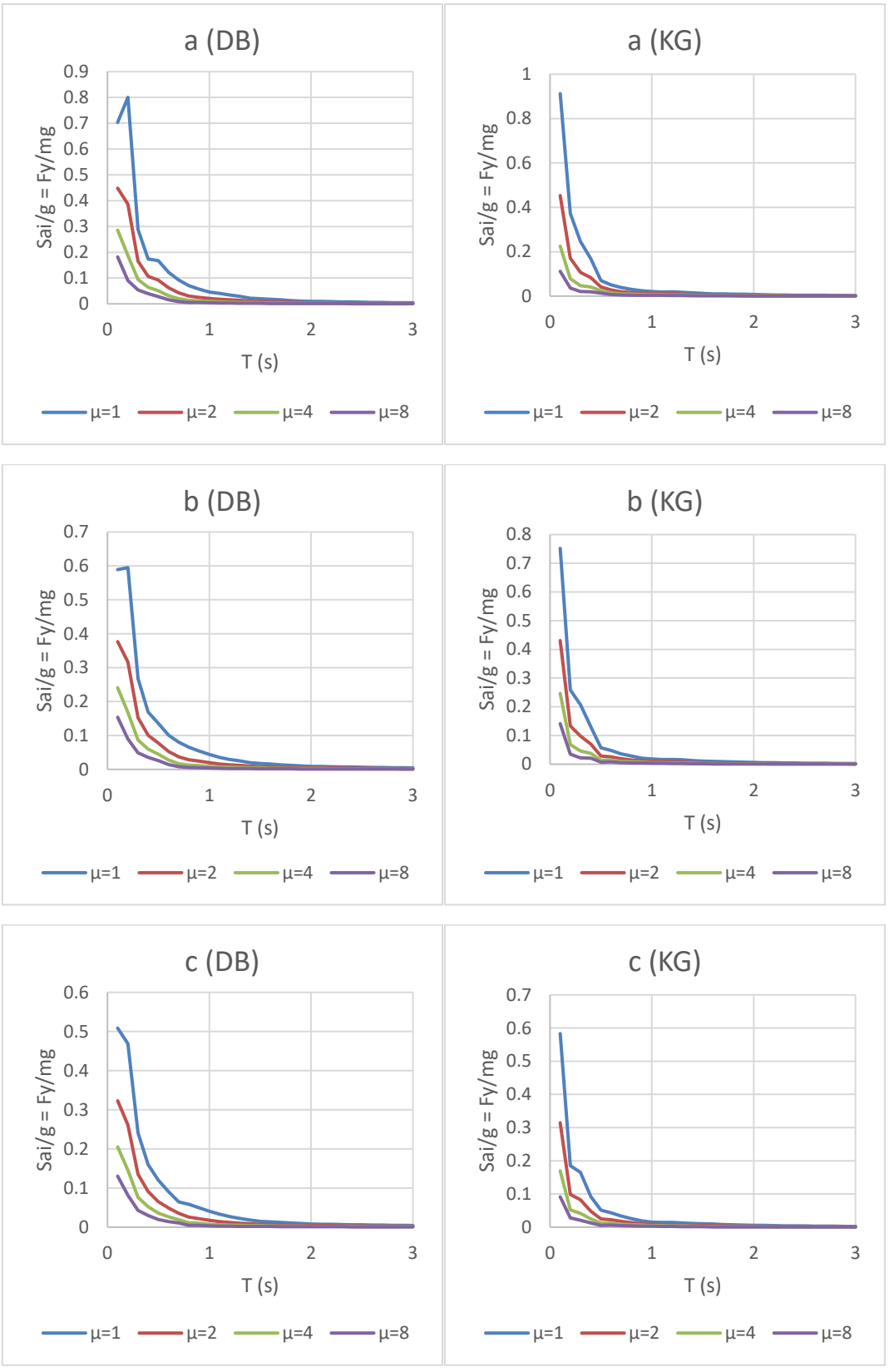
Şekil 85 Bingöl depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



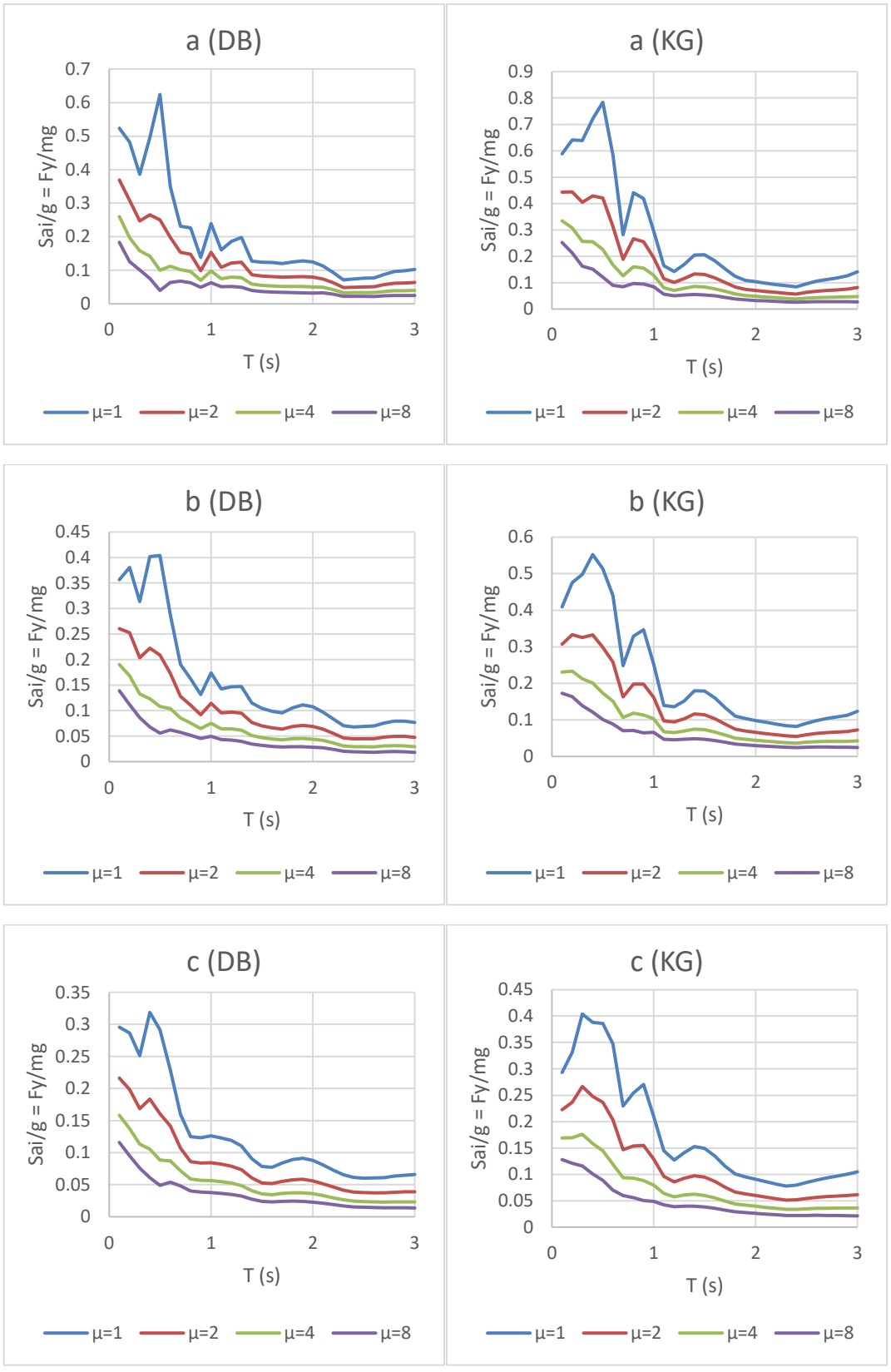
Şekil 86 Bursa depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



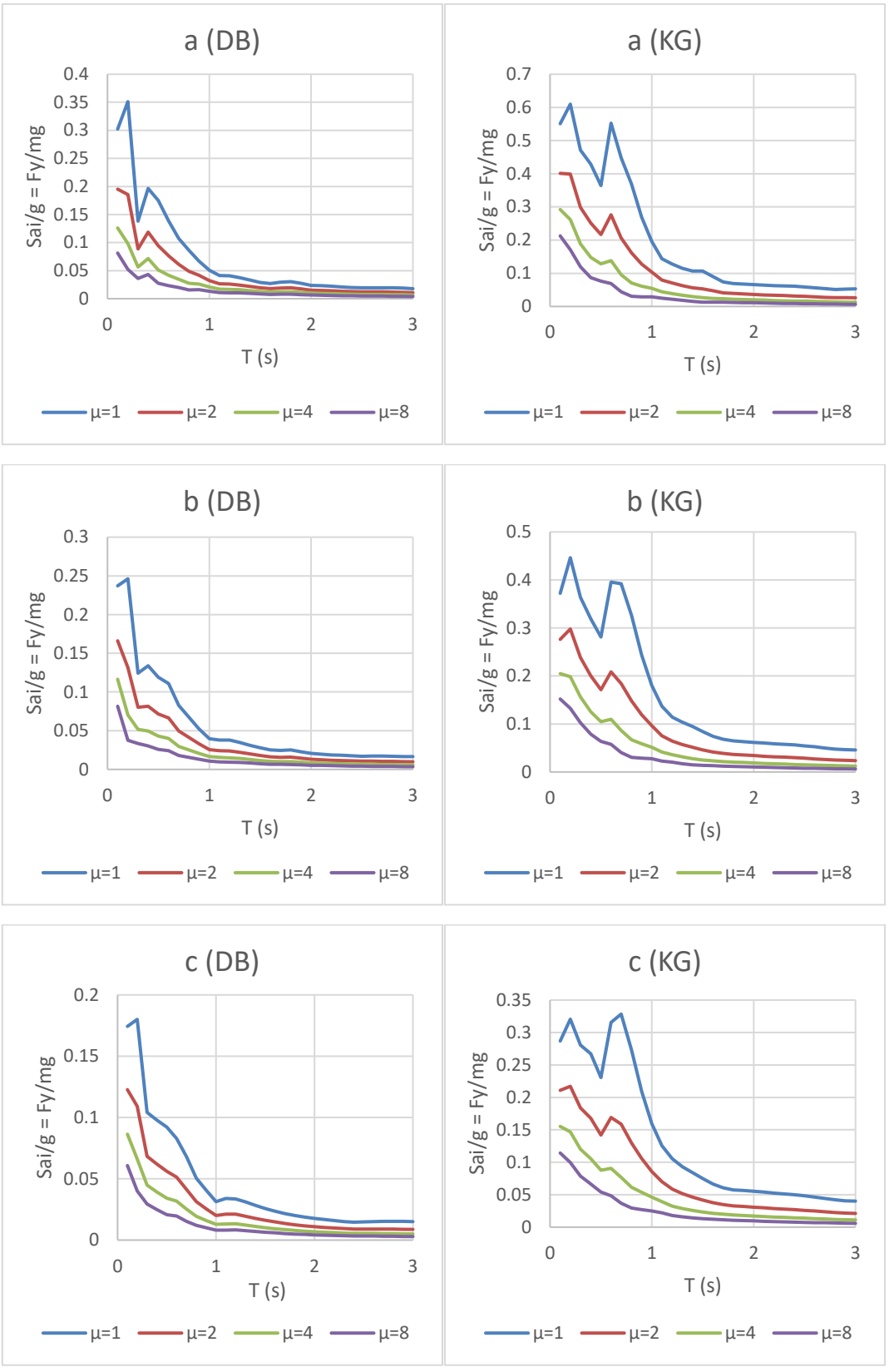
Şekil 87 Hatay depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



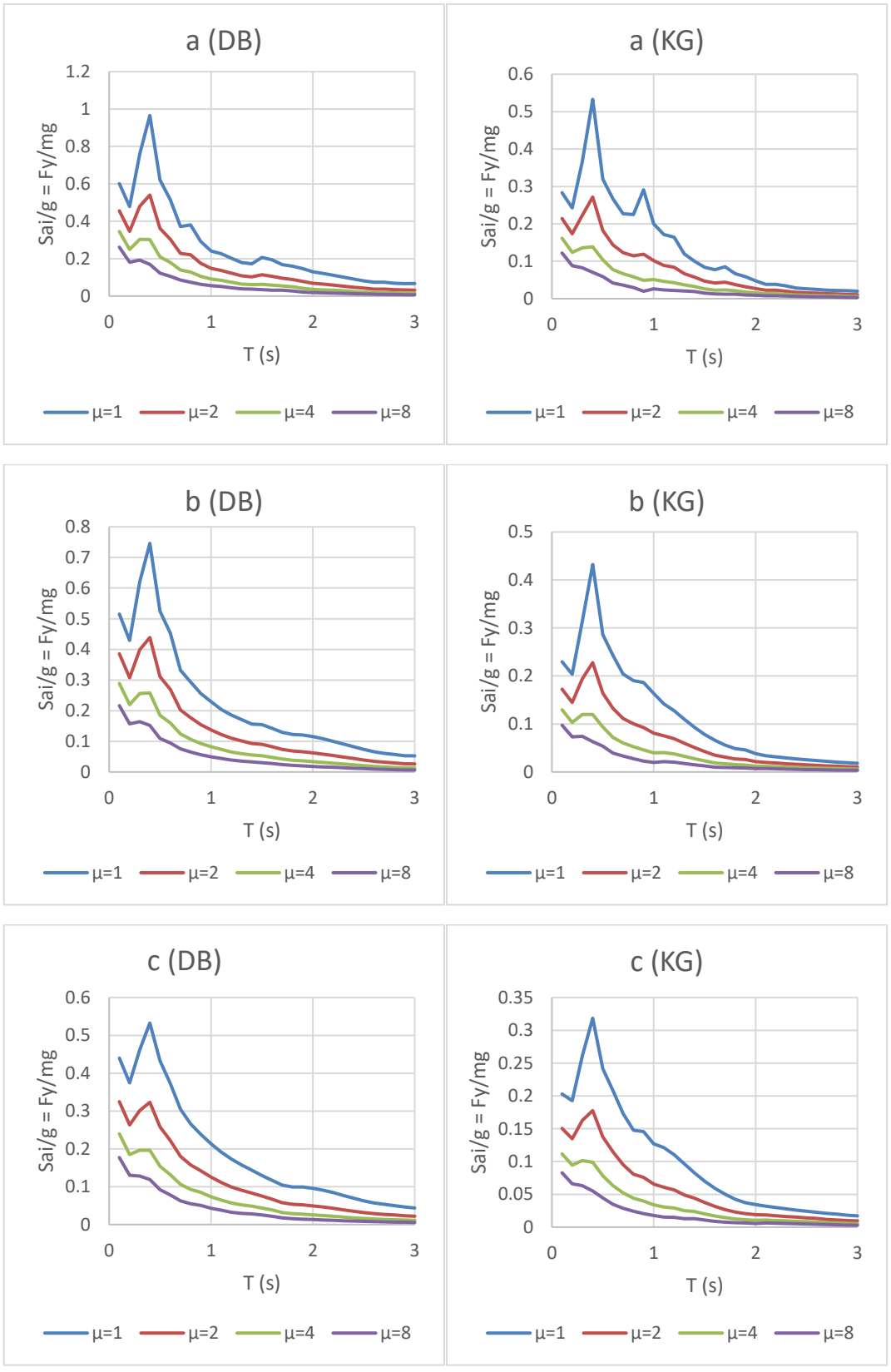
Şekil 88 Kahramanmaraş depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



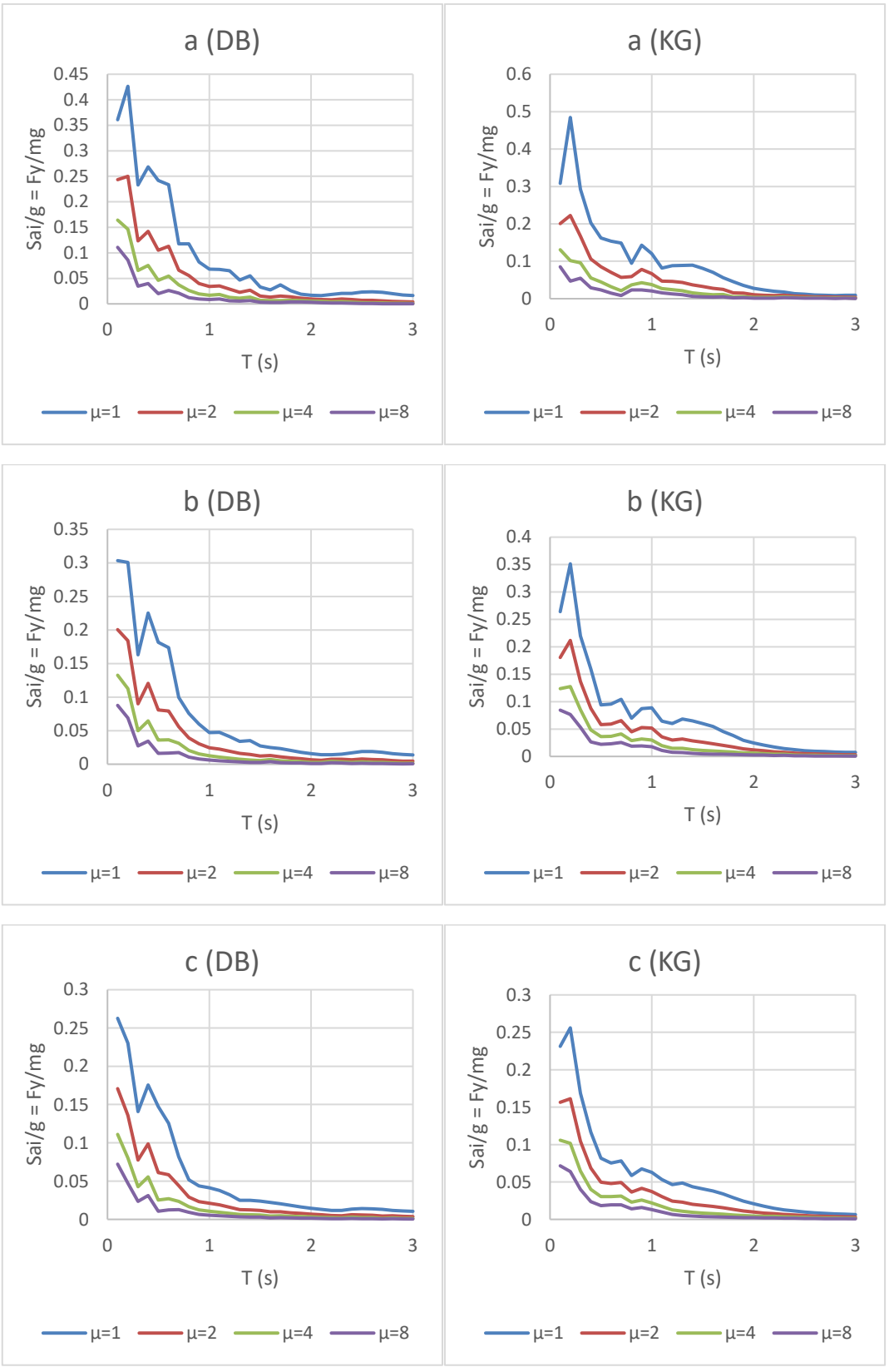
Şekil 89 Kocaeli depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



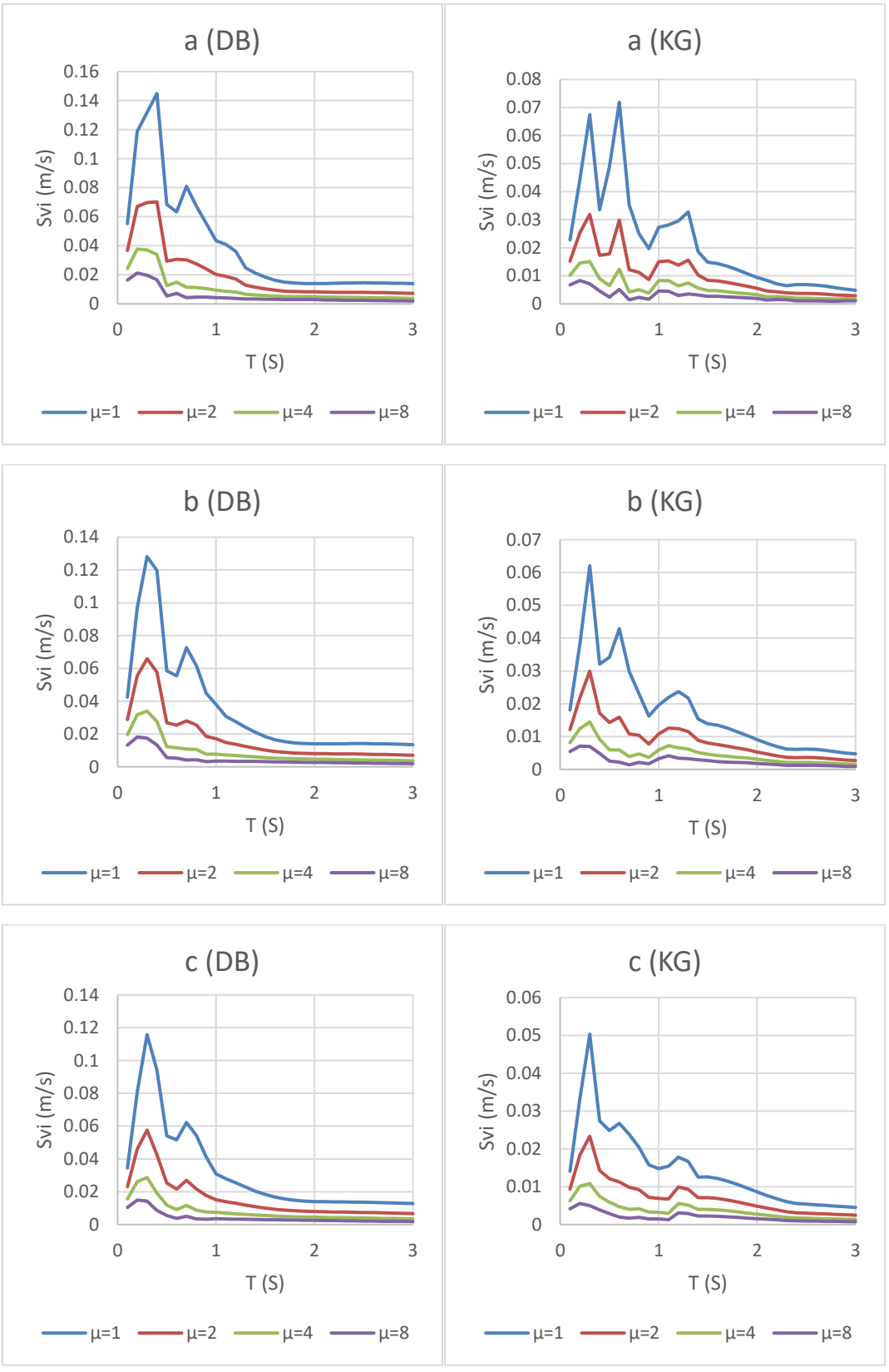
Şekil 90 Muğla depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



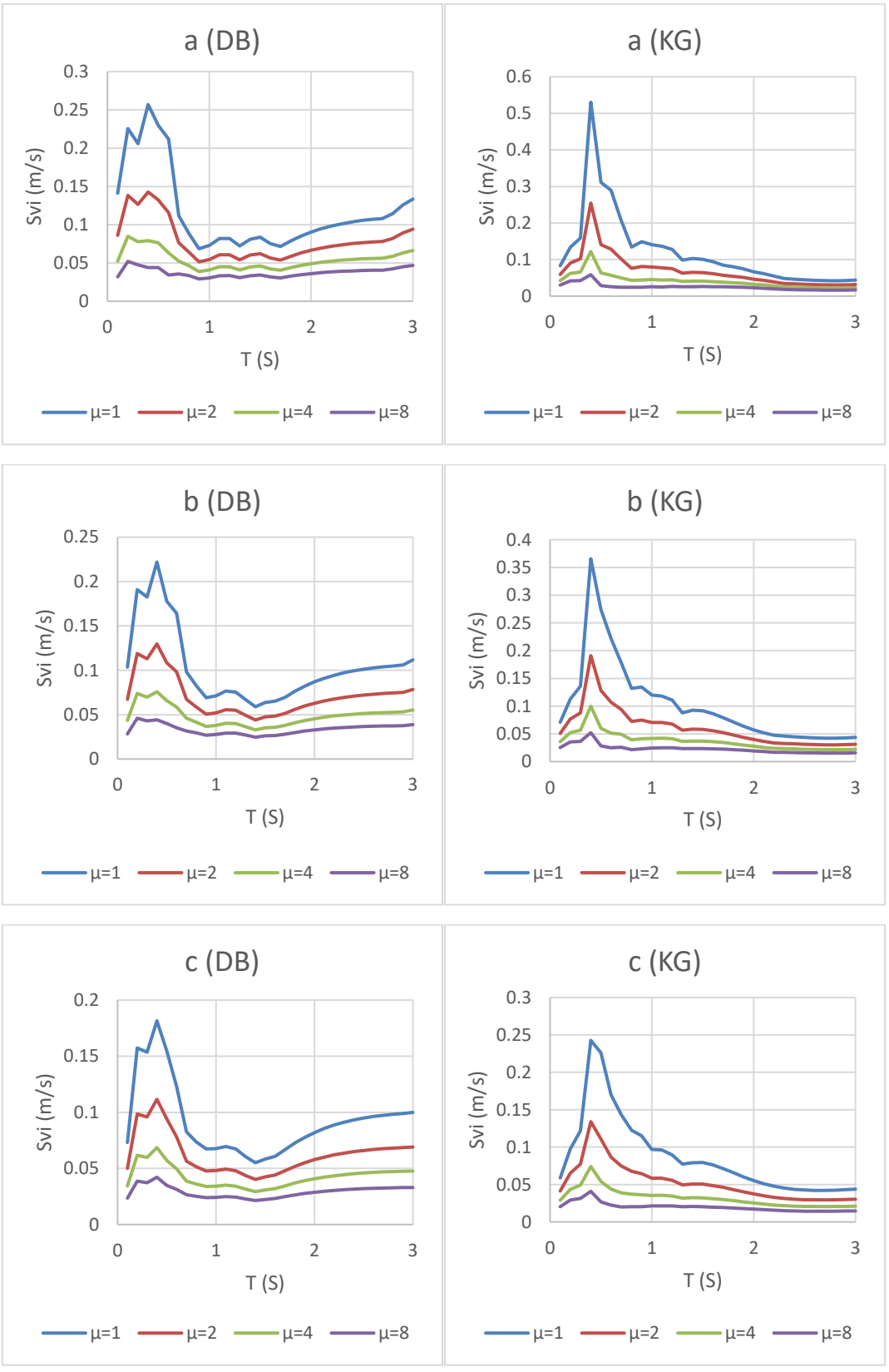
Şekil 91 Van depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



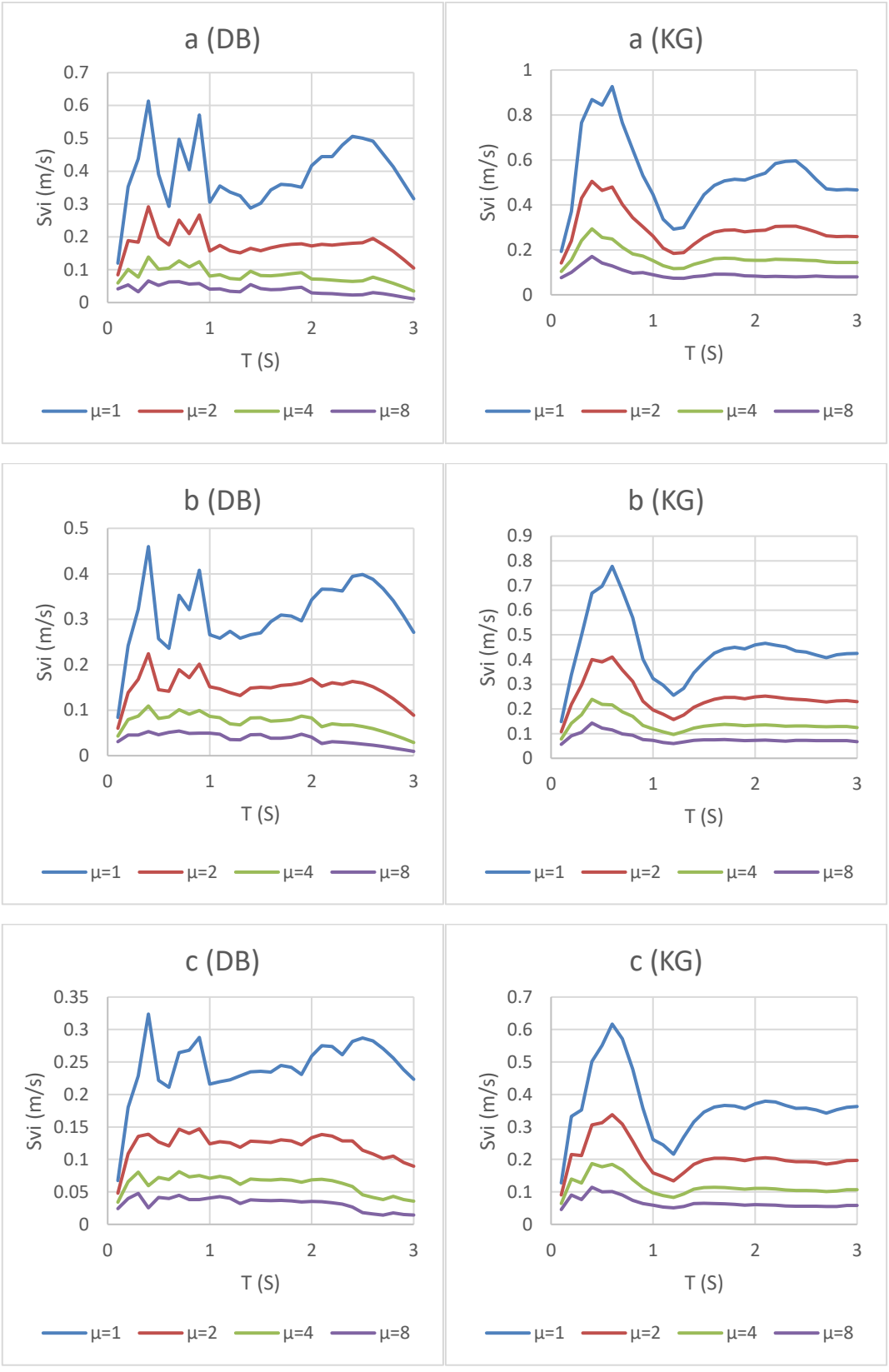
Şekil 92 Hatay depremi Sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için ivme veya dayanım spektrumu



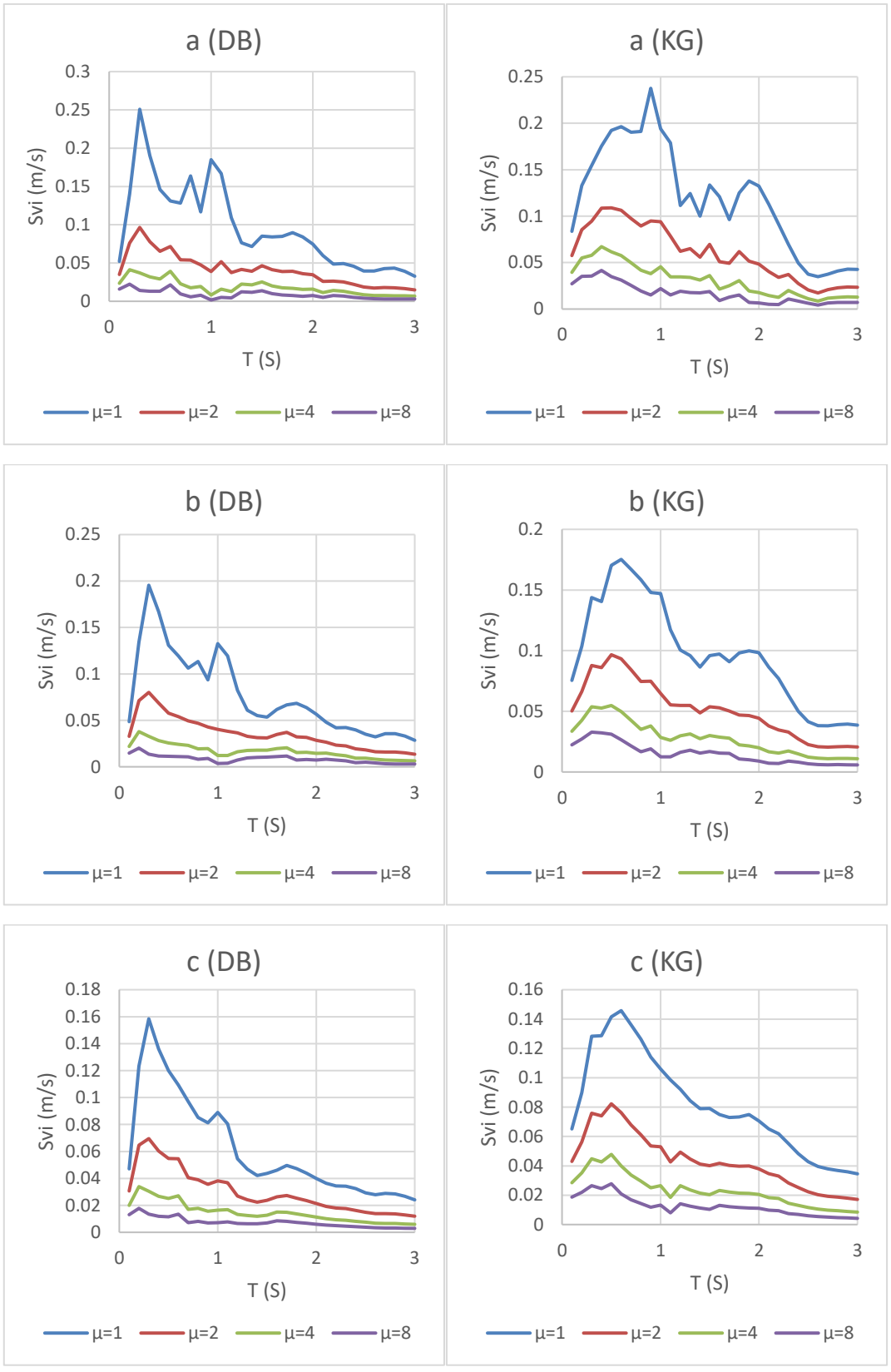
Şekil 93 Aydın depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



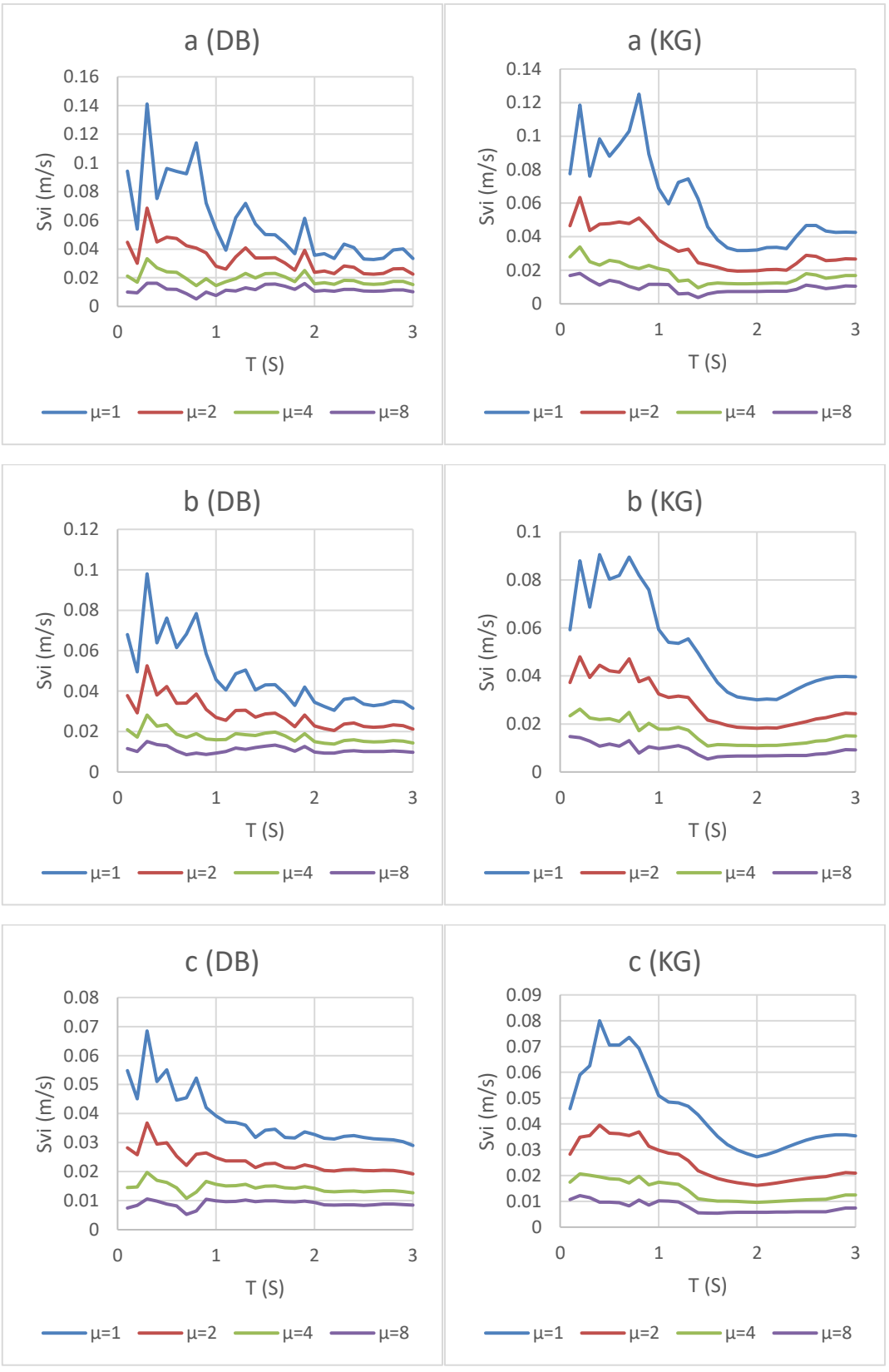
Şekil 94 Balıkesir depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



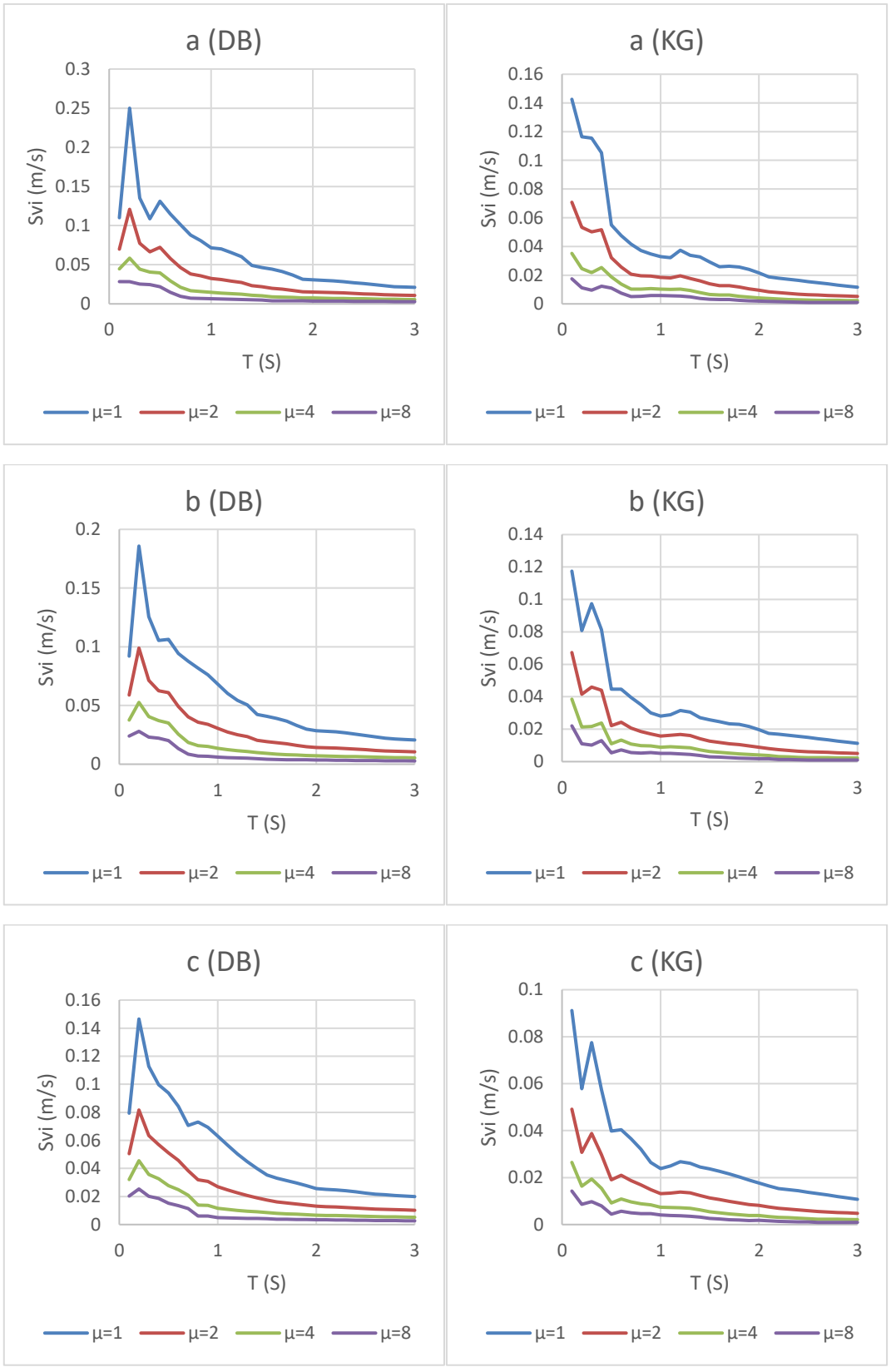
Şekil 95 Bingöl depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



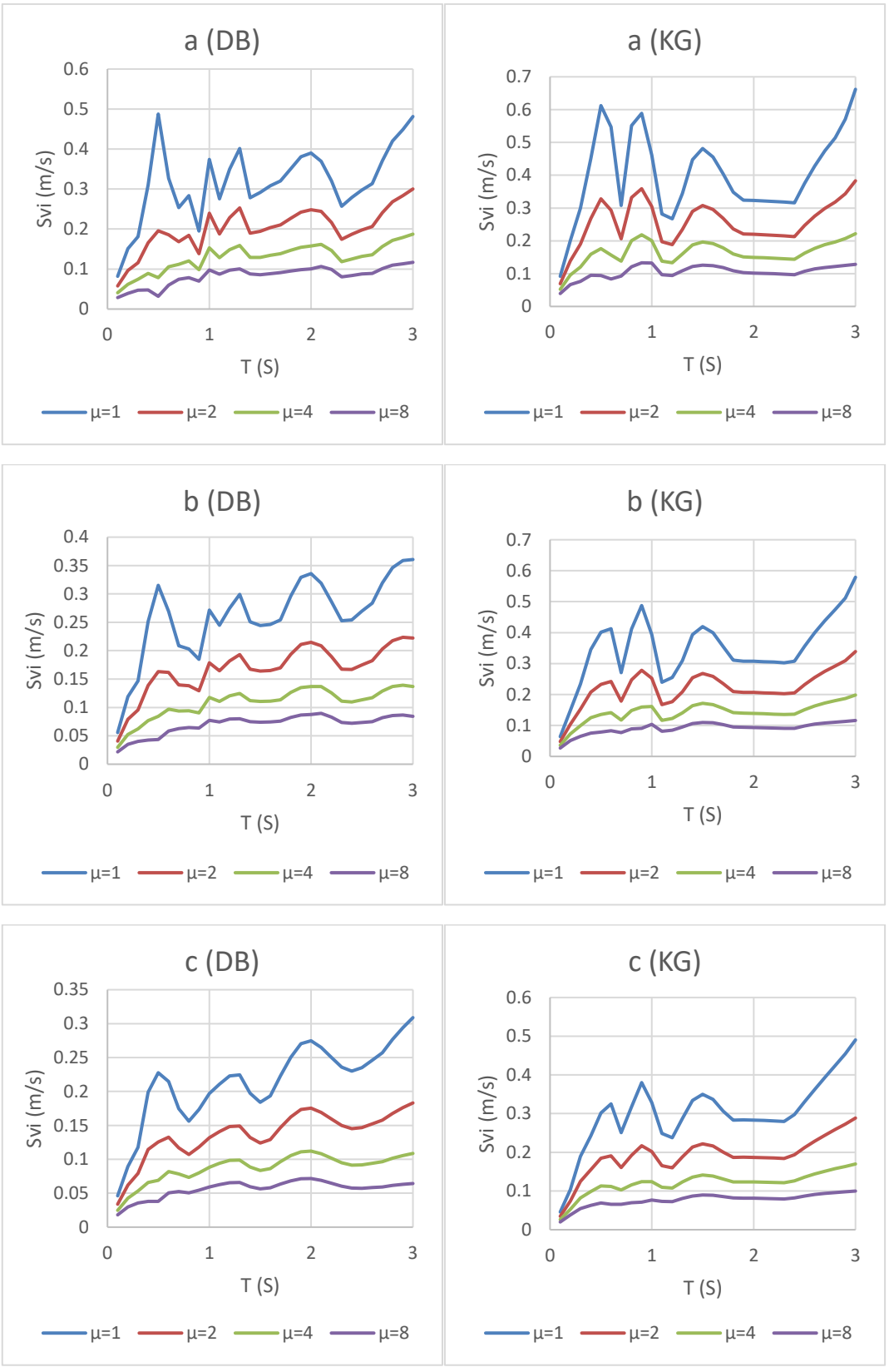
Şekil 96 Bursa depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



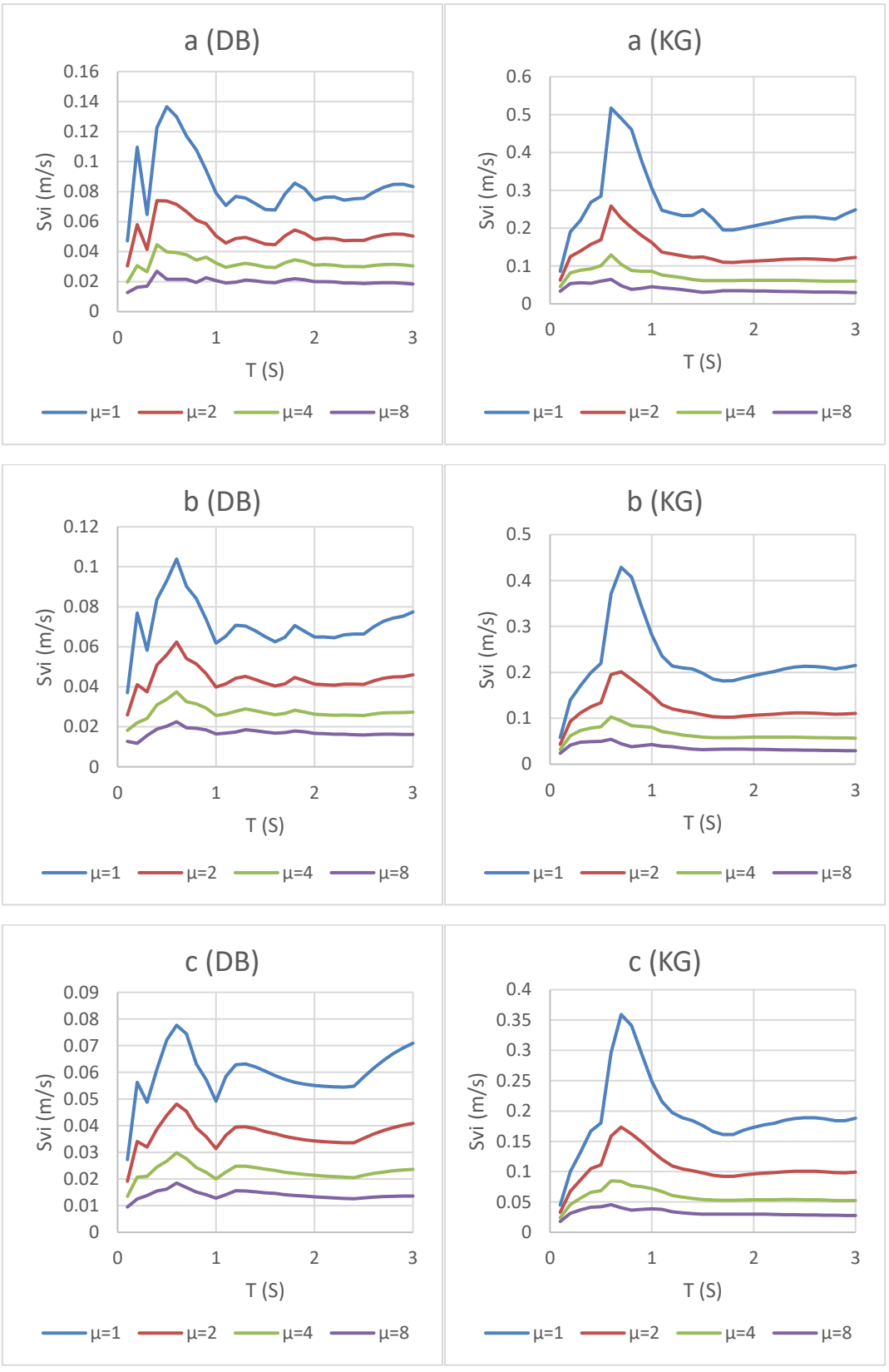
Şekil 97 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



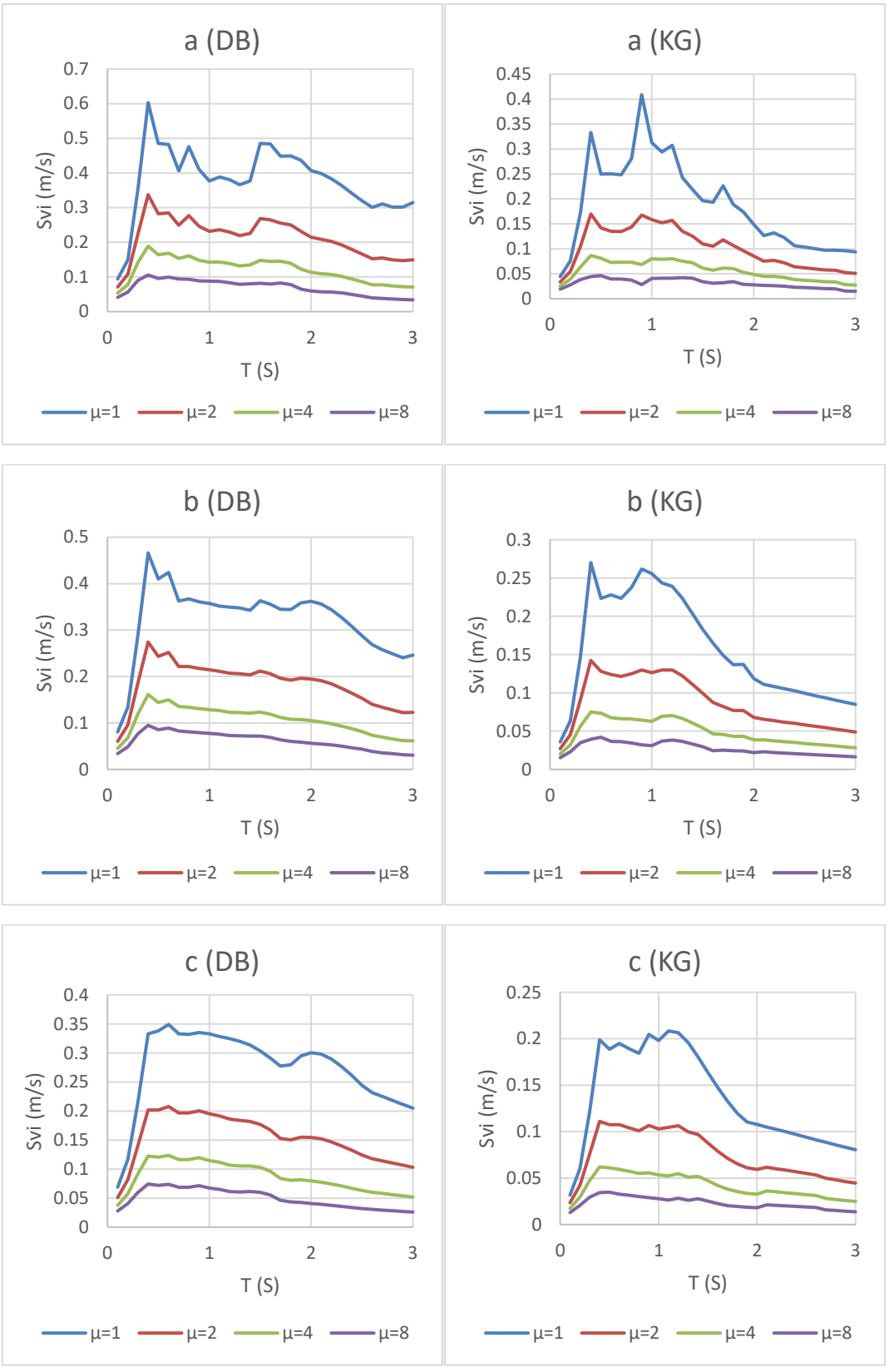
Şekil 98 Kahramanmaraş depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



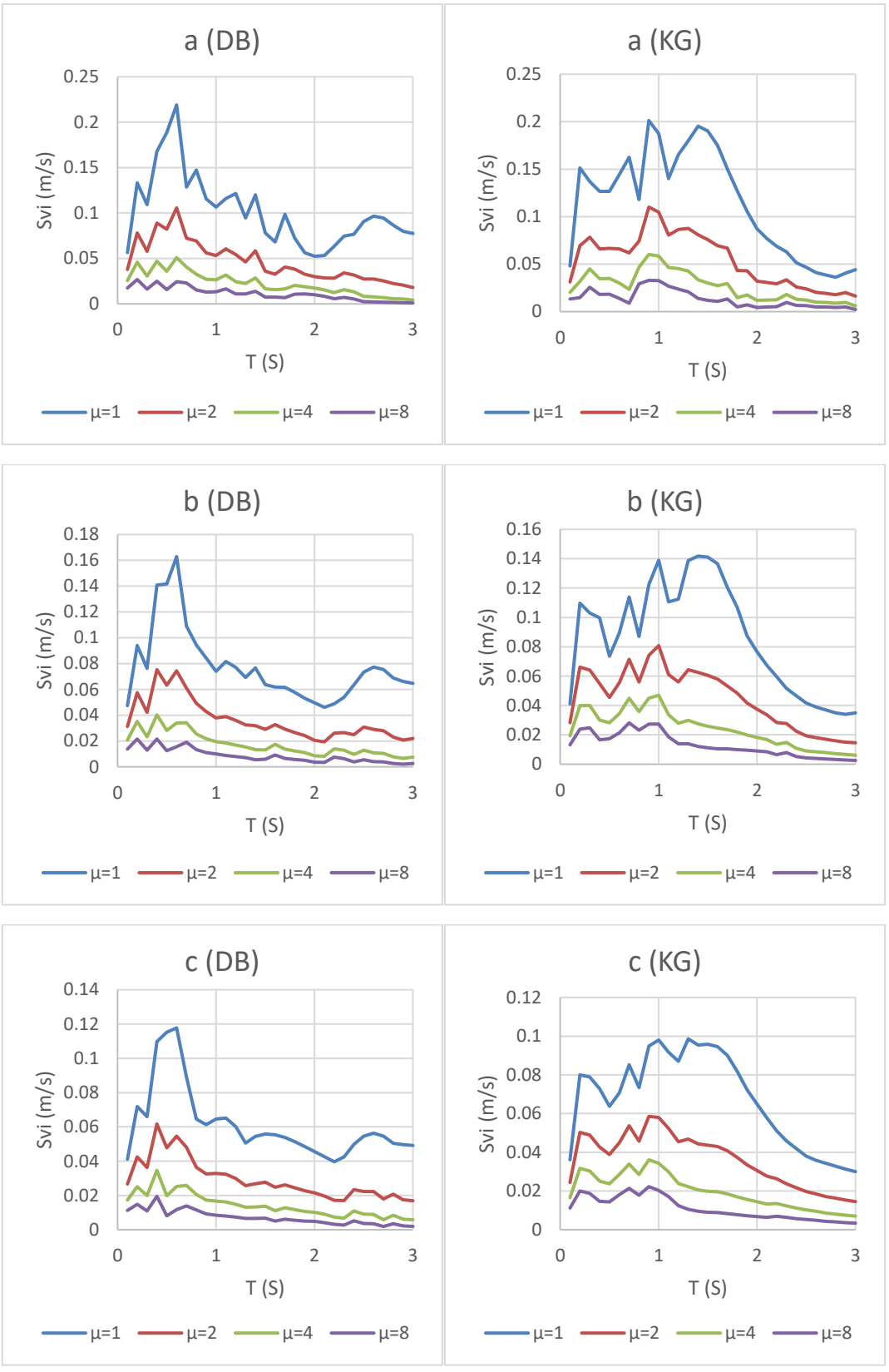
Şekil 99 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



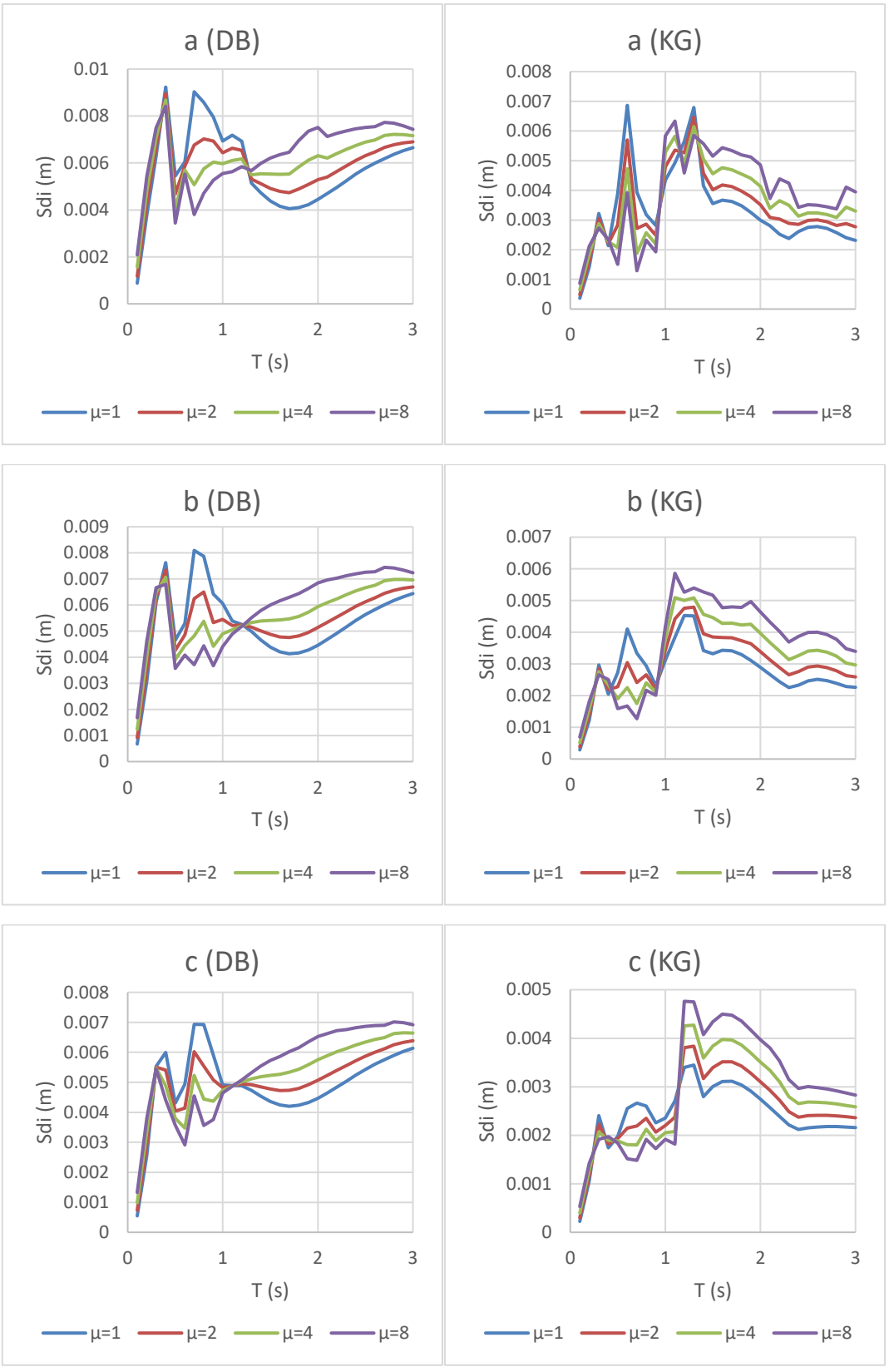
Şekil 100 Muğla depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



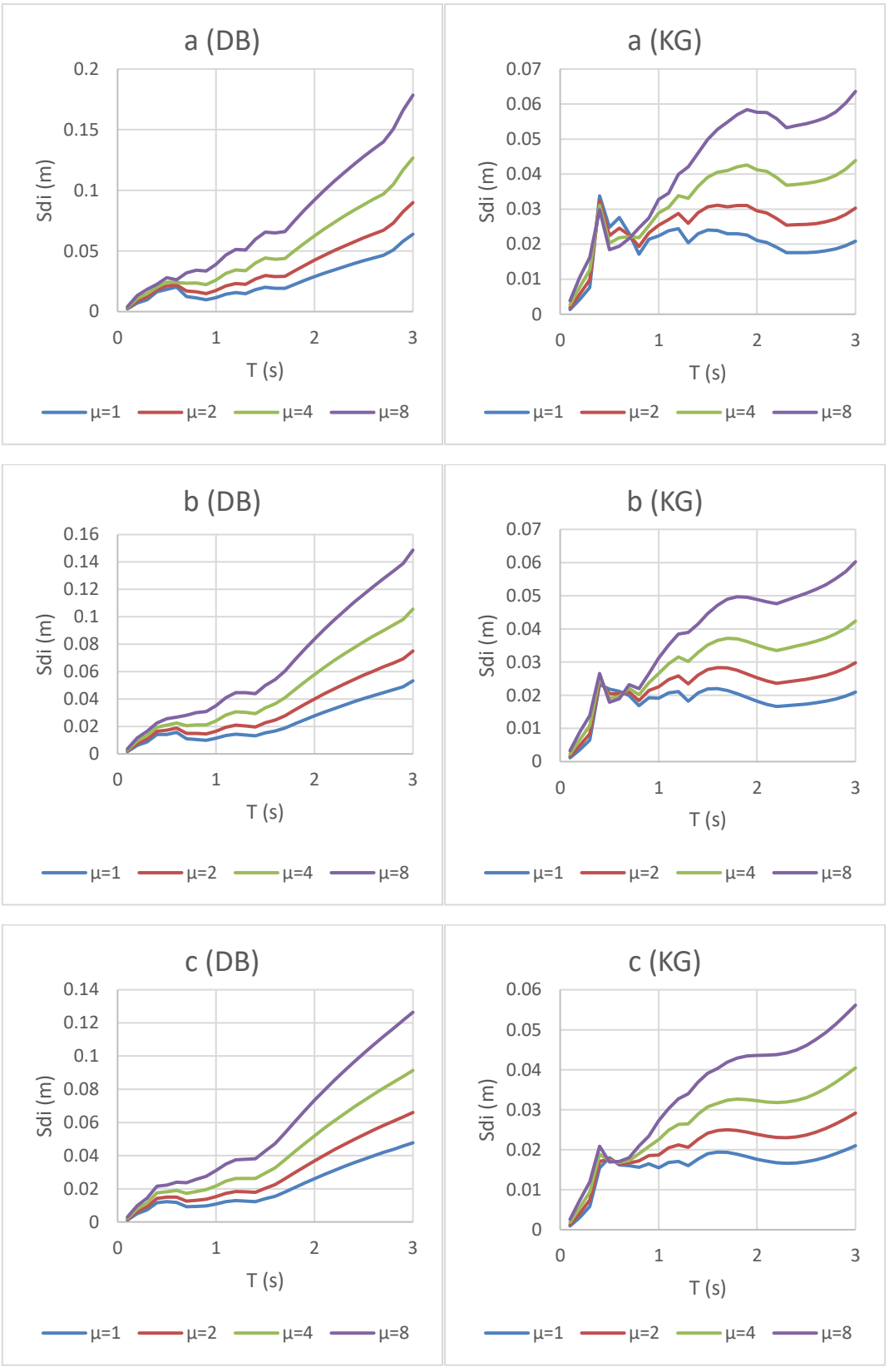
Şekil 101 Van depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



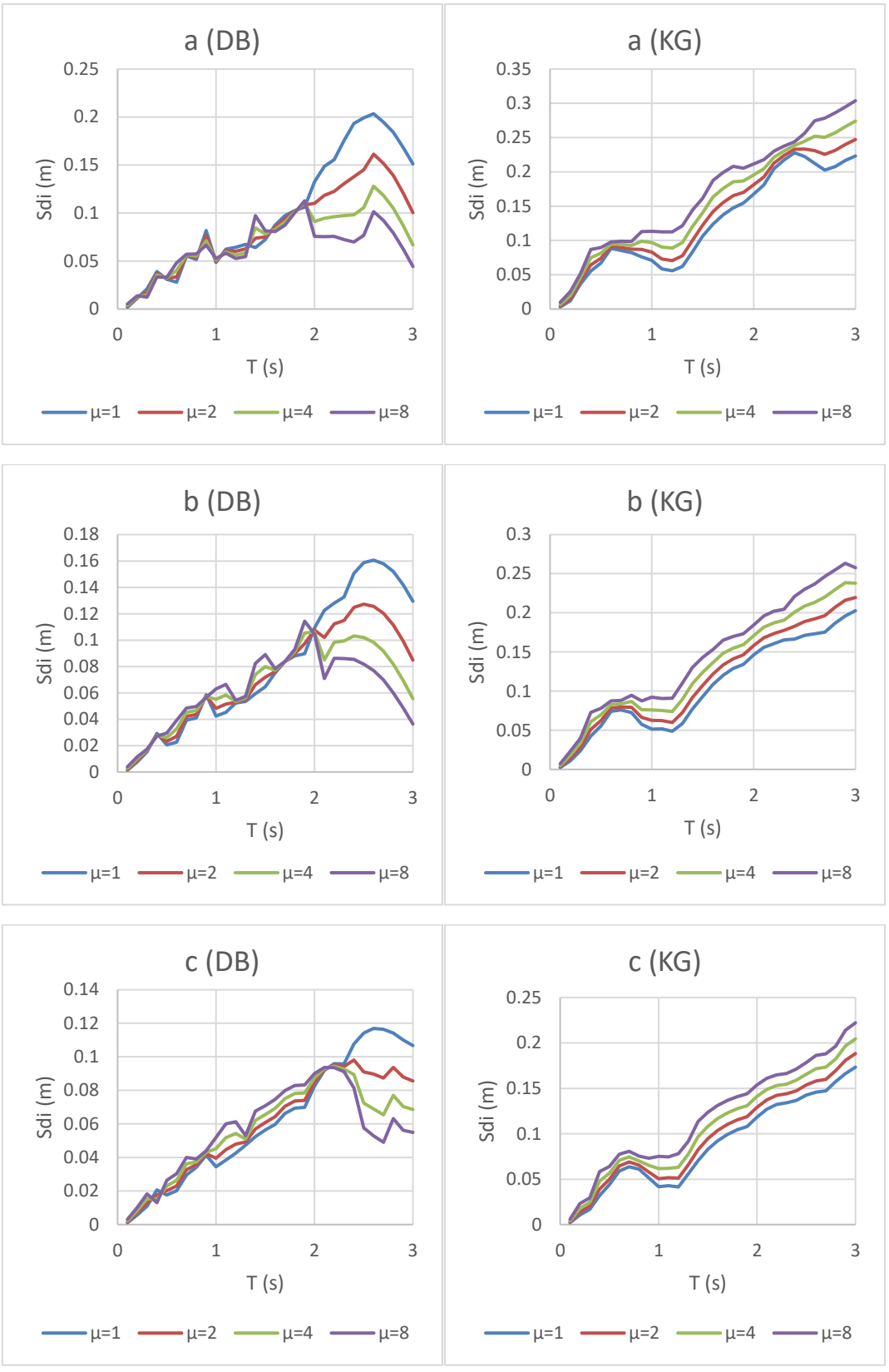
Şekil 102 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için hız spektrumu



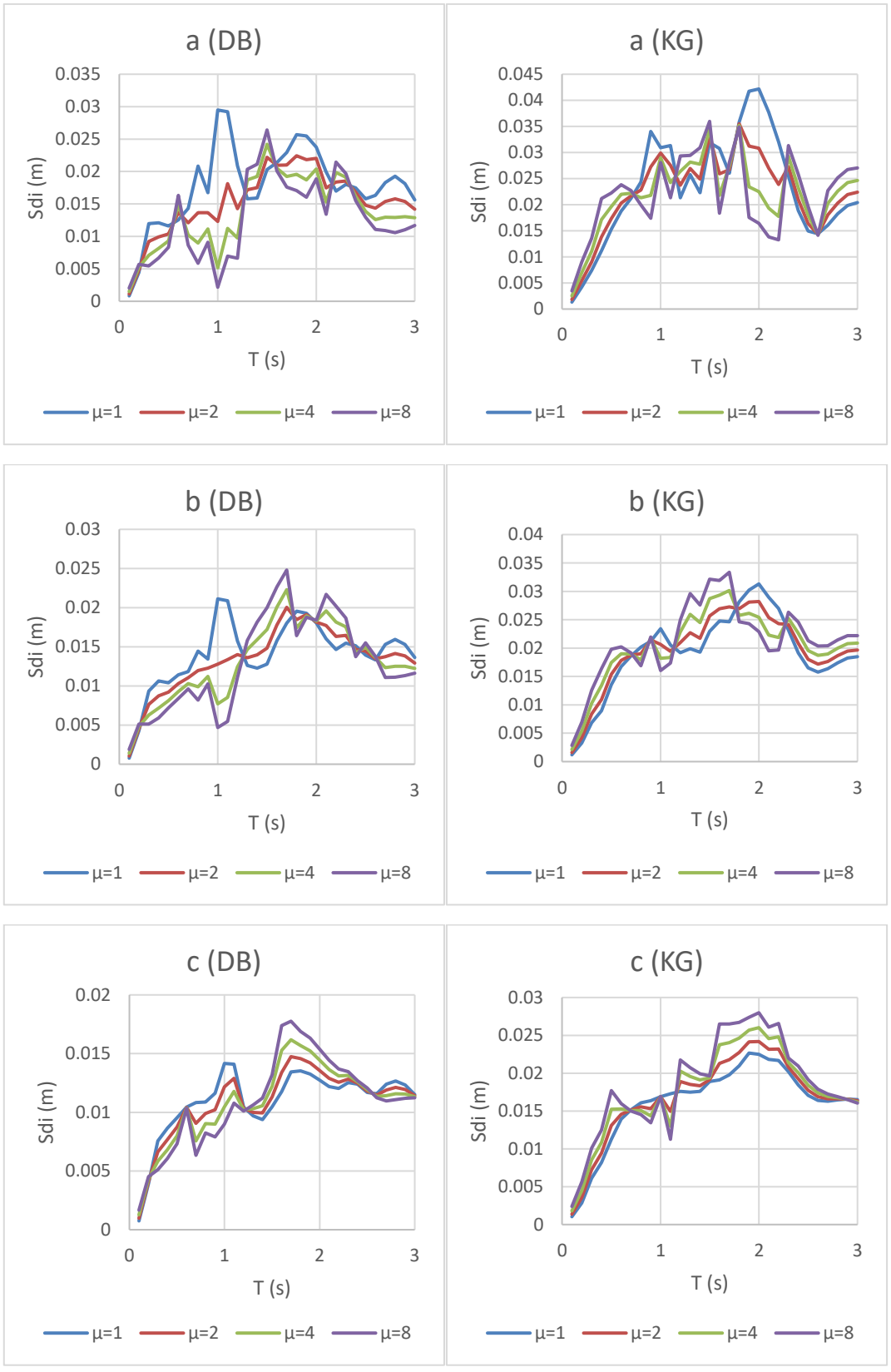
Şekil 103 Aydın depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



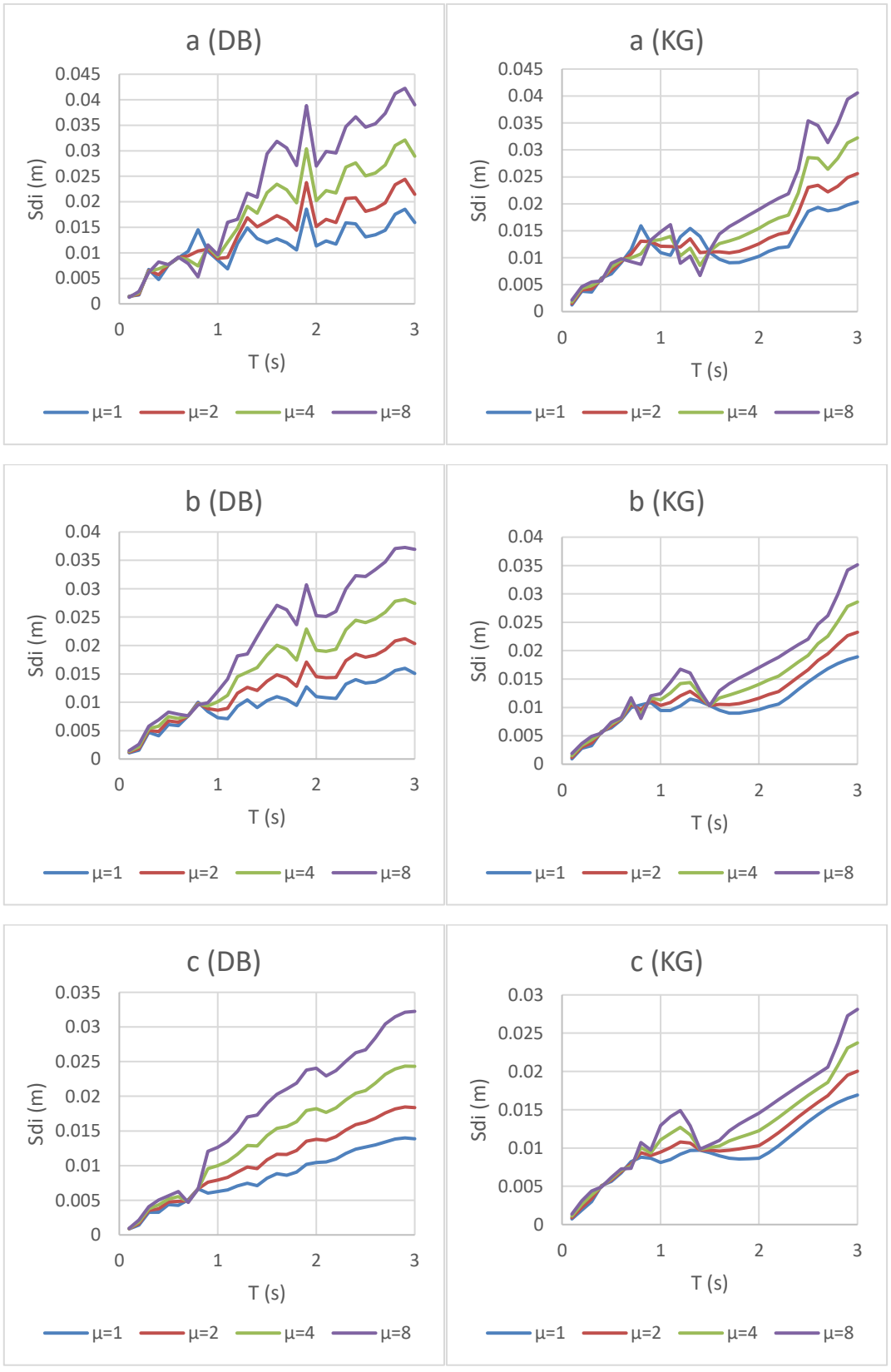
Şekil 104 Balıkesir depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



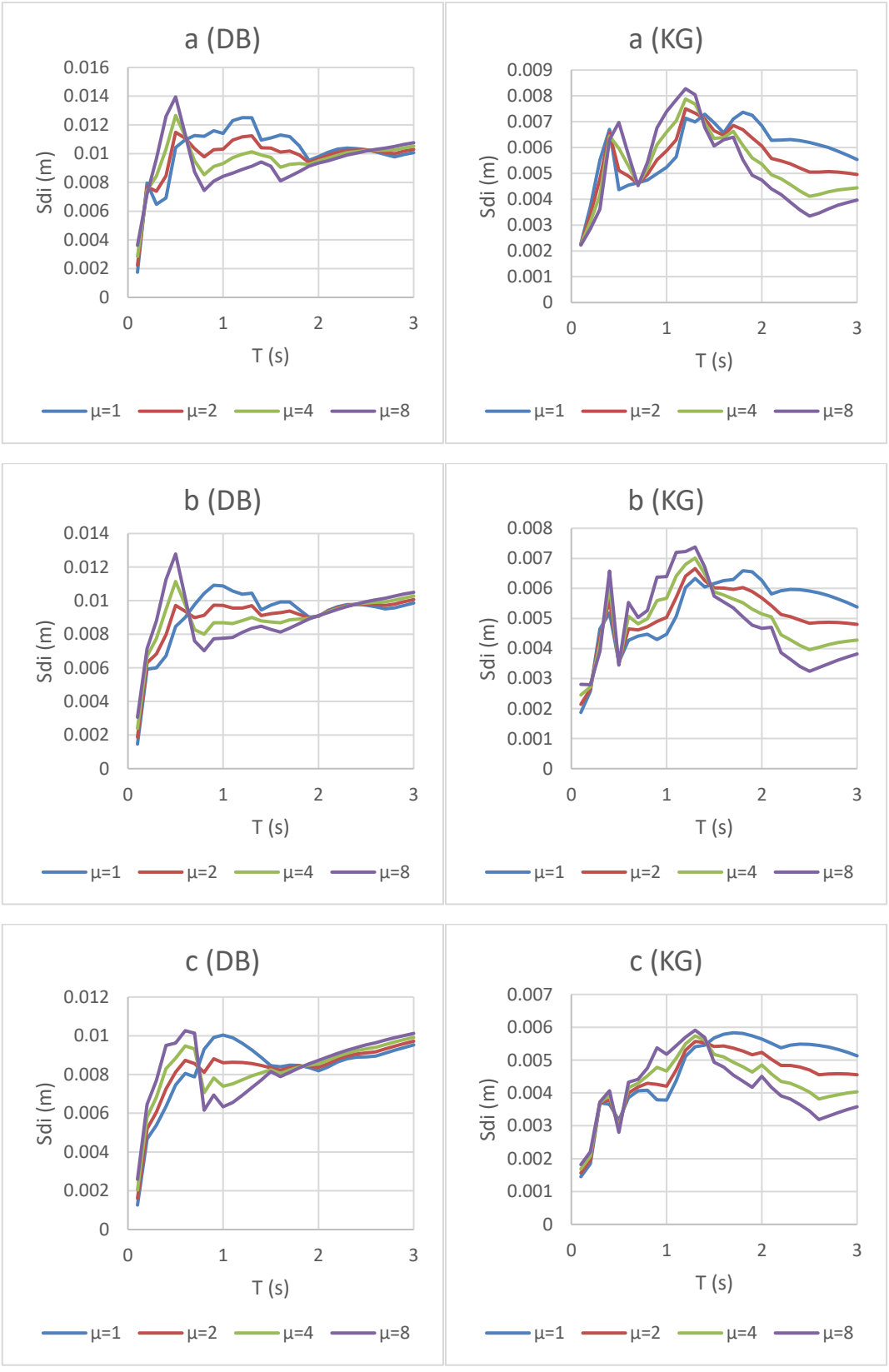
Şekil 105 Bingöl depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



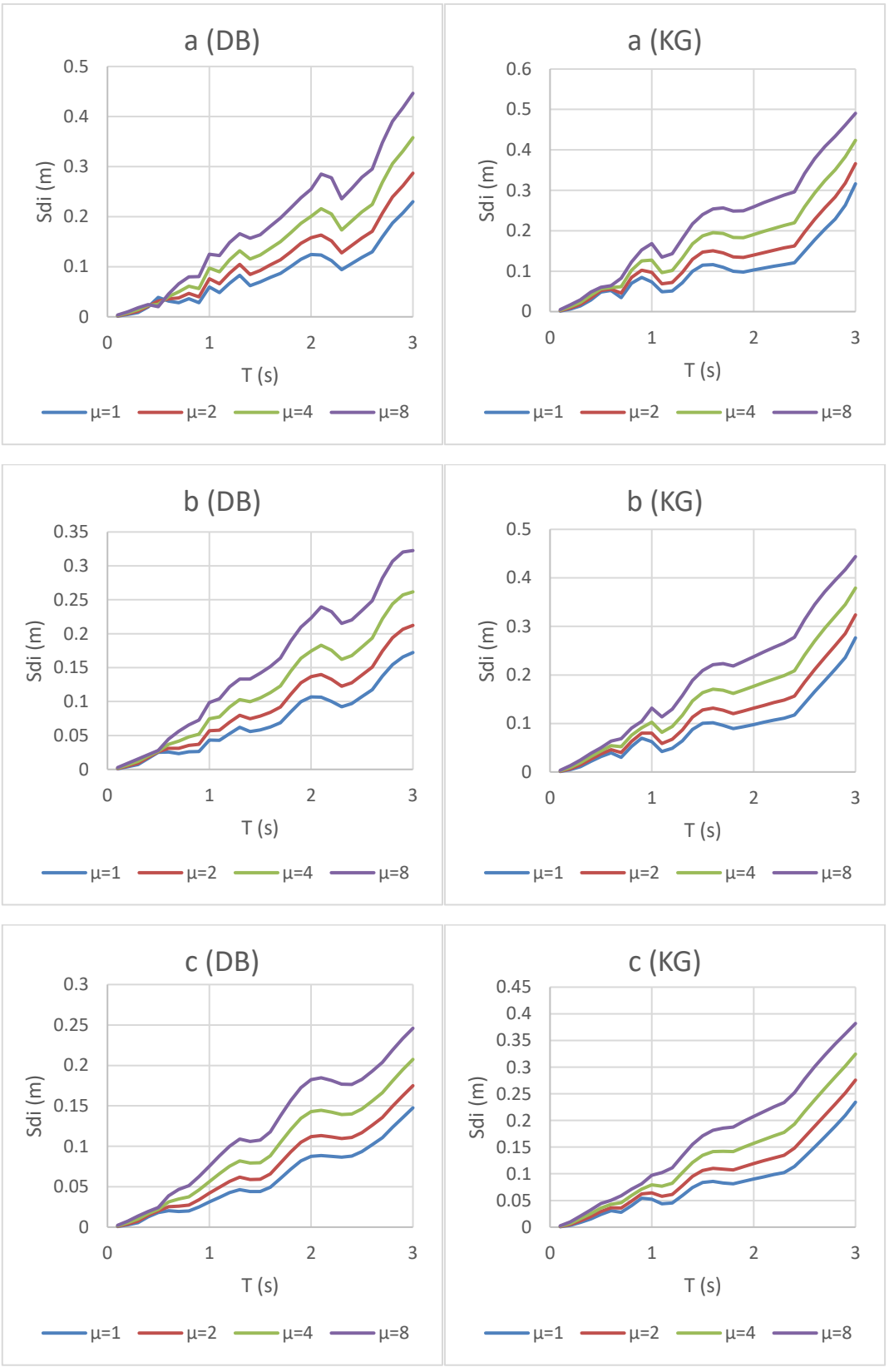
Şekil 106 Bursa depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



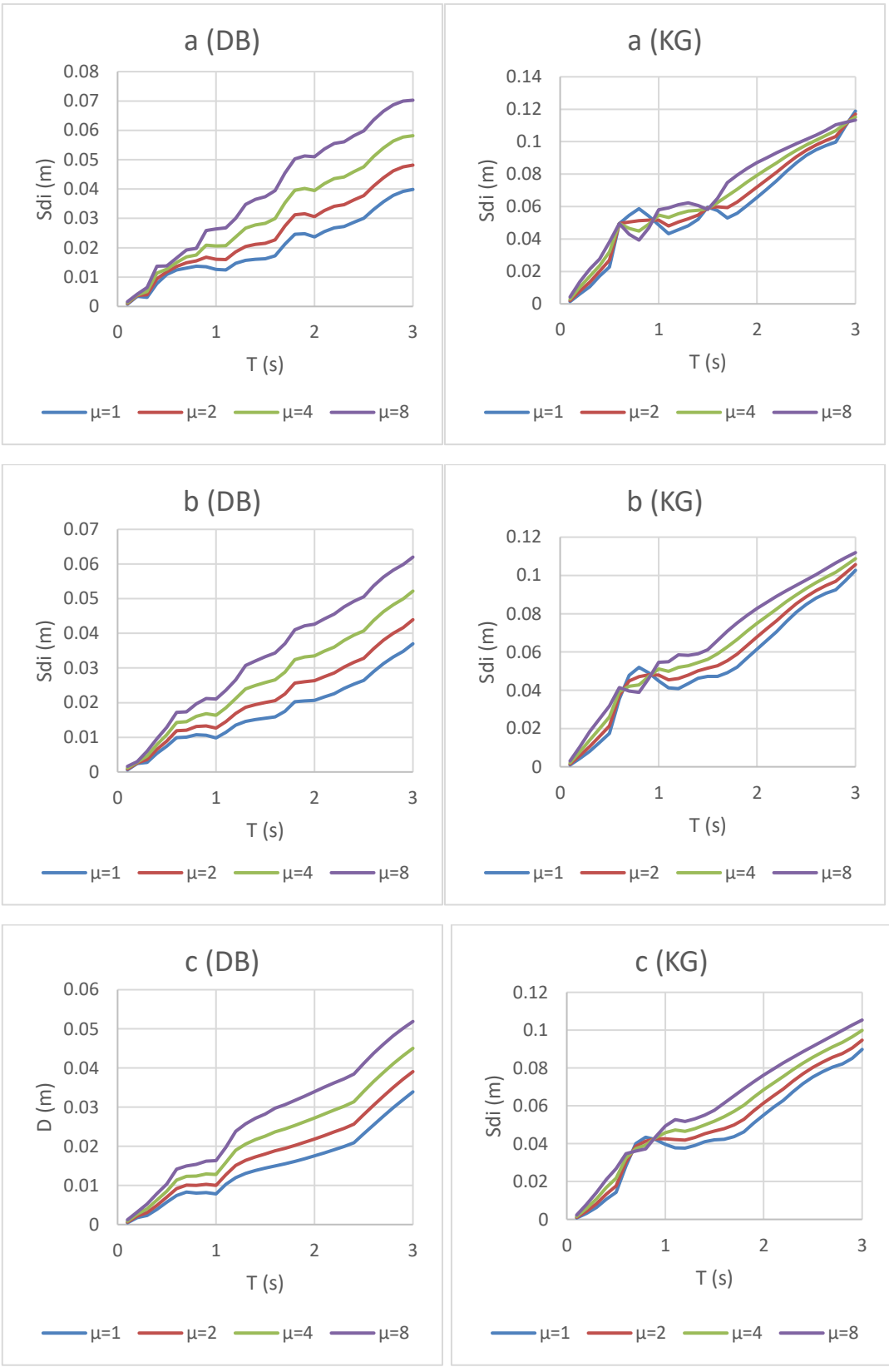
Şekil 107 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



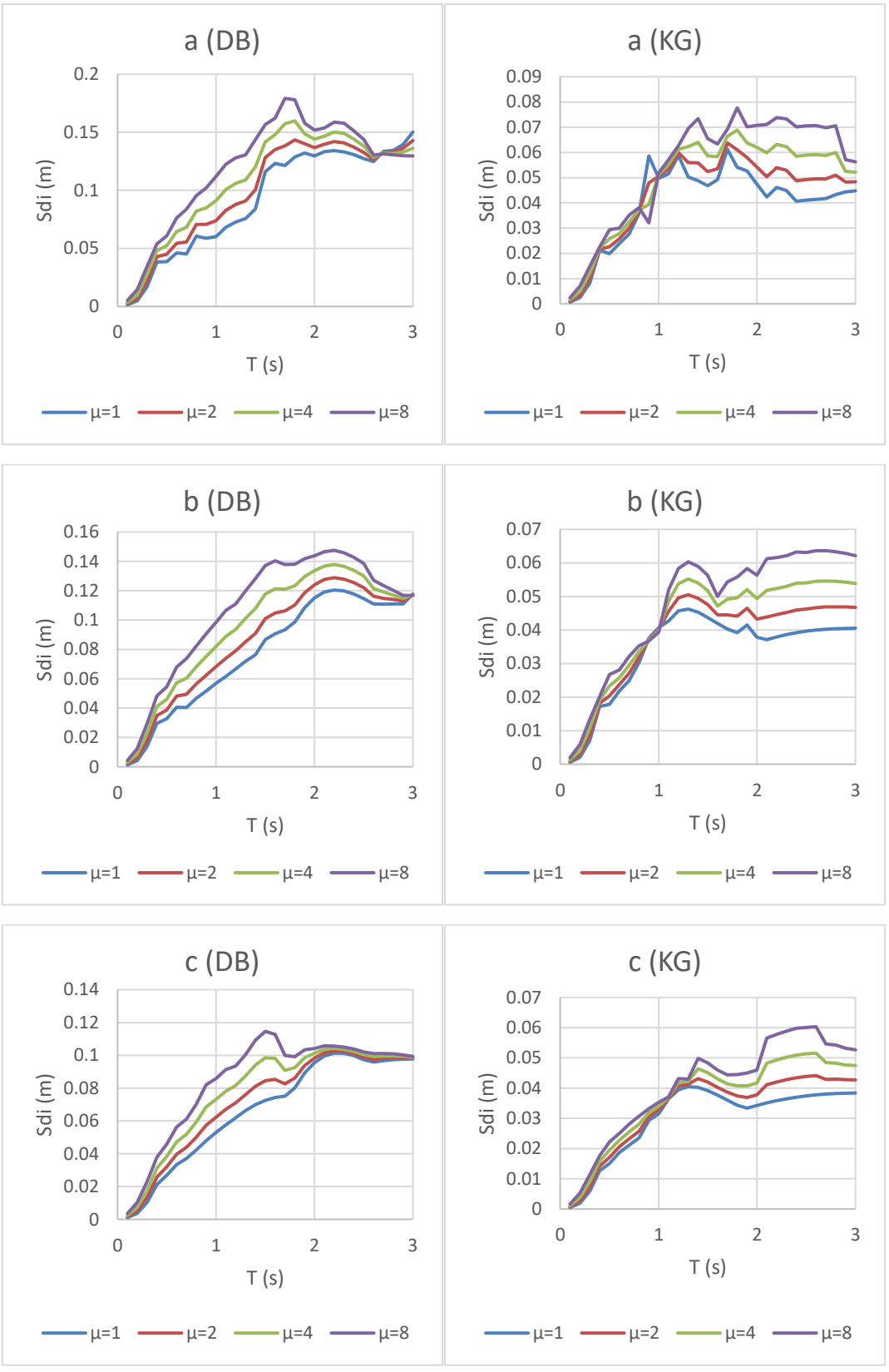
Şekil 108 Kahramanmaraş depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



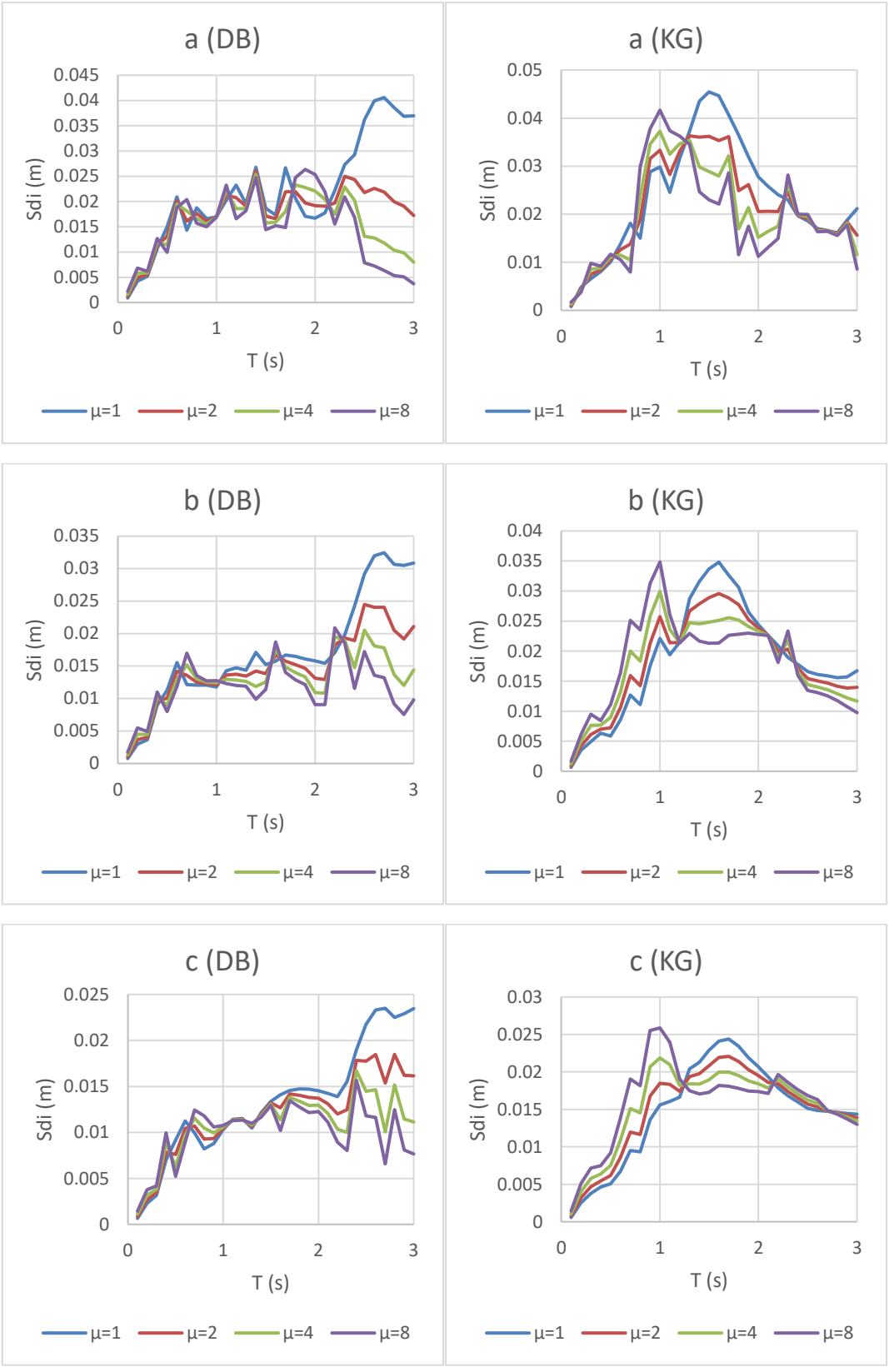
Şekil 109 Kocaeli depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



Şekil 110 Muğla depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu

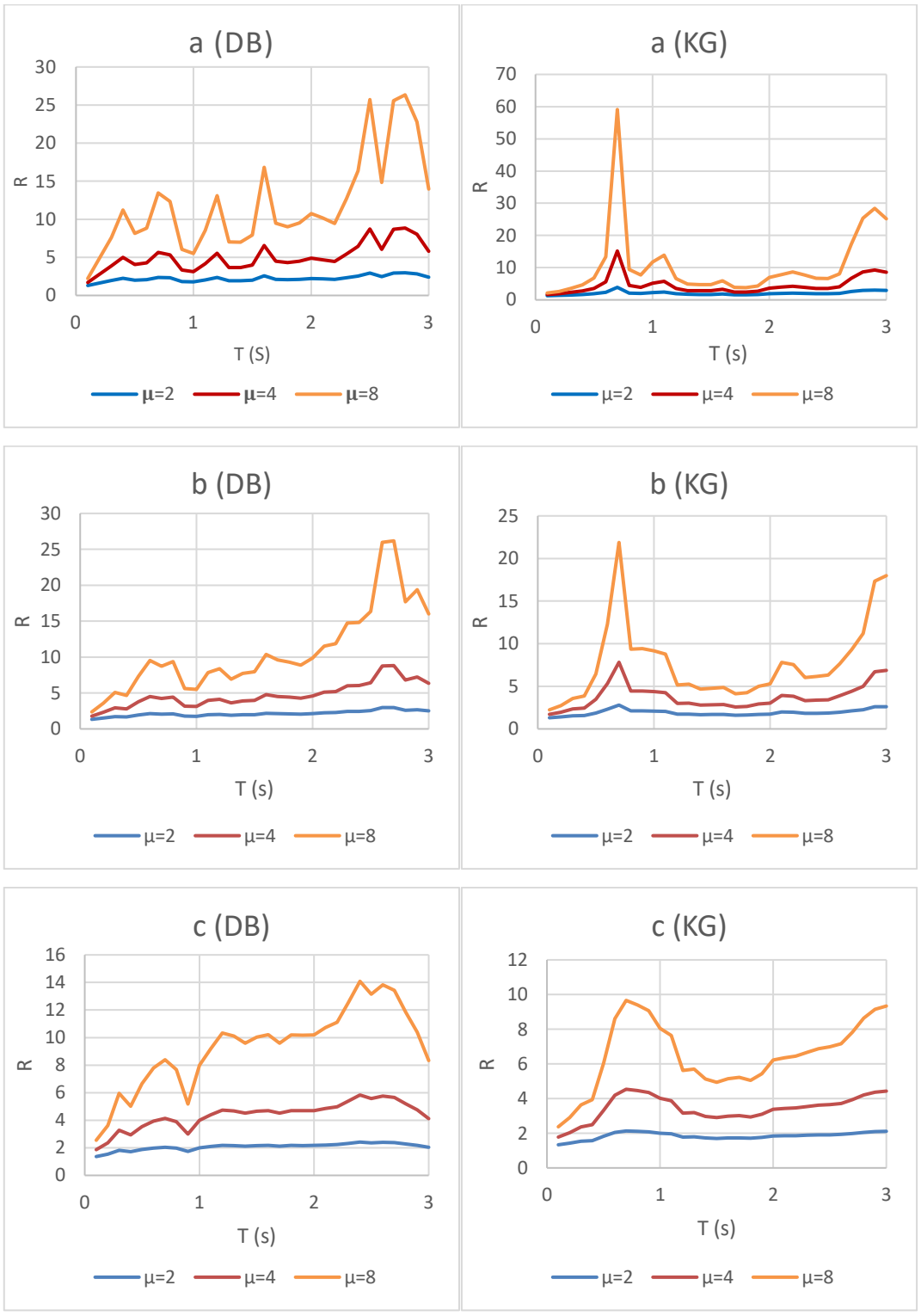


Şekil 111 Van depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu



Şekil 112 Hatay depremi sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için yer değiştirme spektrumu

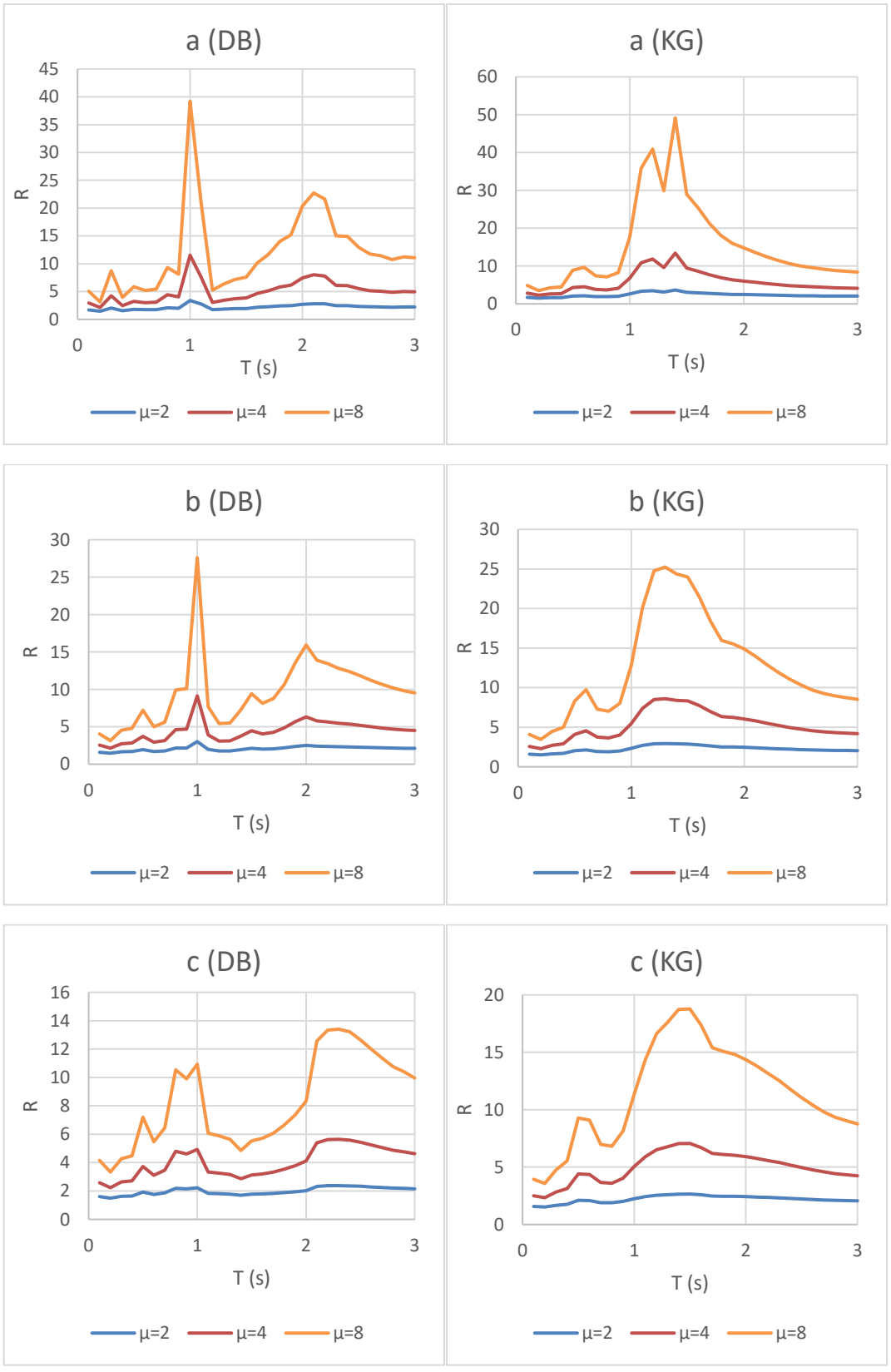
Ek2c: Yumuşak zemin grubunun Rμ- μ-T davranış spektrumları



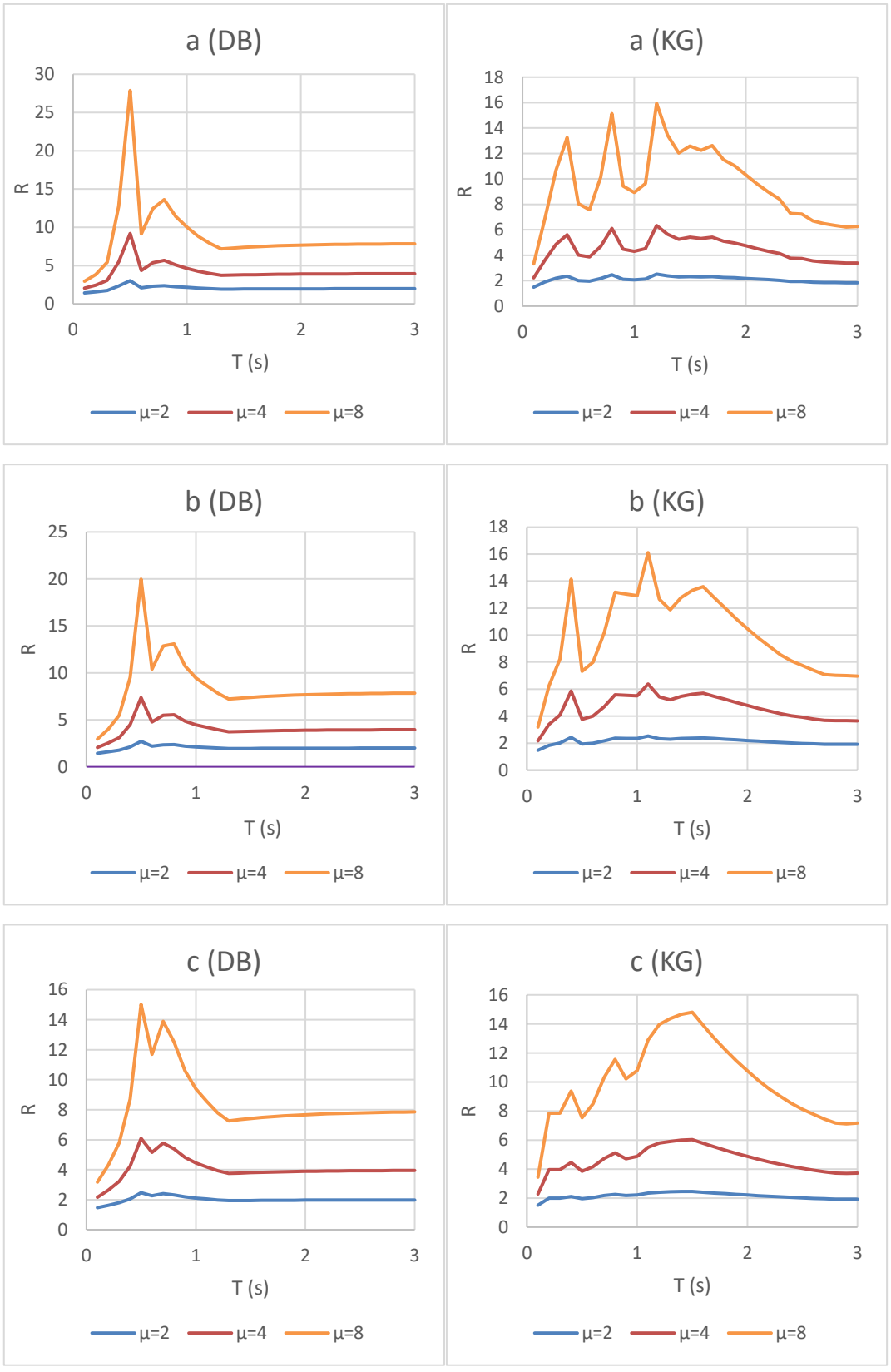
Şekil 113 Adana depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



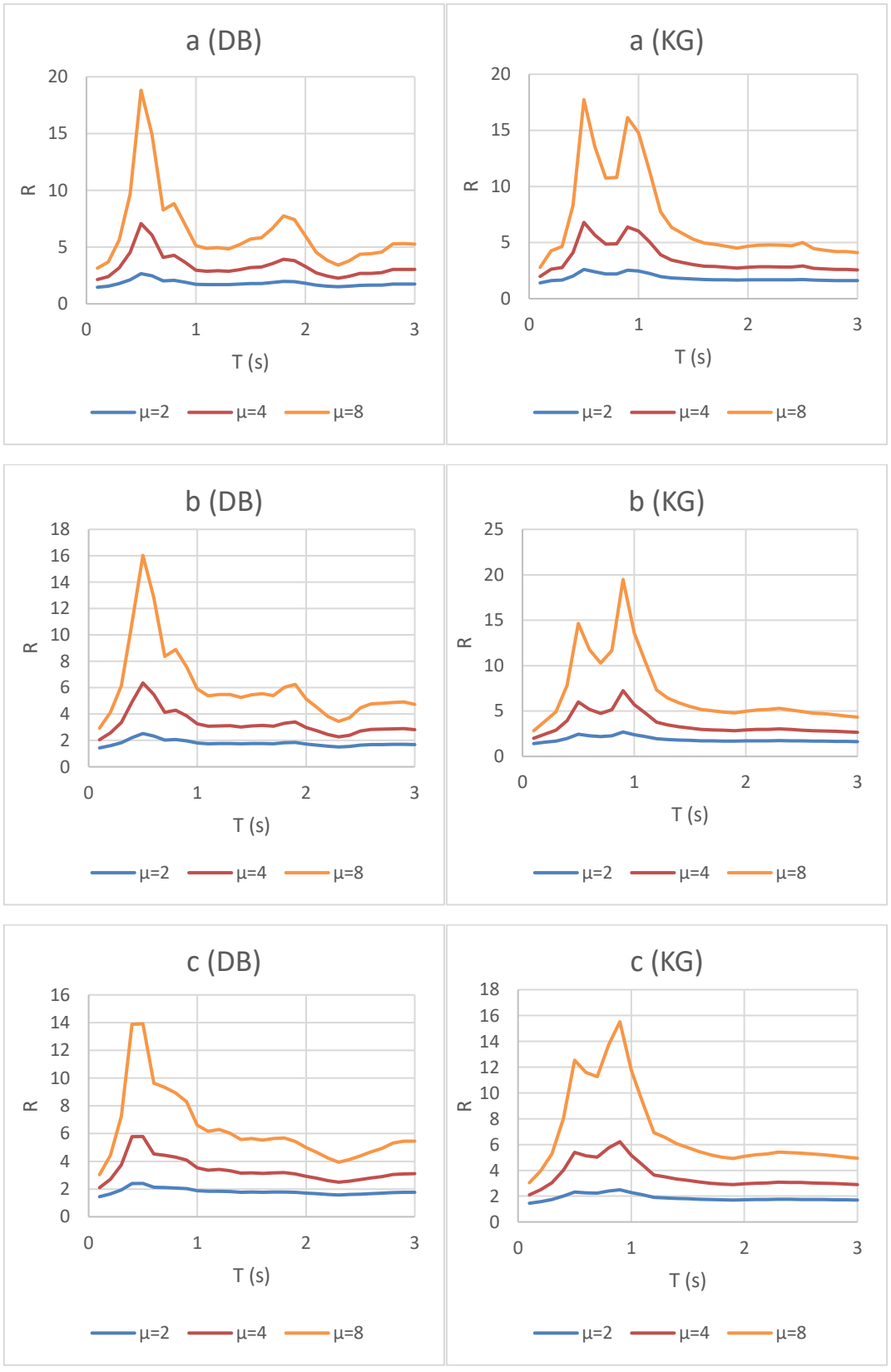
Şekil 114 Afyon depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



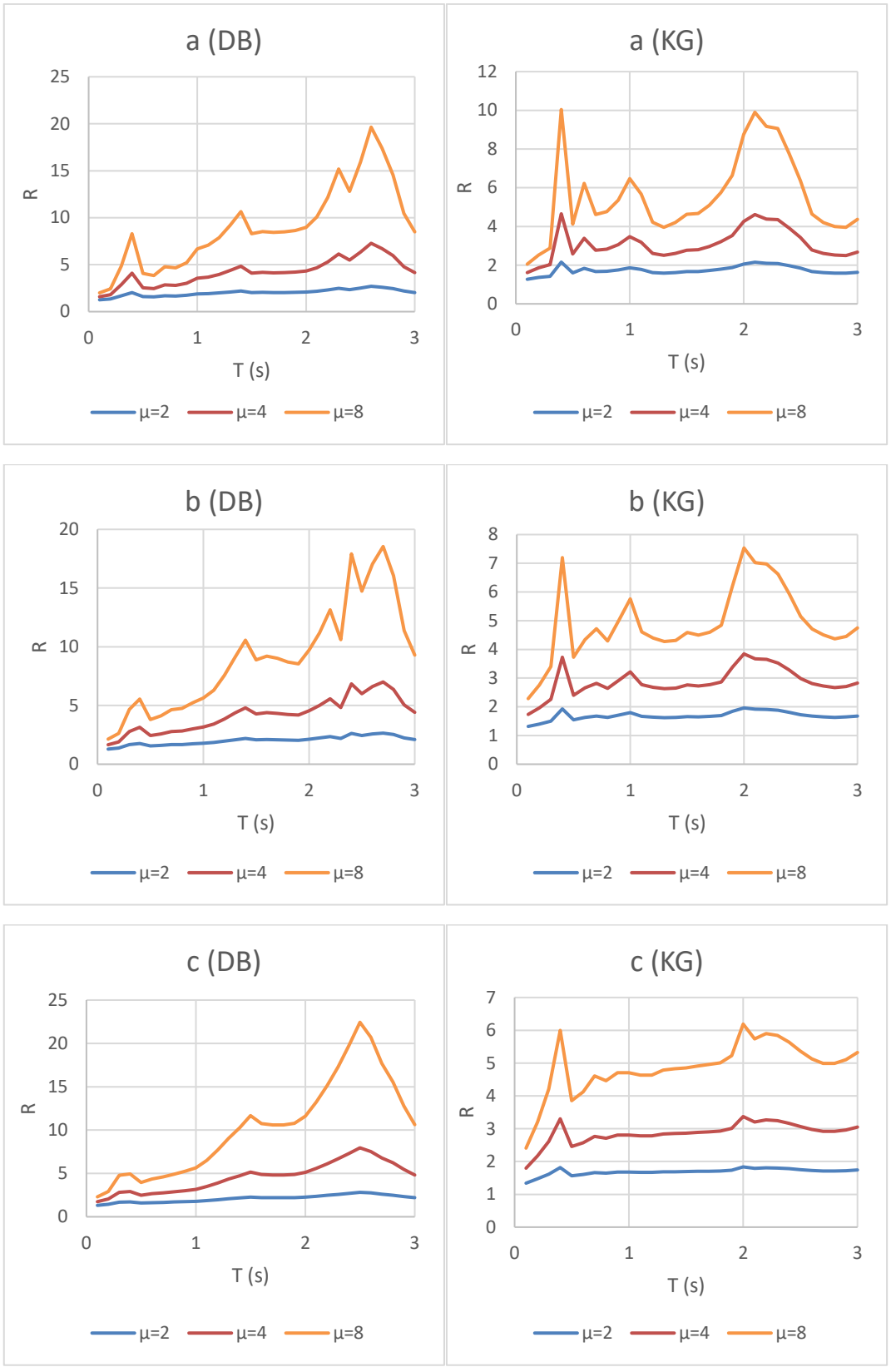
Şekil 115 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



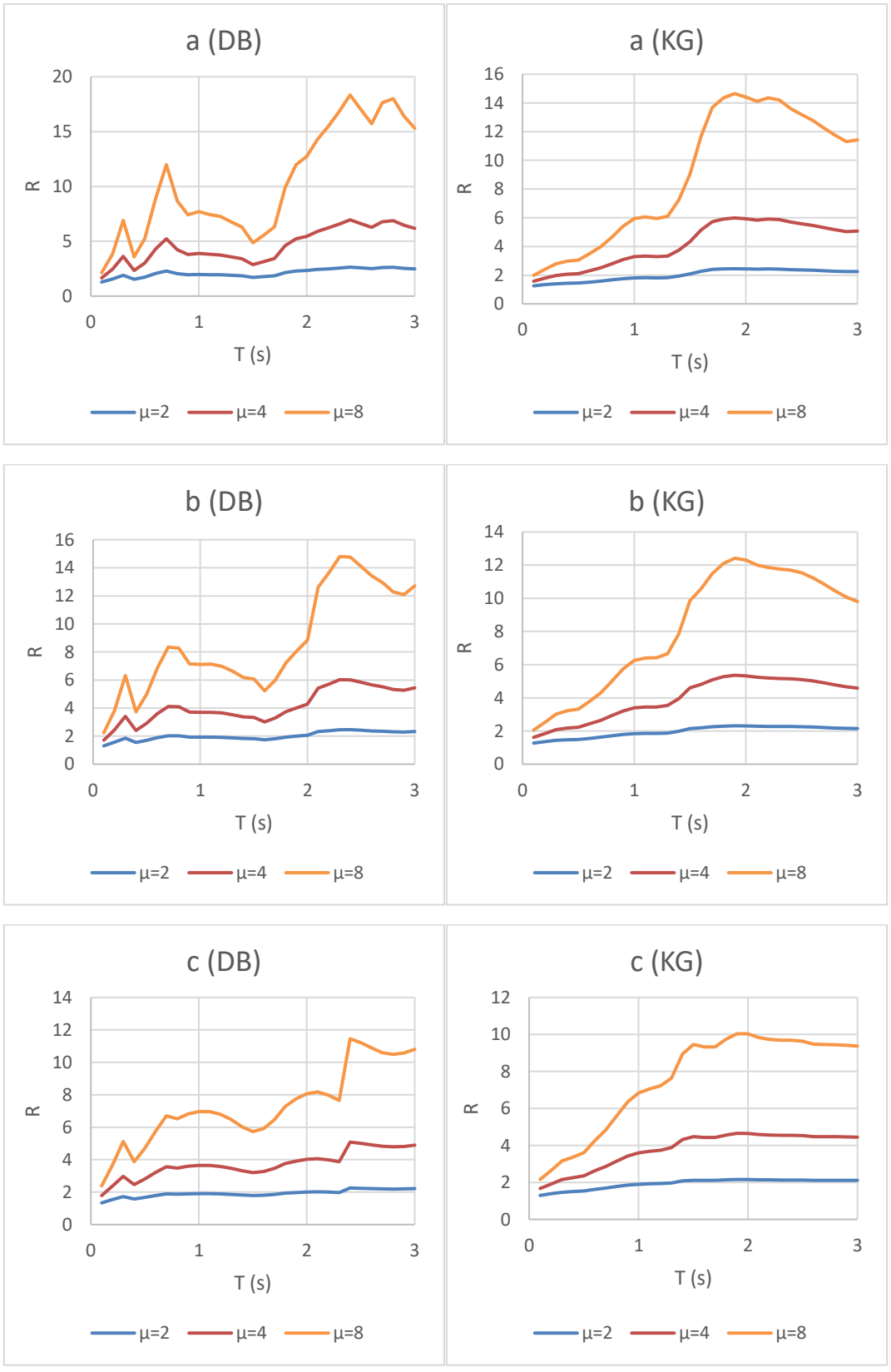
Şekil 116 Bursa depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



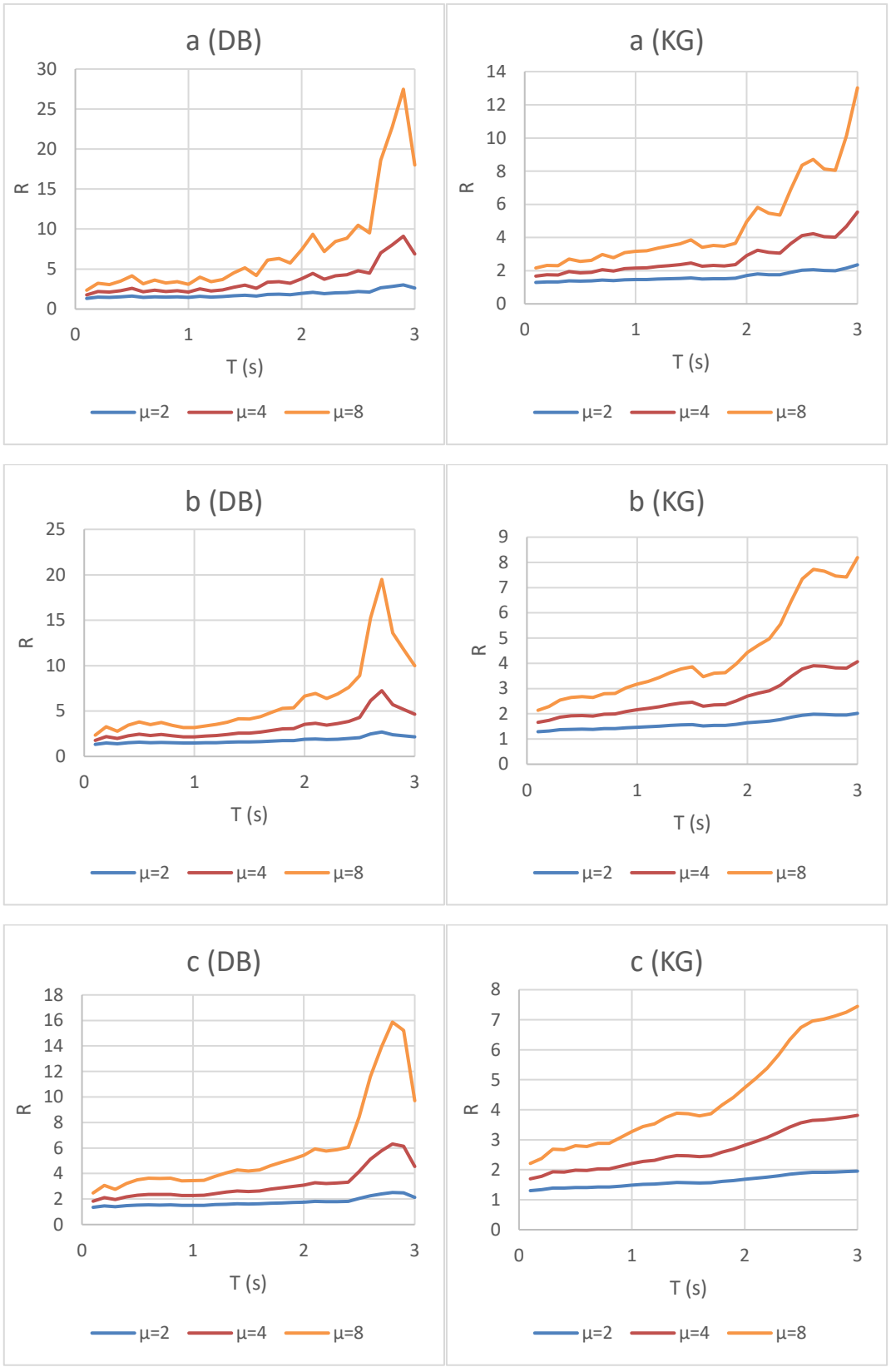
Şekil 117 Denizli depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



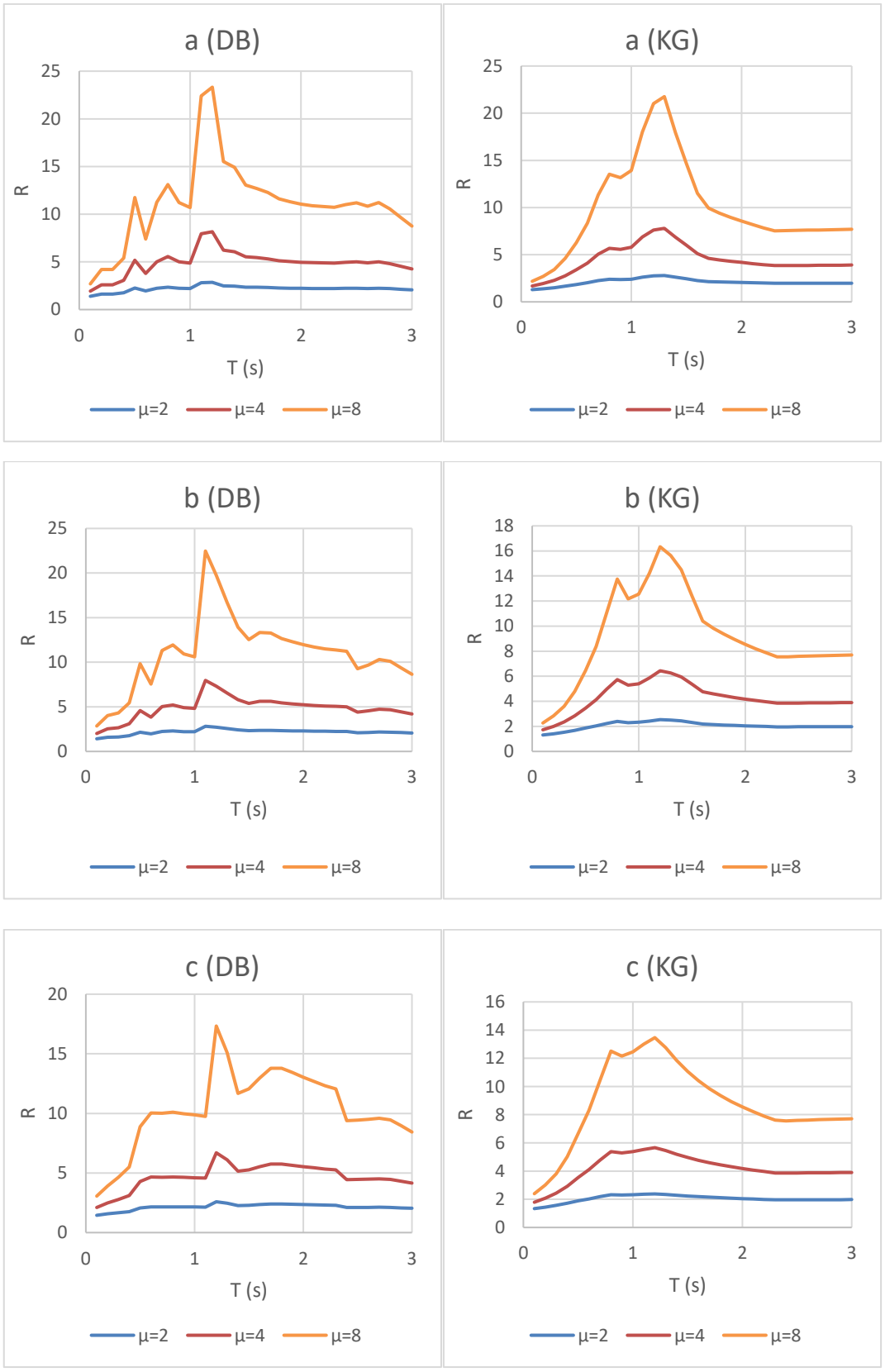
Şekil 118 Düzce depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



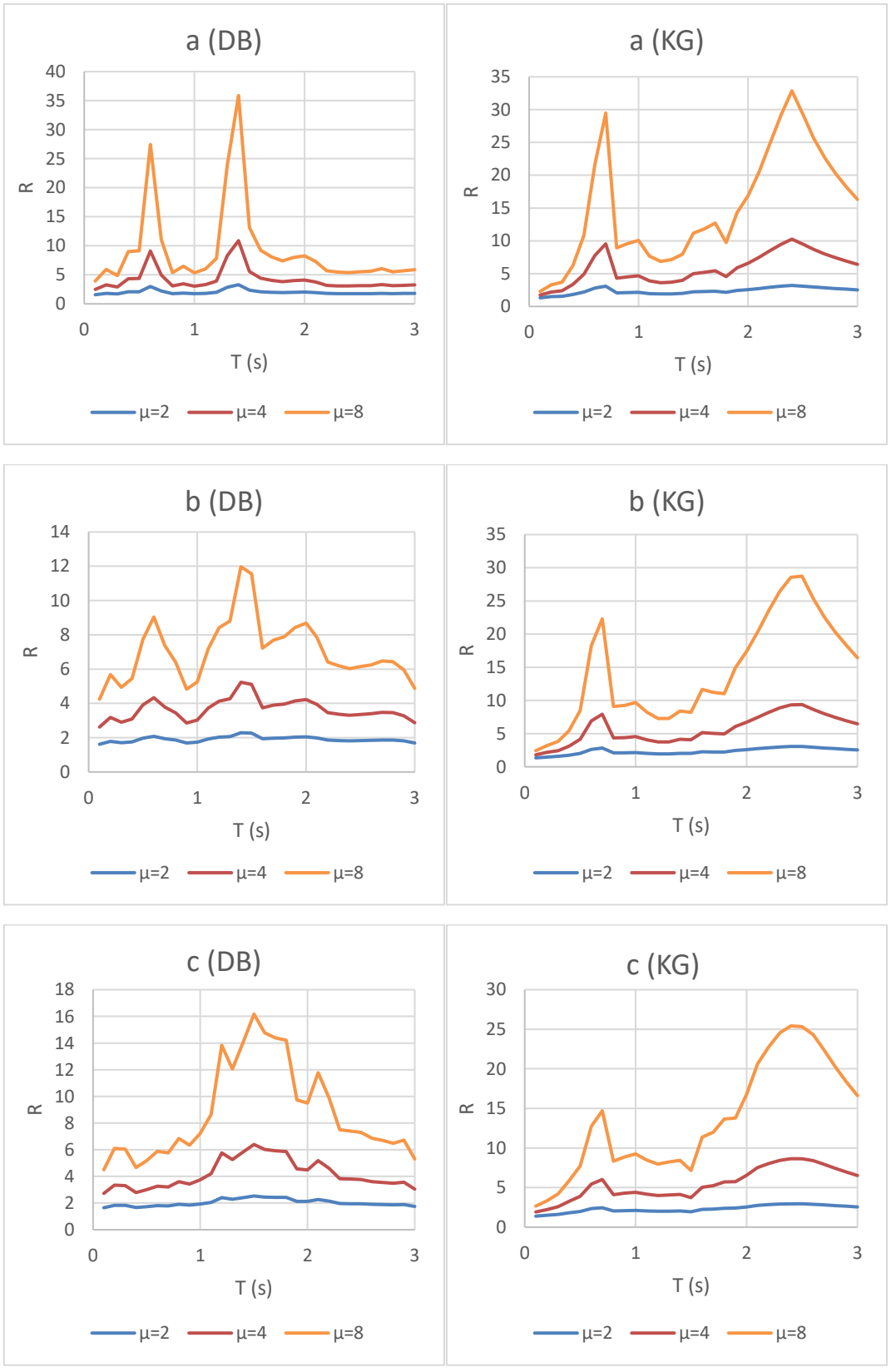
Şekil 119 Erzincan depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



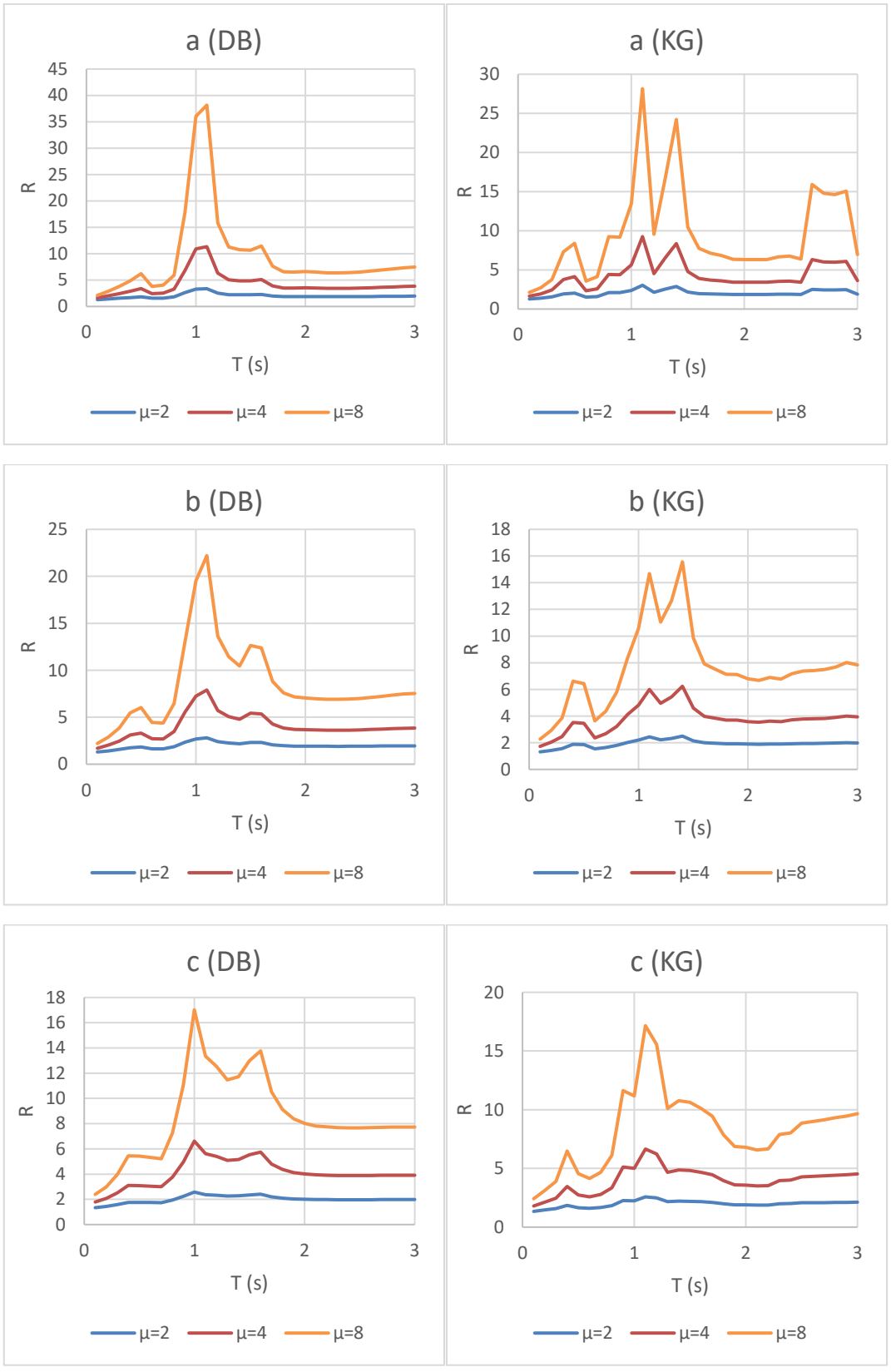
Şekil 120 Erzurum depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



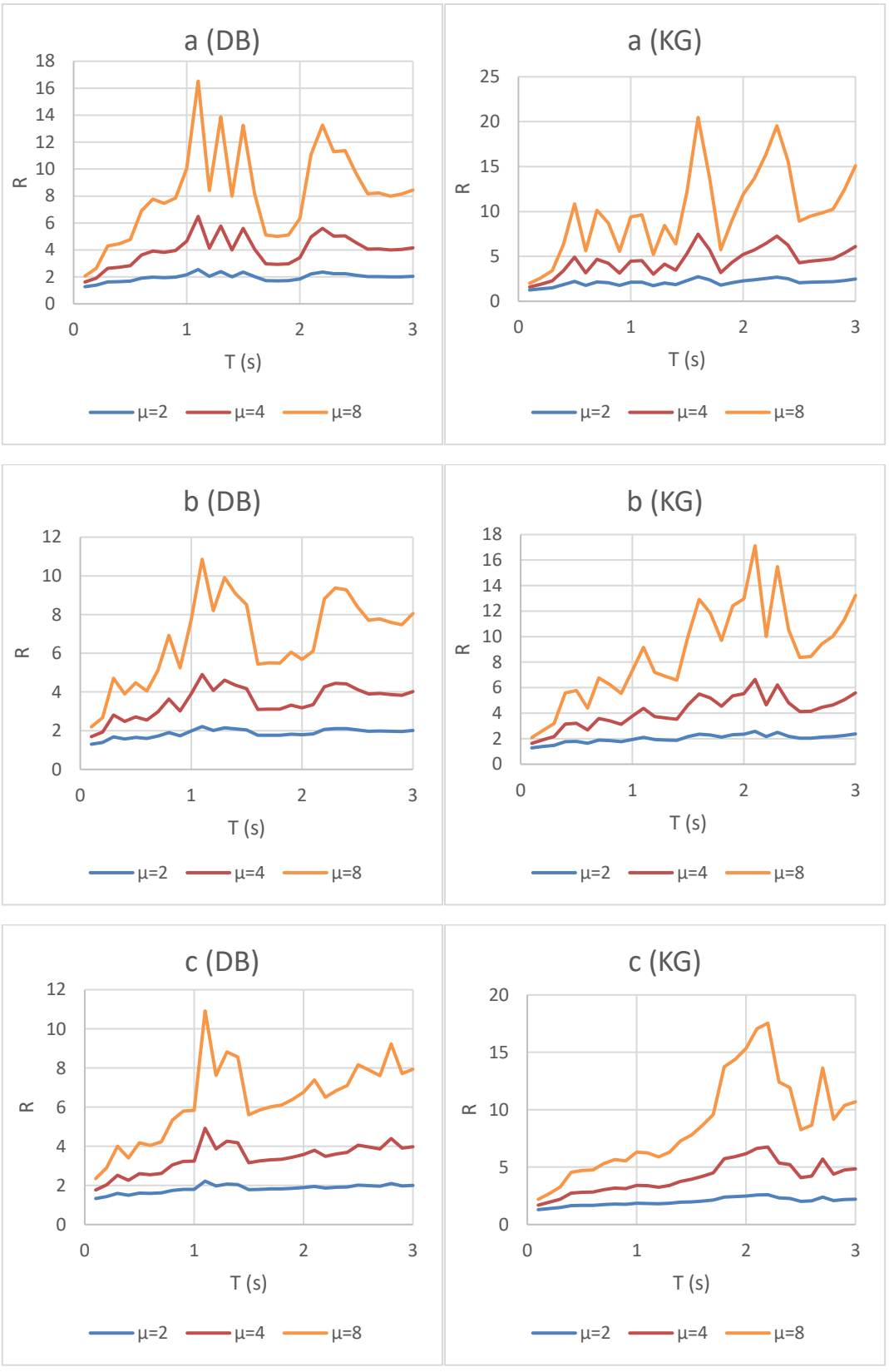
Şekil 121 Kütahya depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



Şekil 122 Manisa depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu

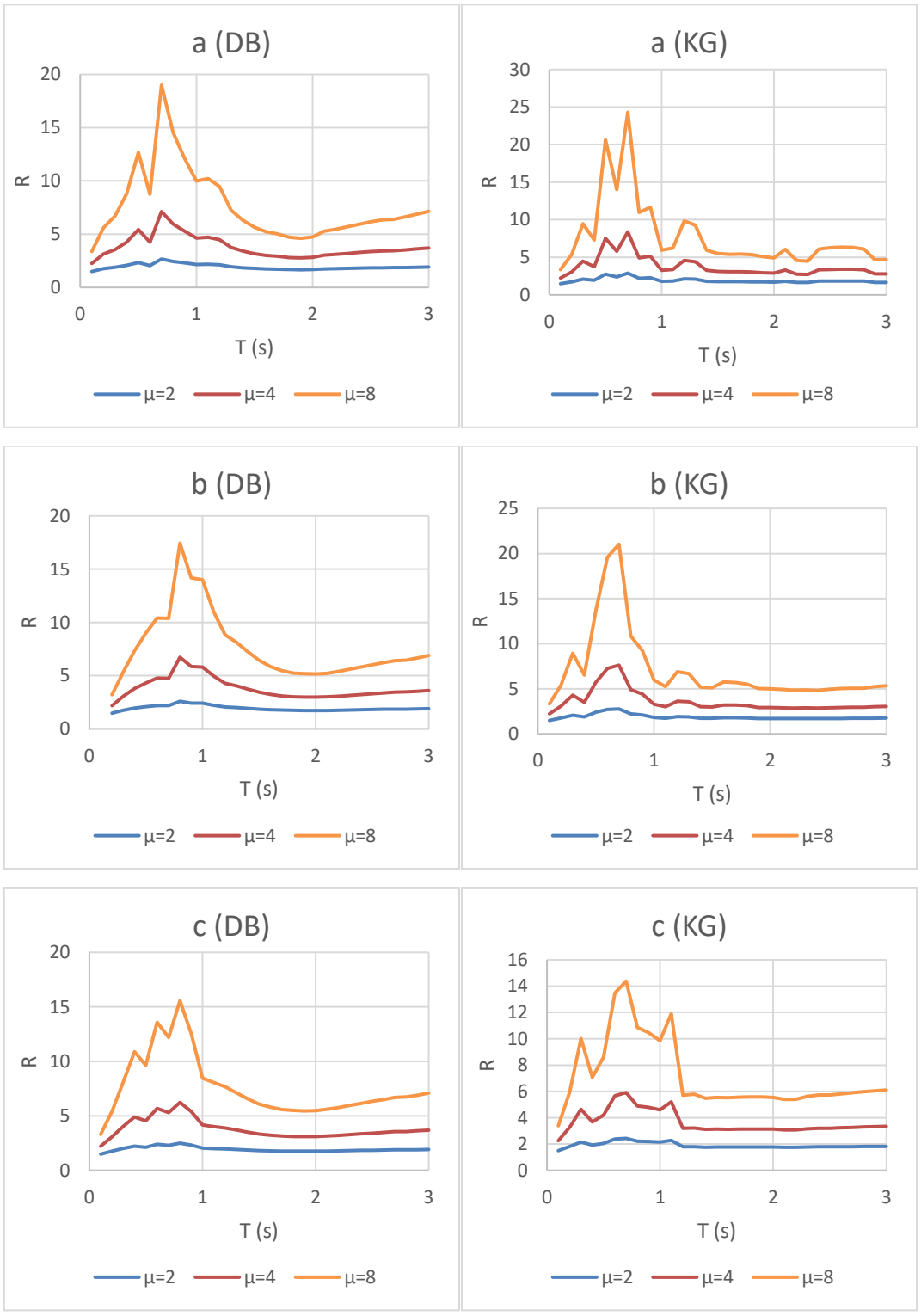


Şekil 123 Muğla depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu

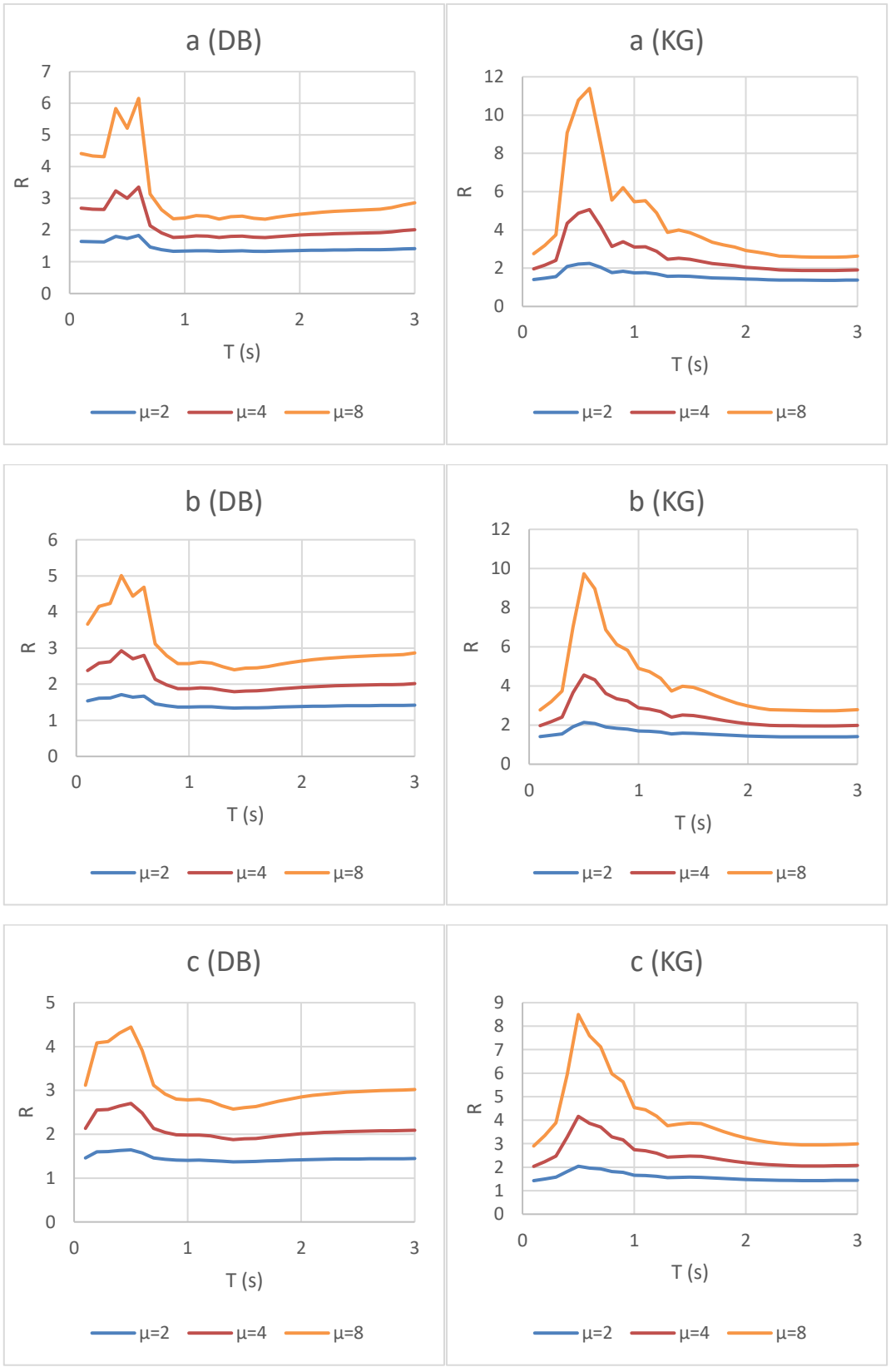


Şekil 124 Van depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu

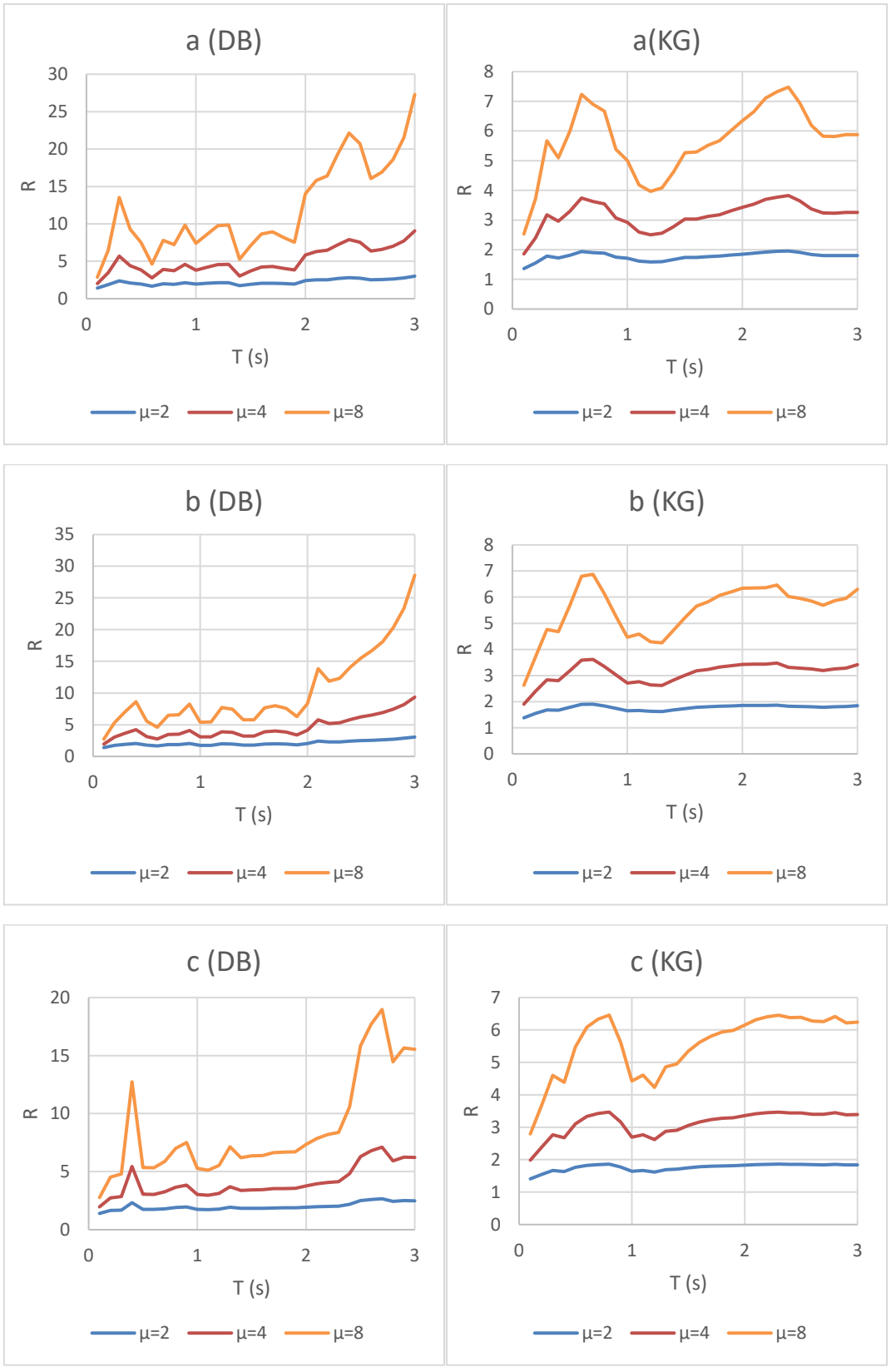
Ek2d: Sert zemin grubunun Rμ- μ-T davranış spektrumları



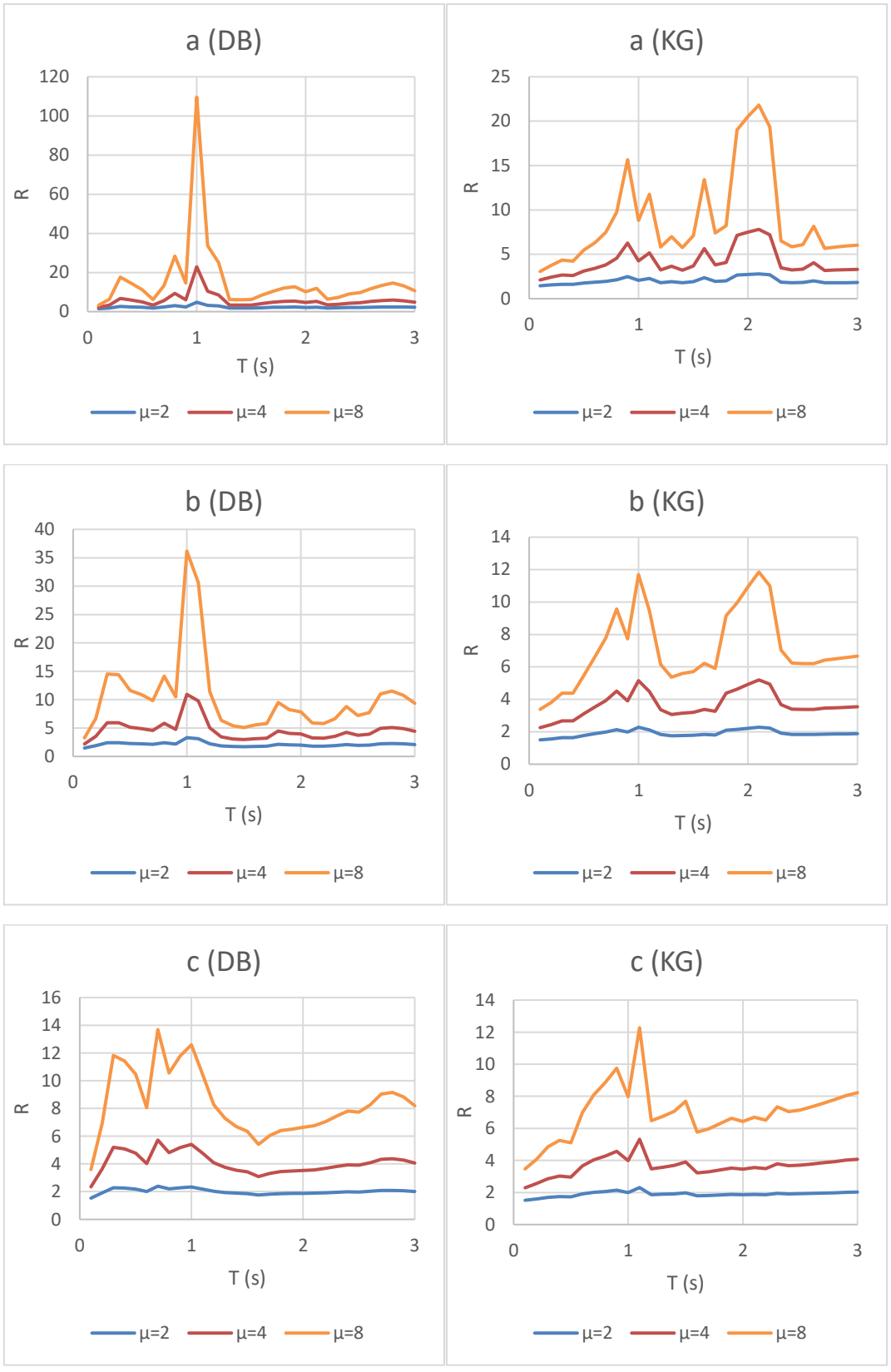
Şekil 125 Aydın depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



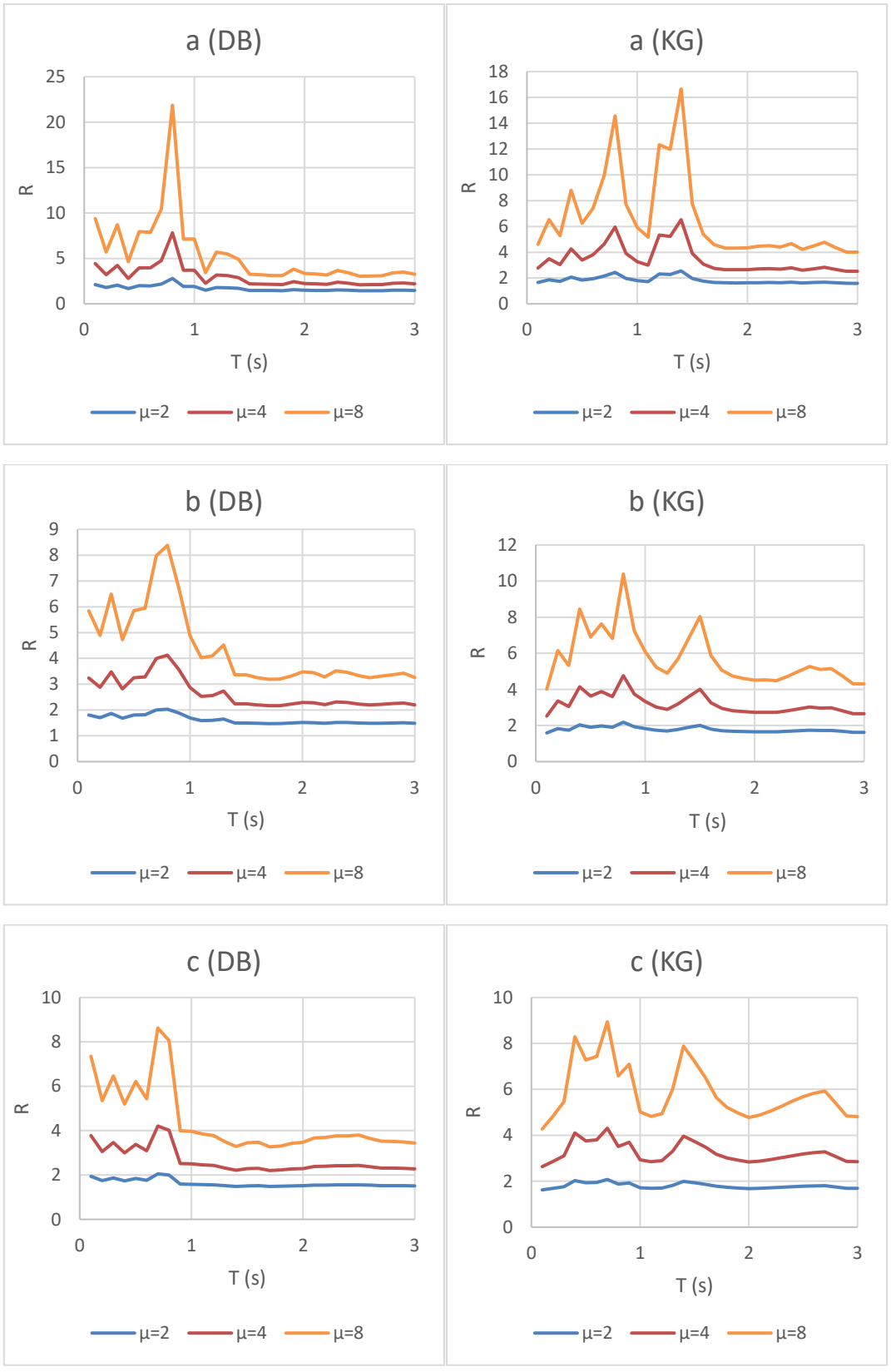
Şekil 126 Balıkesir depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



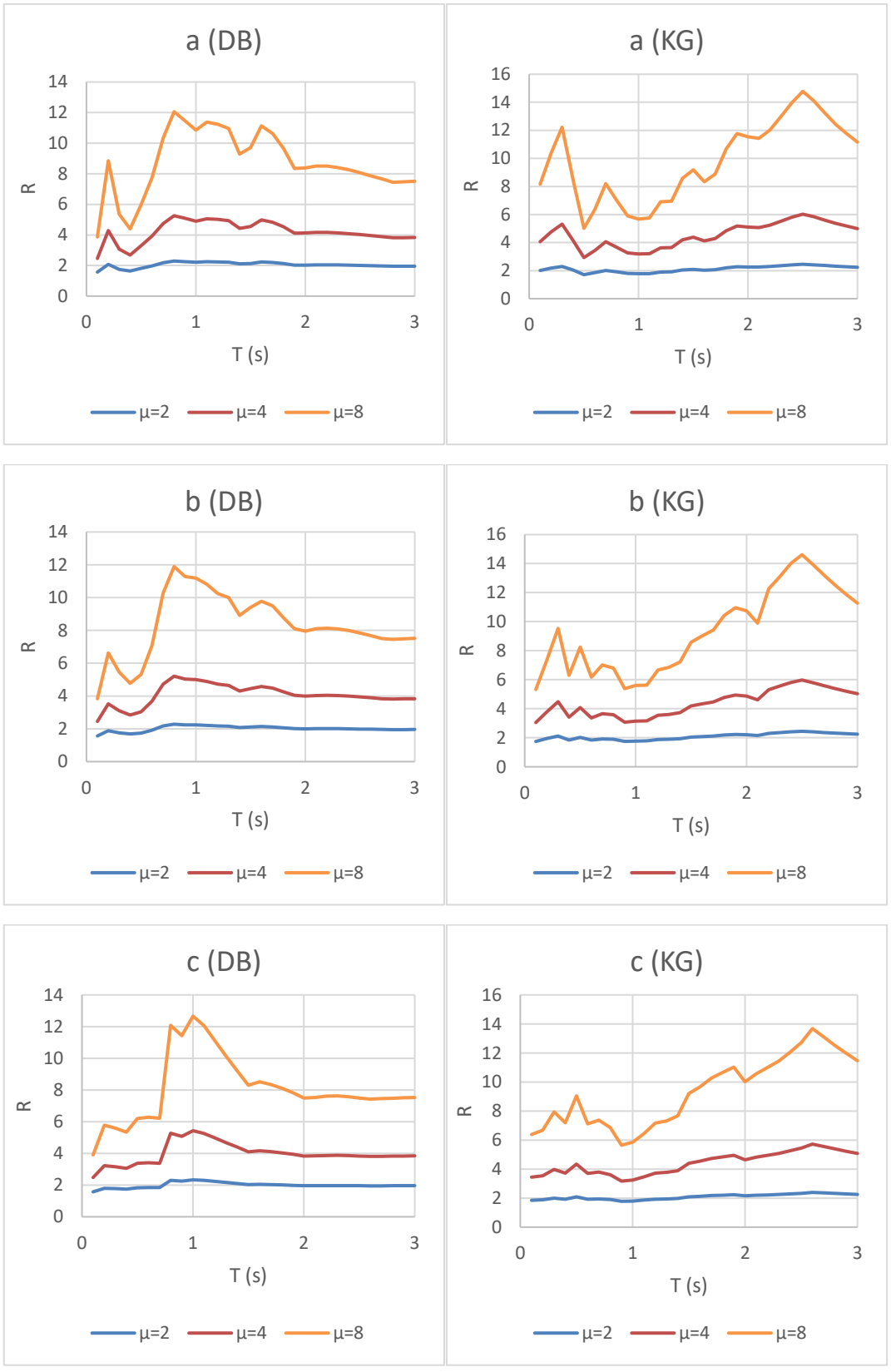
Şekil 127 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



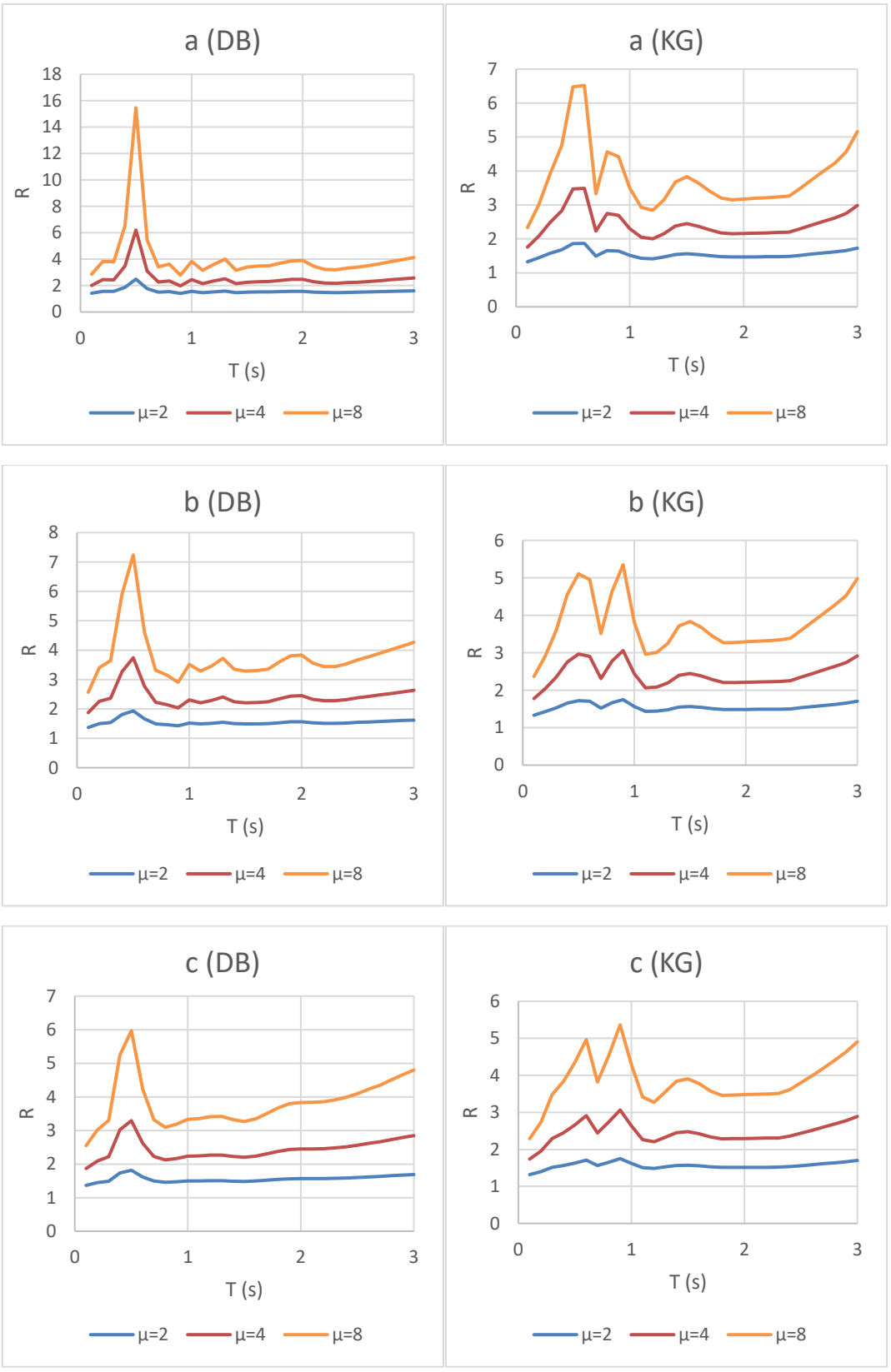
Şekil 128 Bingöl depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



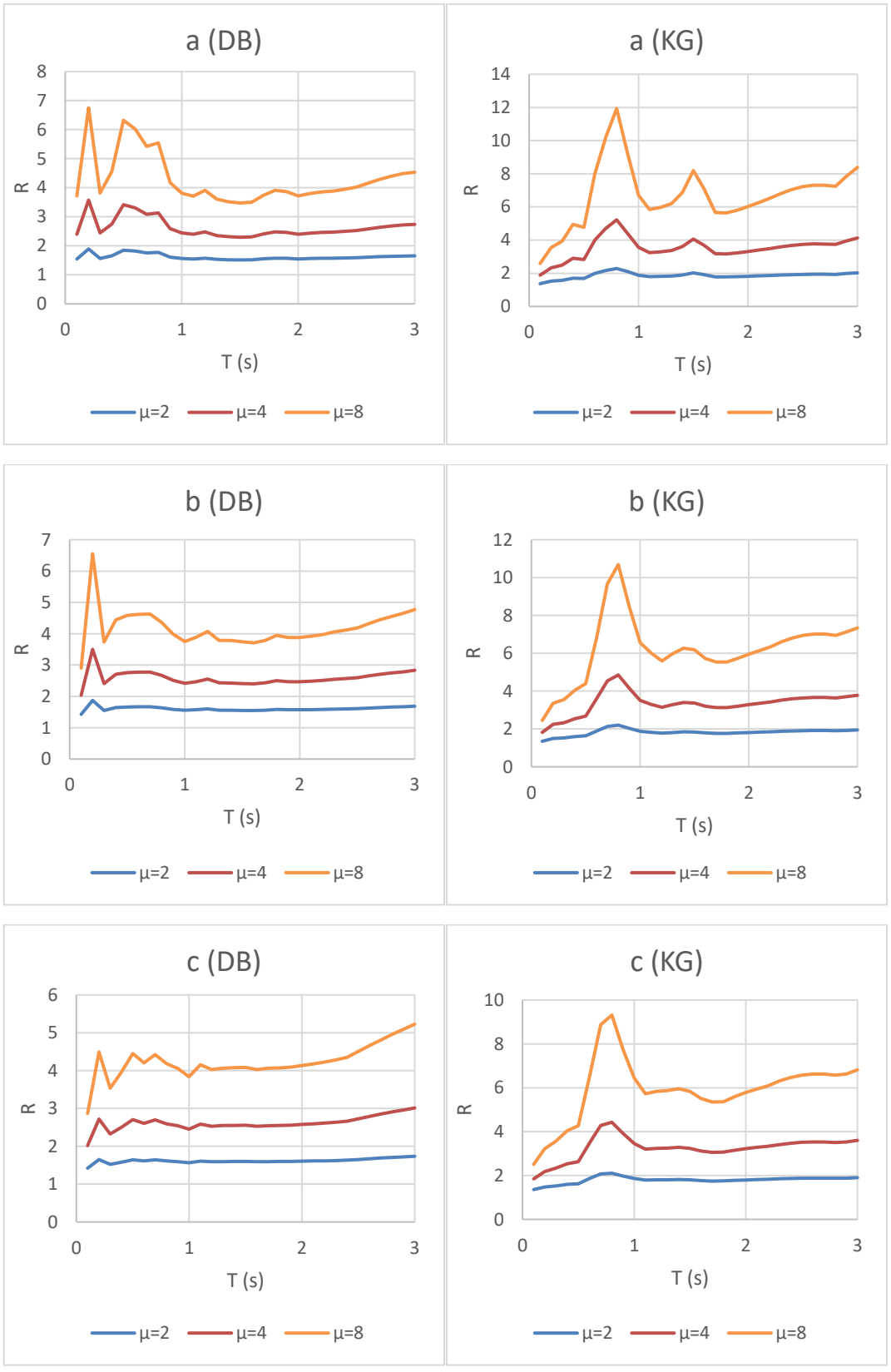
Şekil 129 Hatay depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



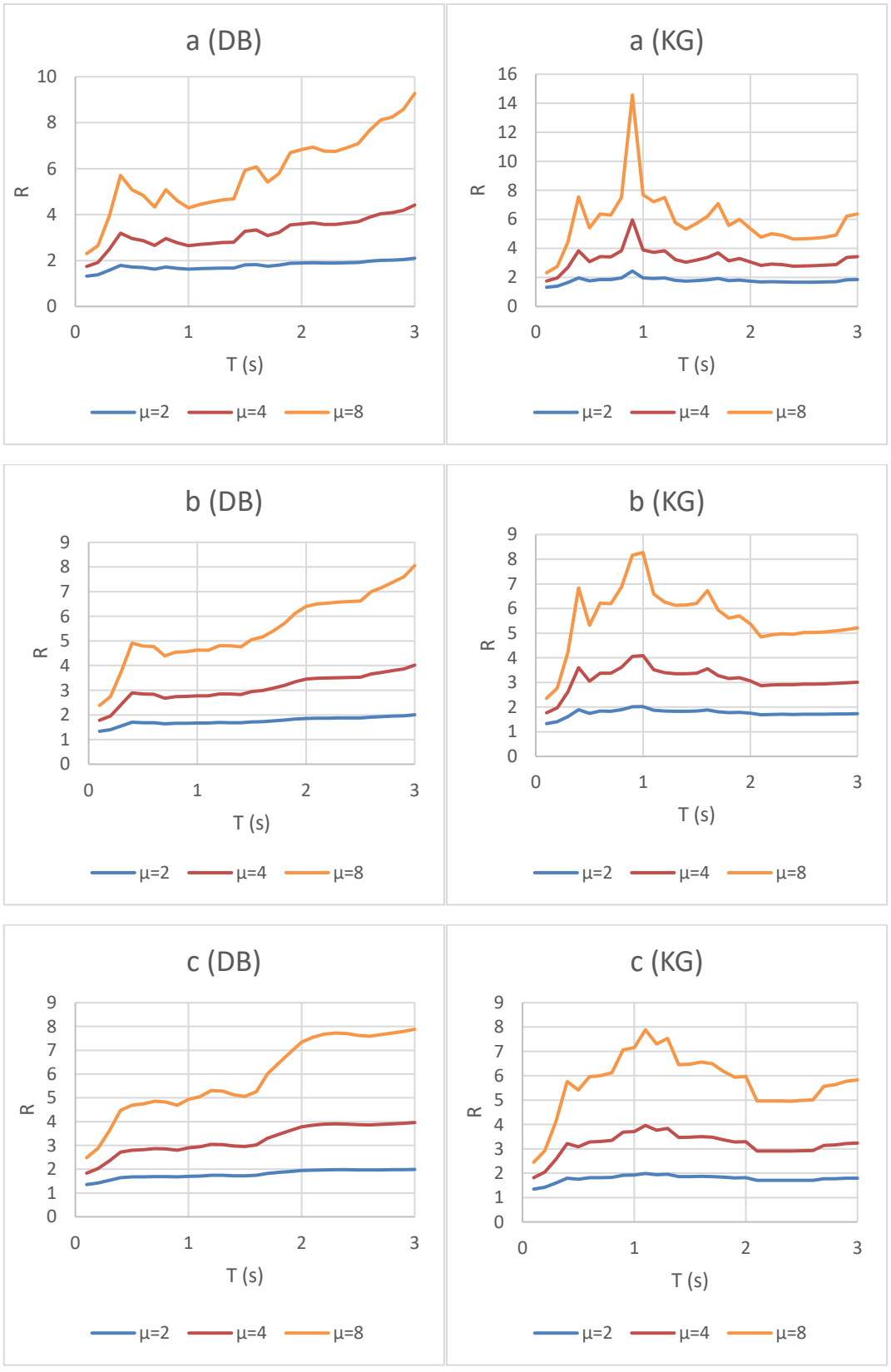
Şekil 130 Kahramanmaraş depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



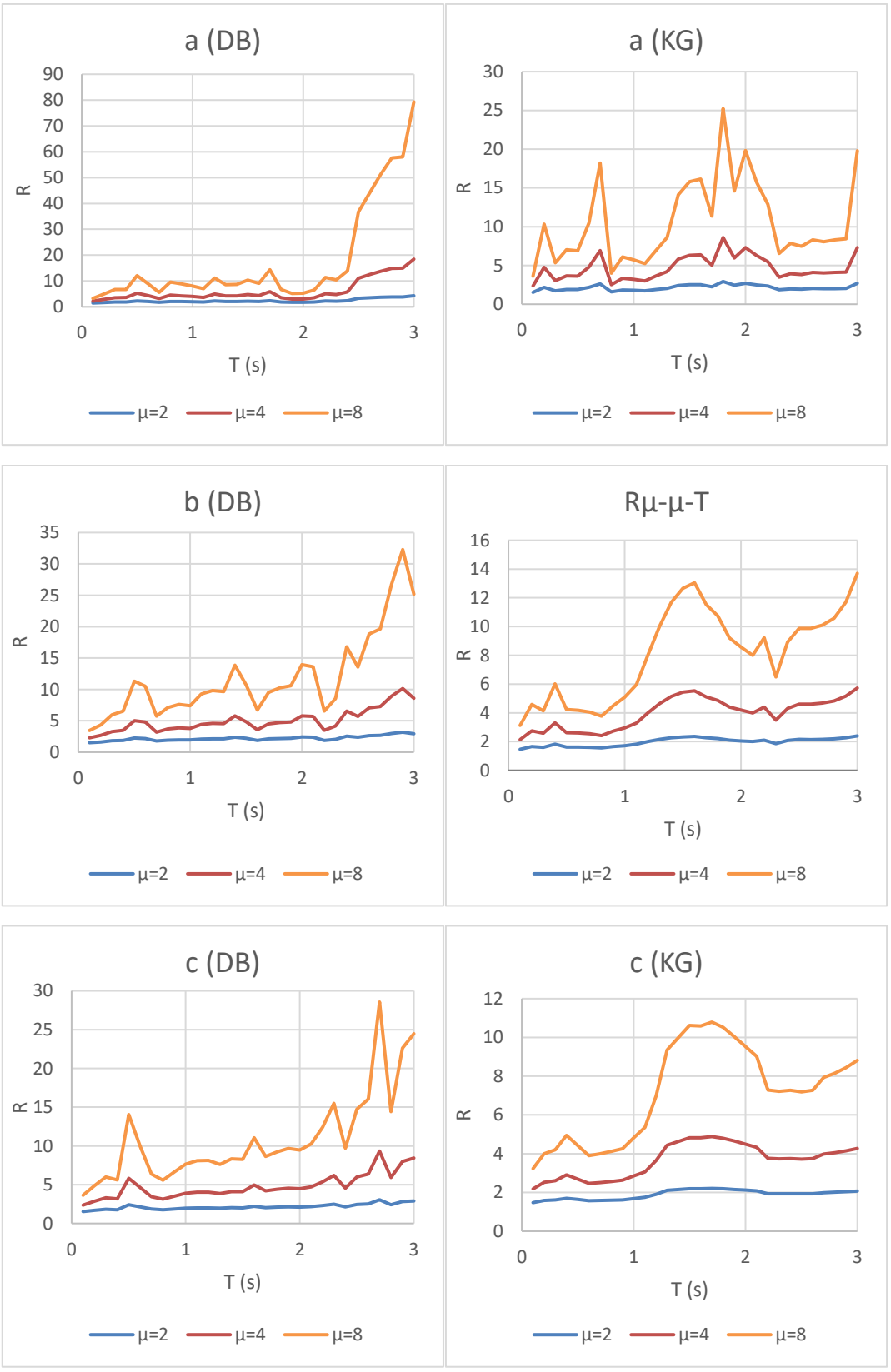
Şekil 131 Kacaeli depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



Şekil 132 Muğla depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



Şekil 133 Van depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, c=%10 için Rμ-μ-T spektrumu



Şekil 134 Hatay depreminin sönüm oranı a=%2, b=%5, %10 için Rμ-μ-T spektrumu

KAYNAKÇA

AFAD Yer Hareketi Veritabanı. (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı: https://deprem.afad.gov.tr/ adresinden alındı

Zhou, X., & Tamma, K. (2004). Design, Analysis, and Synthesis of Generalized Single Step Single Solve and Optimal Algorithms for Structural Dynamics. *Internatıonal Journal for Numerıcal Methods ın Engıneerıng*(59), 597–668.

Boore, D. M., & Akkar, S. (2003). Effect of Causal and Acausal Filters on Elastic and İnelastic Response Spectra. *Earthquake Engıneerıng and Structural Dynamıcs*, 1729-1748.

Celep, Z. (2014). *Yapı Dinamiği* (5. b.). İstanbul: Damga Dağıtım.

Celep, Z. (2017). *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı* (5. b.). İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.

Chopra, & A. K. (2015). *Yapı Dinamiği Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları* (4. b.). (H. Luş, Çev.) Ankara: Palme Yayıncılık.

Elnashai, A. S., & Sarno, L. D. (2015). *Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility* (2 b.). John Wiley & Sons.

Housner, G. W., & Jennings, P. C. (1982). Earthquake Design Criteria. *Earthquake Engineering Research Institute*, 19-41 ve 58-88.

İlki, A. (2000). Betonarme Elemanların Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı. *Doktora Tezi*. İstanbul: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kramer, S. (2003). *Geoteknik Deprem Mühendisliği* (Fersa matbacılık b.). (K. Kayabalı, Çev.) Ankara: Gazi kitabevi.

Lestuzzi, P., & Badoux, M. (2003). The γ Model : A Simple Hysteretic Model for Reinforced Concrete Walls. *Proceeding of the FIB2003 Symposium : Concrete Structures in Seismic Regions*, (s. 6-8). Greece.

Li-Li , X., Changhai, Z., Shuang, L., & Weiping, W. (2013a). The ductility-based strength reduction factor for the mainshock–aftershock sequence-type ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45:1-12.

Miranda, E. (1993). Site-dependent strength-reduction factors. *Journal of Structural Engineering, (ASCE)* , 357-379.

Miranda, E., & Bertero, V. V. (1994). Evaluation of Strength Reduction Factors. *Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute*, 357-379.

Nassar, A. A., & Krawinkler, H. (1991). *Seismic Demands for SDOF.* Report no.95,The John A. Blume Eartquake Engineering Center Report Stanford Universty.

Newmark , N. M., & Hall , W. J. (1982). Earthquake Spectra and Design. *Earthquake Engineering Research Institute*, 29-37.

Newmark, N. M. (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of The Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 67-94.

Pakyürek, E. K. (2006). 1994 Northrıdge Depreminde Hasar Görmüş Van Nuys Binasının Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi. Ankara.

Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings.* New York: John Wiley & Sons.

Paz, M., & Kim, Y. H. (2019). *Structural Dynamics Theory and Computation* (6. b.). Springer International Publishing. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-94743-3

Saiidi, M. (1982). Hysteresis Models for Reinforced Concrete. *Journal of The Structural Division American Society of Civil Engineers*, 1077-1087.

Saiidi, M., & Sozen, M. A. (1979). Simple and Complex Models for Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structures. *Structural Research Series*. University of Illinois.

Seed, B. H., & Idriss, I. M. (1982). *Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes.* Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute.

Sucuoğlu, H., & Akkar, S. (2014). *Basic Earthquake Engineering From Seismology to Analysis and Design.* Switzerland: Springer International Publishing.

Uçar, T. (2018). Ductility Reduction Factors of Inelastic SDOF Systems Subjected to Scaled and Spectrum-Matched Ground Motions. *3. International Conference on Civil Environmental Engineering*, (s. 407-417). İzmir.

Uçar, T., & Merter, O. (2012). Binaların Deprem Hesabında Kullanılan Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri İlgili Bir İrdeleme. *Ordu Üniversitesi Bilgi Teknik dergisi*, 15-31.

Uzsoy, Ş. Z. (2006). *Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliği Çözülmüş Örnek Problemler.* İstanbul: Birsen Yayınevi.

Veletsos, A. S., & Newmark, N. M. (1960). Effect of İnelastic Behavior on The Response of Simple Systems to Earthquake Motions. *Proceedings of The 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, (s. 895-912). Tokyo,Japan.

Yerlici, V., & Luş, H. (2014). *Yapı Dinamiğine Giriş* (2. b.). İstanbul: Boğaiçi Üniversitesi Yayınevi.

Zhai, C., & Xie, L. (2005). Constant-Ductility Strength Demand Spectra for Seismic Design of Structures. *Eartquake Engineering and Engineering Vibration*, 243-250.