

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YARI RİJİT BAĞLI KOMPOZİT KESİTLİ YAPI SİSTEMLERİNİN DEPREM  
DAVRANIŞININ STOKASTİK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Özlem ÇAVDAR**

**MART 2009**  
**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YARI RİJİT BAĞLI KOMPOZİT KESİTLİ YAPI SİSTEMLERİNİN DEPREM  
DAVRANIŞININ STOKASTİK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
BELİRLENMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Özlem ÇAVDAR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Doktor (İnşaat Mühendisliği)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.02.2009**

**Tezin Savunma Tarihi : 09.03.2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ**

**Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Yusuf CALAYIR**

**Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2009**

## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak hazırladığım “Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Yapı Sistemlerinin Deprem Davranışının Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi” adlı bu çalışmayı bana önererek yöneticiliğimi üstlenen, fikirleriyle bana yol gösteren saygıdeğer Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a minnet ve şükranlarımı sunmayı öncelikli bir borç bilirim.

Yoğun çalışmalarını sırasında değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren Hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ’e, Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN’a, Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN’e ve Prof. Dr. Yusuf CALAYIR’a çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR, Arş. Gör. Hasan Basri BAŞAĞA, Arş. Gör. M. Emre KARTAL ve ismini burada saymadığım diğer bütün Yapı Statiği kürsüsü ekibine teşekkür ederim.

Yaşamımın birçok anında bana manevi desteğinden dolayı ablam Yrd. Doç. Dr. Nuran DURMUŞ’u burada anmaktan onur duyarım.

Bu çalışmamı, hayatımın her anında olduğu gibi yoğun çalışmalarım sırasında da desteğini benden esirgemeyen eşim Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇAVDAR’a, çalışmalarım nedeniyle çoğu zaman kendisine vakit ayıramadığım biricik kızım Betül’e ve her türlü zorluklara göğüs gererek ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak bu günlere gelmemi sağlayan anneme ve babama ithaf ediyorum.

Bu çalışmanın ülkemiz için faydalı olmasını temenni ederim.

1. Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A. ve Adanur, S., 2008. Perturbation Based Stochastic Finite Element Analysis of the Structural Systems with Composite Sections under Earthquake Forces, *Steel and Composite Structures*, 8, 2, 129-144.
2. Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A. ve Adanur, S., Stochastic Finite Element Analysis of a Cable-Stayed Bridge System with Varying Material Properties, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2008, under review.
3. Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A., Adanur, S. ve Başağa, H.B., Stochastic Finite Element Analysis of Long-Span Cable-Supported Bridges Using CFRP Cables under Ground Motion, *Engineering Structures*, 2008, under review.
4. Çavdar, Ö., Bayraktar, A. ve Çavdar, A., Effects of Random Material and Geometrical Properties on Structural Safety of Steel-Concrete Composite Systems, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2008, under review.
5. Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A., ve Altunışık, A.C., Stochastic Seismic Analysis of Kömürhan Highway Bridge by Stochastic Finite Element Method, *Journal of Bridge Engineering*, 2008, under review.
6. Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Çavdar, A., Adanur, S. ve Başağa, H.B., Stochastic Dynamic Analysis of Steel-Concrete Composite Frames with PR Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, under review.
7. Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Başağa, H.B., ve Çavdar, A., Uzay Kafes Çelik Sistemlerin Stokastik Sonlu Eleman Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs 2007 – Eskişehir.
8. Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Başağa, H.B., ve Çavdar, A., Stokastik Sonlu Eleman Yöntemiyle Üç Boyutlu Çerçeve Sistemlerin Deprem Analizi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16 - 20 Ekim 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi- İstanbul.
9. Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Çavdar, A., ve Soyuluk, K., Deprem Etkisindeki Kablo Kötürülerin Stokastik Sonlu Eleman Analizi, 22-24 October 2007 International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
10. Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Çavdar, A., Başağa, H.B., Stochastic Finite Element Analysis of Concentrically Braced Frames to Earthquake Forces International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, October 24-26 2007, Süleyman Demirel University, Isparta-Anatly.

Özlem ÇAVDAR  
Trabzon 2009

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin Stokastik Analizi ile İlgili Çalışmalar.....	2
1.3. Kompozit Kesitli Yapı Sistemlerinin Analizi ile İlgili Çalışmalar.....	10
1.4. Yarı Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin Analizi ile İlgili Çalışmalar.....	15
1.5. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Sistemlerin Analizi ile İlgili Çalışmalar.....	19
1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	21
1.7. Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi (SFEM) Formülasyonu.....	22
1.7.1. Yapılardaki Belirsizliklerin Kaynakları.....	23
1.7.2. Rastgele Değişken.....	23
1.7.3. Olasılıklı Yoğunluk Fonksiyonu (PDF).....	24
1.7.4. Normal Dağılım .....	25
1.7.5. Rastgele Değişkenin Ortalama Değeri .....	26
1.7.6. Perturbasyon Esaslı Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi (PSFEM) Formülasyonu.....	27
1.8. Monte Carlo Simülasyon (MCS) Yöntemi Formülasyonu.....	31
1.8.1. Rastgele Değişkenlerin Türetilmesi.....	33
1.8.2. Üniform Olmayan Dağılımlardan Rastgele Sayıların Türetilmesi.....	33
1.9. Üç Boyutlu Kompozit Kesitli Sistemlerin Rijitlik Matrisi	34
1.10. Üç Boyutlu Yarı Rijit Bağlı Sistemlerin Rijitlik Matrisi	38

1.11.	Üç Boyutlu Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Sistemlerin Rijitlik Matrisi .....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	43
2.1.	Geliştirilen Bilgisayar Programı (SFEDYNCPR).....	43
2.2.	Geliştirilen Bilgisayar Programının Kontrol Edilmesi .....	48
2.2.1.	Üç Boyutlu Çerçeve Analizi.....	48
2.2.1.1.	Seçilen Yer Hareketinin Özellikleri.....	49
2.2.1.2.	Değişim Katsayısının (COV) Belirlenmesi.....	50
2.2.1.3.	Frekanslar.....	51
2.2.1.4.	Yerdeğiştirmeler.....	52
2.2.1.5.	Kesit Tesirleri.....	53
2.2.2.	Köprü Analizi.....	56
2.2.2.1.	Frekanslar.....	57
2.2.2.2.	Yerdeğiştirmeler.....	57
2.2.2.3.	Kesit Tesirleri.....	58
2.3.	Stokastik Dinamik Analizlerde Kullanılan Modeller.....	60
2.3.1.	Kompozit Kesitli Çerçeve Sistem Modeli.....	60
2.3.2.	Kompozit Kesitli Köprü Sistem Modeli.....	62
2.3.3.	Yarı Rijit Bağlı Çerçeve Sistem Modeli.....	64
2.3.4.	Yarı Rijit Bağlı Köprü Sistem Modeli.....	65
2.3.5.	Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Çerçeve Sistem Modeli.....	66
2.3.6.	Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Köprü Sistem Modeli.....	68
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	70
3.1.	Kompozit Kesitlerden Oluşan Sistemlerin İncelenmesi.....	70
3.1.1.	Kompozit Kesitli Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	70
3.1.1.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	70
3.1.1.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	71
3.1.1.1.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	72
3.1.1.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	73
3.1.1.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	75
3.1.1.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	76
3.1.1.2.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	76

3.1.1.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	77
3.1.1.3.	Kütle Yoğunluğunun Rastgele Değişken Olması Durumu.....	80
3.1.1.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	80
3.1.1.3.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	81
3.1.1.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	82
3.1.2.	Kompozit Kesitli Köprü Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	85
3.1.2.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	85
3.1.2.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	86
3.1.2.1.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	87
3.1.2.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	88
3.1.2.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	90
3.1.2.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	91
3.1.2.2.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	91
3.1.2.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	92
3.1.2.3.	Kütle Yoğunluğunun Rastgele Değişken Olması Durumu.....	95
3.1.2.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	95
3.1.2.3.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	96
3.1.2.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	97
3.2.	Yarı Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin İncelenmesi.....	100
3.2.1.	Yarı Rijit Bağlı Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	100
3.2.1.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	100
3.2.1.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	101
3.2.1.1.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	102
3.2.1.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	104
3.2.1.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	107
3.2.1.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	108
3.2.1.2.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	109
3.2.1.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	110
3.2.1.3.	Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu.....	114
3.2.1.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	115
3.2.1.3.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	116

3.2.1.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	117
3.2.2.	Yarı Rijit Bağlı Köprü Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	121
3.2.2.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	121
3.2.2.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	121
3.2.2.1.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	122
3.2.2.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	124
3.2.2.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	128
3.2.2.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	128
3.2.2.2.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	129
3.2.2.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	131
3.2.2.3.	Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu.....	134
3.2.2.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	135
3.2.2.3.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	136
3.2.2.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	137
3.3.	Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Yapı Sistemlerinin İncelenmesi.....	141
3.3.1.	Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	141
3.3.1.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	141
3.3.1.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	141
3.3.1.1.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	142
3.3.1.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	144
3.3.1.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	147
3.3.1.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	147
3.3.1.2.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	147
3.3.1.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	149
3.3.1.3.	Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu.....	152
3.3.1.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	152
3.3.1.3.2.	Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	153
3.3.1.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	154
3.3.2.	Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Köprü Sisteminin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi.....	157
3.3.2.1.	Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu.....	158
3.3.2.1.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	158

3.3.2.1.2.	Yerdeşiftirmelerin Karşılaştırılması.....	159
3.3.2.1.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	160
3.3.2.2.	Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu.....	163
3.3.2.2.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	163
3.3.2.2.2.	Yerdeğiftirmelerin Karşılaştırılması.....	164
3.3.2.2.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	165
3.3.2.3.	Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu.....	168
3.3.2.3.1.	Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması.....	168
3.3.2.3.2.	Yerdeğiftirmelerin Karşılaştırılması.....	168
3.3.2.3.3.	Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması.....	170
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	173
5.	KAYNAKLAR.....	178
ÖZGEÇMİŞ		



## ÖZET

Yapısal çözümlerlerde kullanılan mühendislik yöntemlerinin çoğu, yapının geometri ve malzeme özellikleri ile yükleme durumlarını deterministik kabul ederek çözüm yapmaktadır. Oysaki yapısal sistemlerde birçok belirsizlik durumu söz konusu olmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmanın temel amacı, kompozit kesitlerden oluşan, yarı rijit bağlı yapı sistemlerinin deprem davranışının stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle (SFEM) belirlenmesidir. Bu amaca yönelik olarak, çelik veya kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin, geleneksel veya yarı rijit bağlantılara sahip olma durumu da göz önünde bulundurularak belirsiz malzeme, geometri ve başlangıç rijitliği özellikleriyle stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamdaki doktora tezi dört ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde konunun kavranmasına yardımcı olabilecek genel bilgilere yer verilmiş olup, ayrıca konuya esas teşkil eden formülasyonlar ve daha önce yapılmış çalışmalar da yer almaktadır. İkinci bölümde ise geliştirilen bilgisayar programı tanıtılmakta ve mevcut programın kontrolü için örnek modellerin deterministik ve stokastik analizleri gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında incelenecek modellere ve bunların boyut ve kesit özelliklerine de ayrıca bu bölümde yer verilmektedir. Üçüncü bölümde ise ikinci bölümde özellikleri verilen deprem etkisindeki çelik veya kompozit kesitlerden oluşan, geleneksel veya yarı rijit bağlı yapı sistemlerinin rastgele değişen malzeme, geometri ve başlangıç rijitliği özellikleri için perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar özetlenmekte ve ileriki çalışmalar için önerilere yer verilmektedir.

Çalışmadan kompozit kesitli ve yarı rijit bağlı yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizinde belirsiz malzeme, geometri ve bağlantı rijitliği özelliklerinin dikkate alınmasının gerekliliği ve PSFEM'in yapıların stokastik analizinde çok yönlü olarak kullanılabilen pratik bir yöntem olduğu açıkça görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Simülasyon Yöntemi, Kompozit Kesitli Sistemler, Yarı Rijit Bağlı Sistemler.

## SUMMARY

### **The Determination of Seismic Behavior of the Structural Systems Connected Semi Rigidly and Constituted of Composite Sections with Stochastic Finite Element Method**

The most of engineering methods that are being used during structural analysis are realized by assuming that geometric, material characteristics and load conditions of a structure are deterministic. However, there are many uncertainties on the structural systems. Therefore, the main objective of the study is that the determination of seismic behavior of the systems connected semi rigidly and constituted composite sections with Stochastic Finite Element Method (SFEM). For that reason, the stochastic dynamic analysis of the structural systems made of steel or composite sections with fully or partially restraint connections are performed by assuming material, geometric and initial stiffness properties are random. This thesis includes four main chapters according to this scope.

In the first chapter, general information helping to understand the subject, in addition, main formulations about this subject and literature review are given place. In the second chapter, the developed computer program is introduced and deterministic and stochastic analyses of the system models are analyzed because of controlling of this program. The models examined during the study and their sizes and sectional properties are also presented in this section. In the third chapter, the stochastic dynamic analyses of the systems connected fully or semi rigidly and constituted of steel or composite sections are realized with perturbation based stochastic finite element method (PSFEM) and Monte Carlo simulation (MCS) method under the seismic effects. The material, geometric and initial stiffness properties of these systems which properties are given in the second chapter are assumed to be random. The frequencies, displacements and sectional forces obtained from analyzes are investigated comparatively. In the last chapter of the study, the conclusions obtained are summarized and the suggestions for further studies are given.

It is seen obviously from the study that taking into consideration of random material, geometric and stiffness properties is necessary during stochastic dynamic analysis of the systems connected semi rigidly and constituted of composite sections and PSFEM is a versatile and practical method that can be used in stochastic analysis of the structures.

**Key Words:** Stochastic Finite Element Method, Monte Carlo Simulation Method, the Systems with Composite Sections, the Systems Connected Semi Rigidly.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kompozit kolon, kiriş ve sistem örnekleri.....	12
Şekil 2. Rijit düğüm noktası.....	16
Şekil 3. Mafsallı düğüm noktası.....	17
Şekil 4. Kiriş-kolon bağlantıları.....	19
Şekil 5. Olasılıklı yoğunluk fonksiyonu .....	24
Şekil 6. Yığılımlı dağılım fonksiyonu .....	25
Şekil 7. Normal dağılım eğrisi.....	26
Şekil 8. Rastgele dalga hareketi.....	26
Şekil 9. Rastgele sayıların türetilmesi için ters dönüşüm yöntemi.....	34
Şekil 10. Gelişigüzel şekilli kompozit kesitli prizmatik bir kiriş (a) ve oluşan iki boyutlu bölge $\Omega$ (b).....	35
Şekil 11. Yapısal bağlantılar.....	39
Şekil 12. Bilgisayar programı akış diyagramı.....	45
Şekil 13. 10 katlı, X yönünde 3, Y yönünde 2 açıklıklı, üç boyutlu çerçeve modeli.....	49
Şekil 14. 1999 Kocaeli depremi YPT330 bileşeni ivme kaydı.....	50
Şekil 15. PSFEM ve MCS yöntemlerinin farklı COV değerleri için karşılaştırması.....	51
Şekil 16. Çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca rastgele değişken elastisite modülü için X doğrultusundaki maksimum yatay yerdeğiştirmeleri.....	53
Şekil 17. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum eksenel kuvvetleri.....	54
Şekil 18. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum kesme kuvvetleri.....	55
Şekil 19. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum eğilme momentleri.....	55
Şekil 20. Fatih Sultan Mehmet köprüsünün iki boyutlu sonlu eleman modeli.....	56
Şekil 21. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler.....	58
Şekil 22. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	59
Şekil 23. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	59

Şekil 24. Kompozit kesitli çerçeve sistemin boyutları (a), çerçevenin kolon (b) ve giriş enkesit boyutları (c).....	61
Şekil 25. Kompozit kesitli karayolu köprüsünün genel boyutları (a), kolon (b) ve giriş en kesit boyutları (c).....	63
Şekil 26. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistem modeli.....	65
Şekil 27. Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemi.....	66
Şekil 28. Kompozit kesitli çerçeve sistemin boyutları (a), kolon (b) ve giriş (c) en kesit boyutları.....	67
Şekil 29. Kompozit kesitli köprü sistemin boyutları (a), kolon (b) ve giriş (c) en kesit boyutları.....	69
Şekil 30. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca yatay doğrultudaki en büyük yerdeğiştirmeleri.....	72
Şekil 31. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen maksimum aksenal kuvvetleri.....	74
Şekil 32. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri.....	74
Şekil 33. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri.....	75
Şekil 34. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca yatay doğrultuda meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeleri.....	77
Şekil 35. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük aksenal kuvvetler.....	78
Şekil 36. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri.....	79
Şekil 37. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri.....	79
Şekil 38. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca yatay doğrultuda meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeler.....	82
Şekil 39. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük aksenal kuvvetler.....	83
Şekil 40. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yüksekliği boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri.....	84

Şekil 41. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri.....	84
Şekil 42. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirmeleri.....	87
Şekil 43. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük eksenel kuvvetleri.....	89
Şekil 44. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri.....	89
Şekil 45. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri.....	90
Şekil 46. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirmeleri.....	92
Şekil 47. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük eksenel kuvvetleri.....	93
Şekil 48. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri.....	94
Şekil 49. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri.....	94
Şekil 50. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirmeleri.....	97
Şekil 51. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük eksenel kuvvetleri.....	98
Şekil 52. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri.....	99
Şekil 53. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri.....	99
Şekil 54. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için yatay yerdeğiştirmeleri.....	103
Şekil 55. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	105
Şekil 56. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	106
Şekil 57. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	107
Şekil 58. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için yatay yerdeğiştirmeleri.....	110
Şekil 59. Yarı rijit bağılı çelik çerçeve sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	111

Şekil 60.	Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	112
Şekil 61.	Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	114
Şekil 62.	Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yatay yerdeğiştirmeleri.....	117
Şekil 63.	Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	118
Şekil 64.	Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	120
Şekil 65.	Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat yüksekliği boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	120
Şekil 66.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri.....	123
Şekil 67.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	125
Şekil 68.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	127
Şekil 69.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	127
Şekil 70.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri.....	130
Şekil 71.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	132
Şekil 72.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	133
Şekil 73.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	134
Şekil 74.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri.....	137
Şekil 75.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	138
Şekil 76.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	140
Şekil 77.	Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	140
Şekil 78.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmesi.....	143

Şekil 79.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	145
Şekil 80.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	146
Şekil 81.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri....	146
Şekil 82.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmeleri...	148
Şekil 83.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	150
Şekil 84.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	151
Şekil 85.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	151
Şekil 86.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmeleri.....	154
Şekil 87.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	155
Şekil 88.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	156
Şekil 89.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	157
Şekil 90.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri	159
Şekil 91.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetler.....	161
Şekil 92.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	162
Şekil 93.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....	162
Şekil 94.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri...	164
Şekil 95.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri.....	166
Şekil 96.	Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....	167

- Şekil 97. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....167
- Şekil 98. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri...170
- Şekil 99. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri.....171
- Şekil 100. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri.....172
- Şekil 101. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri.....172



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Üç boyutlu çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	52
Tablo 2. Fatih Sultan Mehmet köprüsüne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri.....	56
Tablo 3. Fatih Sultan Mehmet köprüsünün rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	57
Tablo 4. Kompozit kesitli çerçeve sisteme ait elemanların kesit özellikleri.....	62
Tablo 5. Kompozit kesitli köprü modelinin kesit özellikleri.....	64
Tablo 6. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin elemanlarının kesit özellikleri.....	65
Tablo 7. Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin elemanlarının kesit özellikleri.....	66
Tablo 8. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sisteme ait elemanların kesit özellikleri.....	68
Tablo 9. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	71
Tablo 10. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	76
Tablo 11. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken kütle yoğunluğu için doğal frekans değerleri.....	80
Tablo 12. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	86
Tablo 13. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	91
Tablo 14. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için doğal frekans değerleri.....	96
Tablo 15. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	102
Tablo 16. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	108
Tablo 17. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri.....	115
Tablo 18. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	122
Tablo 19. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	128

Tablo 20.	Yarı rijit bağı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri.....	136
Tablo 21.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	142
Tablo 22.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	147
Tablo 23.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri.....	153
Tablo 24.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri.....	158
Tablo 25.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri.....	163
Tablo 26.	Yarı rijit bağı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri.....	168

## SEMBOLLER DİZİNİ

CDF	Yığılımlı dağılım fonksiyonu
MCS	Monte Carlo simülasyon
PDF	Olasılıklı yoğunluk fonksiyonu
PSFEM	Perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi
SFEM	Stokastik sonlu elemanlar yöntemi
$A, A_x$	Kompozit kesitin enkesit alanı
$C_{ijkl\bar{\alpha}}$	$\bar{\alpha}$ 'nıncı düğüm noktası için kurucu gerilme tansörü
$C_{yz}$	Kompozit kesitin merkezi
$Cov(b_r, b_s)$	Sürekli rastgele değişkenlerin kovaryans fonksiyonu
$Cov(b_\rho, b_\sigma)$	Düğüm noktası rastgele değişkenlerin kovaryans matrisi
$E$	Elastisite modülü
$E[.]$	Rastgele değişkenlerin beklenen fonksiyonu
$E_r$	Referans malzemenin elastisite modülü
$f_i$	Cisim kuvvetlerinin vektörü
$F_x^{-1}$	Rastgele değişken X'in yığılımlı dağılım fonksiyonunun tersi
G	Kayma modülü
$G_r$	Referans malzemenin kayma modülü
$k_{iy}, k_{iz}$	Boyutlu yay katsayıları olup i ucundaki bir radyan dönmeye karşı gelen momentleri gösterirler
$k_{jy}, k_{jz}$	Boyutlu yay katsayıları olup j ucundaki bir radyan dönmeye karşı gelen momentleri gösterirler
$k_{1y}, k_{2y}$	x-z asal düzlemleri etrafında çubuğun i ve j uçlarındaki dönел yaylara ait boyutsuz yay katsayısı
$k_{1z}, k_{2z}$	x-y asal düzlemleri etrafında çubuğun i ve j uçlarındaki dönел yaylara ait boyutsuz yay katsayısı
K	Kompozit kesiti oluşturan malzemelerin sayısı
$K_{\alpha\beta}$	Sistem rijitlik matrisi

$\ell$	Korelasyon katsayısı
$M_{\alpha\beta}$	Sistem kütle matrisi
$M_{yz}$	Kompozit kesitin kayma merkezi
$M_{yi}, M_{yj}$	i. ve j. düğüm noktalarının y eksenini doğrultusundaki eğilme momenti
$M_{zi}, M_{zj}$	i. ve j. düğüm noktalarının z eksenini doğrultusundaki eğilme momenti
$M_{xi}, M_{xj}$	i. ve j. düğüm noktalarının x eksenini doğrultusundaki burulma momenti
$N$	Sistemdeki serbestlik derecelerinin sayısı
$N_i, N_j$	i. ve j. düğüm noktalarının aksinel kuvveti
$N^-$	Düğüm noktası rastgele değişkenlerinin sayısı
$p_1(b_r)$	Bir rastgele değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)
$p_2(b_r, b_s)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonunun düğüm noktası
$R$	Sürekli rastgele değişkenlerin toplam sayısı
$I_y, I_z$	y ve z eksenlerine göre atalet momentleri
$I_t$	Kompozit kesitin polar atalet momenti
$\{\ddot{q}_\beta\}$	Toplam ivme vektörü
$\{\dot{q}_\beta\}$	Toplam hız vektörü
$\{q_\beta\}$	Toplam yerdeğiştirme vektörü
$q_\alpha$	Düğüm noktası yerdeğiştirme tipi değişkenlerin vektörü
$Q_{yi}, Q_{yj}$	i. ve j. düğüm noktalarının y eksenindeki kesme kuvveti
$Q_{zi}, Q_{zj}$	i. ve j. düğüm noktalarının z eksenindeki kesme kuvveti
$Q_\alpha$	Düğüm noktası dış yüklerin vektörü
$\varphi_{i\alpha}$	Sistem şekil fonksiyon matrisi
$\varphi_{\bar{\alpha}}$	$\bar{\alpha}$ 'nıncı düğüm noktası için şekil değiştirme fonksiyonu
$\varphi_{\bar{\beta}}$	$\bar{\beta}$ 'nıncı düğüm noktası için şekil değiştirme fonksiyonu
$S_b^{\rho\sigma}$	Düğüm noktası rastgele değişkenlerinin kovaryans matrisi
$\Omega$	Bir sonlu eleman aralığı

$\partial\Omega$	Üçboyutlu sınır
$\hat{t}_i$	Sınır çekmelerin vektörü
$X$	Sürekli rastgele değişken
$\sigma$	Standart sapma
$\{\{\sigma\}_N\}$	Gerilme vektörü
$\mu$	Ortalama değer
$\mu_{b_r b_s}$	Korelasyon fonksiyonu
$\xi$	Sönüm oranı
$\alpha, \alpha_x$	Değişim Katsayısı (COV)
$\nu$	Poisson oranı
$\nu_i, \nu_j$	Düzeltilme faktörleri
$\tau$	Zaman değişkeni
$\text{Var}(b_r)$	Varyans fonksiyonu
$(.)^0$	Rastgele değişkenlerin ortalamalarını alan sıfırıncı derece nicelikler
$(.)^{\rho}$	Düğüm noktası rastgele değişkenleri açısından birinci kısmi türevler
$(.)^{\rho\sigma}$	Düğüm noktası rastgele değişkenleri açısından ikinci kısmi türevler

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Ülkemizin aktif deprem kuşağında yer alması ve oluşan depremler sonucu meydana gelen büyük can ve mal kayıpları yapı sistemlerinin projelendirilme ya da uygulama aşamalarında bir takım eksikliklerin olduğunun göstergesidir. Bu eksikliklerden biri de çözümlenmeler sırasında kullanılan yapı parametrelerinin deterministik kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Deterministik yöntemler bu parametrelerin tamamen bilinmesi temeline dayanmaktadır. Ancak tasarım değerlerinin kesin olarak bilinmesi hususunda bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Söz konusu belirsizliklere örnek olarak yapı elemanlarının geometrik özellikleri, malzeme mekanik özellikleri ve yüklerin büyüklük ve dağılımları verilebilir (Lawrence, 1987). Bu belirsizliklerden dolayı deterministik yaklaşım birçok yapı sisteminin çözümlenmesinde yetersiz kalabilmektedir.

1960'lı yıllarda Soong ve Bogdanoff (1963) tarafından ortaya atılan olasılıklı çözümlenme yöntemleri, İnşaat Mühendisliğinin çeşitli alanlarında, daha çok basit veya yarı karmaşık yapı sistemlerinde uygulanmakta olup gün geçtikçe güvenilirliğini daha da artırmaktadır. Stokastik (belirsiz) malzeme ve geometri özellikleriyle yapıların analizi için farklı analitik yöntemler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerin ya hesap zamanı uzun sürmekte ya da yalnız belirli türdeki yapılar için uygulanabilmektedir. Sayısal bir yaklaşım olan sonlu elemanlar yöntemini, rastgele malzeme özellikleriyle yapısal problemleri çözebilecek şekilde geliştiren araştırmacılar, bu yöntemi stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM) olarak adlandırmaktadırlar (Augusti vd., 1984 ve Liu vd., 1987). Yine bu alanda geliştirilen ikinci önemli bir yöntem ise Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemidir.

SFEM şimdiye kadar mühendislik yapılarının büyük çoğunluğuna uygulanmıştır; statik ve/veya dinamik analiz (Shinozuka ve Astill, 1972; Vanmarcke ve Grigoriu, 1983; Liu ve Belytschko, 1986a; 1986b; Liu vd., 1989; Lin ve Kam, 1992; Moon vd., 2004), stabilite analizi (Ghanem ve Spanos 1991; Zhang, 1994; Zhang ve Ellingwood, 1995; Yiu ve Zhang, 2000) ve yapısal güvenilirlik analizi (Der Kiureghian, 1985; Deodatis, 1991; Deodatis ve Shinouzoka, 1991; Melchers ve Ahammed, 2004).

Öte yandan, farklı özelliklere sahip malzeme veya kesitlerin birlikte düşünülerek, bu iki bileşenin her birinden daha üstün özelliklere sahip yeni bir sistemin ortaya

konulması ilkesine dayanan kompozit sistemler son zamanlarda birçok mühendislik yapısında uygulama alanı bulmaktadır. Ancak kompozit sistemler mühendislik tarihi açısından yeni sayılabilecek bir geçmişe sahip olduklarından bunların hesap yöntemlerinin gelişimi ve standartlaşması süreci devam etmekte ve halen birçok araştırmacının ilgisini çekmektedirler. Ayrıca kompozit kesitlerden oluşan sistemlerin çözümlemesinin stokastik yaklaşımlarla ele alınması da yeni yeni dikkate alınan bir alan olarak ortaya çıkmaktadır.

Bina ve köprü türü yapılarda kullanılan kompozit kesitli sistemler genellikle çelik profiller ve betondan oluşmaktadır. Uygulamaya dönük bazı eksikliklerinden dolayı, prefabrike betonarme sistemlerde olduğu gibi çelik profillerin birleşim yerleri de yeterince rijit bir şekilde bağlanamamaktadır. Bağlantı rijitliklerindeki eksikliklerin dikkate alındığı sistemlere yarı rijit bağlı yapı sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Yarı rijit bağlantılara sahip sistemlerin özellikle bağlantı rijitliği oranının kesin olarak bilinemeyeceği ve bu belirsiz durumun hesaplarda dikkate alınmasının gerekliliği de üzerinde durulması gereken önemli bir hususu teşkil etmektedir.

Bu çalışmada yarı rijit bağlı, kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizi üzerine bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem uygulamada sıkça karşılaşılan çerçeve ve köprü sistem modelleriyle örneklendirilmiştir. Yönteme ve uygulamalarına geçilmeden önce stokastik analiz, kompozit kesitli sistemler ve yarı rijit bağlı sistemlerle ilgili literatürde yer alan çalışmalara ve bunların formülasyonlarına bu bölümde yer verilecektir.

## **1.2. Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin Stokastik Analizi ile İlgili Çalışmalar**

Stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM), yapısal sistemdeki belirsizlikleri karşılamak için sonlu elemanlar yöntemi formülasyonlarının değiştirilmesinden ibarettir. Temel değişkenler stokastik olduğu için deterministik analiz boyunca hesaplanan her nitelik ayrıca stokastiktir. Bu nedenle stokastik tepkileri elde ederken, temel değişkenlerin stokastik değişimi açısından, deterministik analizin her adımındaki niceliklerin stokastik değişiminin hesaba katılması gerekmektedir. Bu temel fikrin uygulaması basit gibi görünse de bunu gerçekleştirmek oldukça güçtür. Çünkü temel değişkenler açısından değişik niceliklerin kısmi türevlerinin büyük matris toplamları gibi oldukça karmaşık hesaplar içermektedir. Diğer modern çözümleme tekniklerinde olduğu gibi stokastik sonlu elemanlar yönteminde de çok yoğun emek, zaman ve karmaşık matematiksel modellemeler

gerekmektedir. Sıradan çözümlene teknikleri genel olarak seçilen tipik değişkenlerden oluşur, ancak gerçekte yapı sistemleri kendine ait sürekli değişebilen çok boyutlu parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler, kesit özellikleri ve boyutları gibi geometrik özellikler, modüller ve dayanımlar gibi malzeme mekanik özellikleri ile yüklerin büyüklük ve dağılımı olabilmektedir. Sistem parametrelerinin karakteristiklerindeki dağılımlar iyi bir kalite kontrolü ile belirlenebilir ve bunlar ancak olasılıklı bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu bağlamda, gerilme analizlerinde karmaşık yapısal sistem parametrelerinin sayısı artmakla birlikte, karmaşık parametrelerin basitleşmesi gerçeği gözden kaçmaması gereken bir husustur. Mekanik modelleme, gerilme analizi ve emniyet değerlendirmeleri de bu derecede öneme sahip bulunmaktadır.

Doğru ve etkili bir şekilde rastgele katsayılarla denklemlerin nasıl çözümleneceği konusundaki araştırmalar ilgi uyandırmaya devam etmektedir. Son on yıl boyunca birçok yöntem araştırılmış ve önerilmiştir. Genel olarak bu yöntemler yaklaşık ve kesin çözüm yöntemleri olarak iki kategoride ele alınmaktadır. Yaklaşık çözüm yöntemleri arasında yer alan stokastik sonlu elemanlar çözüm yöntemi genel olarak dört şekilde uygulanmaktadır: Titreşim veya Taylor açılımı temelli yöntemi (perturbasyon yöntemi) (Liu, vd., 1986a; 1986b; Kleiber ve Hien, 1992; Zhang ve Ellingwood, 1995; Köylüoğlu, vd., 1995; Köylüoğlu ve Elishakoff, 1998), ağırlıklı integral yöntemi (Deodatis, 1991; Deodatis ve Shinouzoka, 1991), Neumann açılımı yöntemi (Yamazaki, vd., 1988; Papadrakis ve Papadopoulos, 1996) ve çokterimli kaos açılımı (Ghanem ve Spanos 1991) yöntemleridir. Bu yöntemlerde seri açılımlarının belirli türleri kullanılarak sistemlerin rastgele tepkileri belirlenir ve sonunda açılımlar belirtilen derecede kesilerek işlemler tamamlanır. Yaklaşık yöntemlerde kısaltılmış serilerin derecesi arttığı zaman ise çözüm süresi ve çözümün doğruluğu da artmaktadır. Ağırlıklı integral yöntemi, stokastik alanın bir ağırlıklı integral ile gösterimi temeline dayanmaktadır. Bu yöntemin önemli üstünlüğü kaba bir eleman ağı kullanılsa bile, stokastik sistemin tepki değişkenlerinin hassas bir şekilde hesaplanabilmesidir. Ayrıca giriş elemanlar için yöntemin doğruluğu seçilen ağdan bağımsız bulunmaktadır. Neumann açılımı yöntemi stokastik alanın ayrıştırılması esasına dayanmaktadır. Hem Neumann açılım şeması hem de çokterimli kaos açılımı, göreceli kaba eleman ağında ve rastgele dalgalanmaların geniş bir alanında daha iyi sonuçlar vermektedir (Papadopoulos ve Papadrakis, 1997). Kesin çözüm yöntemleri ise MCS yöntemi ve onun hesapsal olarak iyileştirilmiş değişimlerini içermektedir. Bu simülasyon esaslı yöntemler her bir üretilmiş örnek için sonlu eleman denklemlerini doğru bir şekilde



çözebilmekte ve örneklerin büyük bir sayısının çözümlerinden yapısal tepkinin istatistiklerini üretmektedir. Matematiksel olarak düzenleyici çözüm yöntemlerinden biri olan simülasyon yöntemi, her bir üretilmiş örneğin rastgele değişken uzayında bir düzenleyici nokta kabul edilmesi esasına dayanmaktadır ve SFEM denklemleri bu noktalarda doğru bir şekilde sonuç vermektedir (Pradlwalter ve Schueller, 1999). SFEM denklemlerinin kesin çözümleri tek tek elde edilebildiği için, denklemler rastgele değişken uzayının her noktasında çözümlendiğinde, simülasyonların bir sonlu sayısı kullanılarak elde edilen kesin çözüm, sistem davranışını iyi bir şekilde temsil edebilmektedir. Genellikle yaklaşık yöntemler kesin yöntemlerden daha kısa sürede sonuç vermektedir. Ancak bu çözüm yöntemlerinin kullanım alanı az sayıdaki rastgele değişkeni içermekte olup, daha çok lineer ve bazı lineer olmayan problemlerin çözümüyle sınırlı kalmaktadır (Shinouzoka, 1987). Kesin çözüm yöntemleri ise sonlu eleman programlarına kolayca ilave edilip genel olarak bütün problem türlerine uygulanabilmektedir. Bu yöntemlerin de temel dezavantajı simülasyonlar kullanarak çözüme gitmeleri ve özellikle büyük boyutlu analizlerde çok uzun zamana ihtiyaç duymalarıdır.

Araştırmacılar hesap için gerekli olan işi azaltmaya yönelik olarak Neumann açılımı yöntemiyle birlikte MCS yöntemini kullanılmışlardır. Fakat Neumann açılımı yöntemi de özellikle karmaşık sistemlerden oluşan problemler için çok etkili değildir ve bilgisayar işlemcisine (CPU) çok ağır yük getirebilmektedir. MCS yönteminin dezavantajlarından dolayı, zamandan bağımsız belirsizlik problemlerini ele alan perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi bu çalışmada detaylı olarak ele alınmıştır. Taylor serilerindeki değişkenlerin açılımını esas alan yöntem CPU zamanı bakımından MCS yöntemine önemli bir alternatiftir. Taylor serileri açılımını kullanmanın doğruluğu, açılımda yüksek dereceli terimlerin kullanımıyla artmaktadır. Malzeme ve geometrik özelliklerin küçük değişimi için düşük dereceli seriler kullanılsa bile sonuçlar MCS yönteminden elde edilen değerlere oldukça yakın değerler vermektedir.

Stokastik sonlu elemanlar alanında diğer yapı türlerinin yanında kiriş (Vanmarcke vd., 1985; Zhu ve Wu, 1992; Chakraborty ve Sarkar, 2000; Falsone ve Impollania, 2002; Chaudhuri ve Chakraborty, 2003; Papadopoulos vd., 2005), plak - kabuk (Graham ve Deodatis, 1998; Graham ve Deodatis, 2001; Argyris vd., 2002; Bhattacharyya ve Chakraborty, 2002; Noh, 2004; Noh, 2006), 2 boyutlu çerçeve (Waarts ve Vrouwenvelder, 1999; Sakurai vd., 2001; Falsone ve Impollania, 2002; Papadopoulos ve Deodatis, 2005) ve 3 boyutlu çerçeve (Papadopoulos ve Papadrakakis, 1997; Lei ve Qiu, 2000;

Zielichowski-Haber, 2005) sistemler, köprü (Dumanoğlu ve Severn, 1990; Cheng ve Xiao, 2005) yapıları gibi sınırlı sayıda çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bunlar genelde basit sayılabilecek düzeydeki sistemlerden oluşmakla beraber yarı karmaşık olarak nitelendirilebilecek sistemler az da olsa bu çalışmalarda yer almaktadır. Yapılan çalışmalarda, stokastik sonlu elemanlar yönteminin uygulamasının bazı zorlukları vurgulanmıştır:

1. Sistemin istatistiksel özellikleri bilgisinden sistem tepki istatistiğinin türetilmesi gerekmektedir. Bu tepki istatistiğinin değerlendirilmesi karmaşık yapılar için matematiksel ve sayısal zorluklar ortaya koymaktadır.
2. Mevcut deterministik sonlu elemanlar kodu, sistem tepkisinin standart sapması gibi konularda eksikliği olan mühendisler için kullanılabilir durumdadır. Bundan dolayı, bu yöntemi kullanabilmek için, mevcut sonlu elemanlar kodunu uyarlamak gerekir.
3. SFEM, yüksek dereceli parametrelerin belirsizliği için uygun bulunmamaktadır.

Vanmarcke ve Grigoriu (1983), mühendislik problemleri için kullanılabilen bir stokastik sonlu elemanlar yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemi rijitliğin rastgele değişimi için bir konsol kirişi çözüme kullanmışlardır. Liu vd. (1986), olasılıklı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak dinamik ve lineer olmayan problemleri analiz etmişlerdir.

Shinozuka ve Deodatis (1988), statik yüklemeye maruz ve malzeme özelliklerinin rastgele olduğu kabulüyle bir yapının tepki değişimini incelemek için sonlu elemanlar yöntemi geliştirmişlerdir. Yazarlar birinci derece Neumann açılımı tekniğini yapısal sistemin rijitlik matrisini genişletmek için kullanmış ve tepki yerdeğiştirme vektörünün kovaryans matrisini sistemdeki sonlu elemanların sayısının fonksiyonu olarak analitik bir şekilde hesaplamışlardır. Ayrıca yakınsamayı etkileyen faktörler de yazarlar tarafından çalışılmıştır.

Stokastik malzeme özellikleriyle bir çerçeve sistemin tepkilerini bulmak için Taylor serileri açılımı (perturbasyon yöntemi) Deodatis (1990) tarafından uygulanmış ve değişken-tepki fonksiyonu stokastik yapısal sistemin üst sınırını tespit etmek için kullanılmıştır.

Takada (1990), çalışmasında döşeme elemanlardan oluşan stokastik sistemlerin tepki değişimini tahmin etmek için stokastik sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Önerilen yöntemin özelliği, sürekli stokastik alanı, sadece eleman rijitlik matrisinde değil, ayrıca eşdeğer düğüm noktası kuvvetlerini hesap etmek için de ağırlıklı integraller vasıtasıyla dikkate alınmasıdır. Çalışmada stokastik alanı içeren konu birkaç rastgele

değişkeni kapsayan bir probleme dönüştürülmüş ve perturbasyon ve MCS yöntemlerinden faydalanılarak çözümlenmiştir.

Hien ve Kleiber (1991), yapısal dinamik problemlerinden stokastik tasarım duyarlılığını analiz etmek için yöntem önermişlerdir. Eklenmiş değişken yaklaşımın bir bileşimini ve perturbasyon yöntemini sonlu elemanlar yöntemi kapsamında kullanmışlardır. Kiriş ve kabukların stokastik duyarlık ve deterministik analizini de bu çalışmada ayrıca gerçekleştirilmişlerdir. Buldukları sayısal sonuçları genelleştirerek koordinatları normalleştiren, daha sonra karşılıklı ilişkisi olan rastgele değişkenleri ilişkisiz değişkenlere dönüştüren yazarlar, süperpozisyon tekniğini esas alan bu yöntemin çok daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

Mahadevan ve Mehta (1993), çalışmalarında dinamik olarak yüklü büyük çerçevelerin stokastik analizi için stokastik sonlu elemanlar yöntemini (SFEM) kullanmışlardır.

Çalışmalarında deterministik yüklere maruz kalan ve malzeme özellikleri rastgele seçilen yapıların stokastik sonlu eleman analizini gerçekleştiren Aroujo ve Awruch (1994), klasik sonlu eleman yaklaşımıyla birleştirilen Taylor serileri açılımı ve direkt MCS yöntemini kullanmış ve elde edilen sonuçları doğruluk ve hesapsal etki bakımından birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. İnceledikleri örnekler ise lineer olmayan dinamik problemleri kapsamaktadır.

Chakraborty ve Dey (1995), hem malzeme hem de uygulanan dış yük bakımından istatistiksel belirsizliklere sahip olan yapıların analizi için stokastik sonlu eleman yöntemini çalışmışlardır. Zhang ve Ellingwood (1996) ise stokastik sonlu eleman yöntemini lineer olmayan malzeme ile yapıların stokastik analizini gerçekleştirmek için geliştirmişlerdir. Çalışmada önerilen yöntem bir çerçeve ve bir ucu sabit kirişi içeren iki sayısal uygulama ile örneklendirilmiştir.

Yapısal mühendislik problemlerinde istatistiksel belirsizlikler; sınır şartları, uygulanan yükler, malzeme ve geometrik özelliklerdeki rastgelelikten dolayı meydana gelebilmektedir. Chakraborty ve Dey (1996), çalışmalarında MCS yönteminin çerçevesinde tepki değişiminin sonlu eleman çözümünü türeterek Neumann açılım tekniğini sunmuşlardır. Neumann açılımı tekniği bütün örnek yapılar için rijitlik matrisinin sadece belirli kısmının tersine ihtiyaç duymakta ve böylece hesapsal etkiyi artırmaktadır. Elde ettikleri bulgular sonucunda Neumann serileri artırıldığında değerlerin direkt MCS yöntemiyle elde edilen sonuçlara yakınsadığı görülmüştür.

Köylüoğlu vd. (1995), rastgele sönüm ve rastgele rijitlik özellikleriyle geometrik olarak lineer olmayan elastik iki boyutlu çerçevelerin stokastik tepki analizi için rastgele düğüm noktası yer değiştirmelerinden faydalanarak lineer olmayan bir stokastik sonlu eleman formülasyonu ve belirli şekil fonksiyonları türetmişlerdir. Bu çalışmada rastgele katsayılarla ikinci derece lineer olmayan stokastik eşitlikleri tanımlamada perturbasyon esaslı yöntem ile olasılık teoremi kullanılmıştır. Örnek çerçeveler, sönüm oranları ve eğilme rijitlikleri rastgele seçilerek ikinci derece perturbasyon yönteminin geçerliliğini göstermek için çözülmüştür. Ayrıca hesaplanan sonuçlar MCS yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Lee ve Lim (1996), çalışmalarında rastgele parametrelerle optimum yapısal tasarım yapabilmek için perturbasyon yönteminin bir uygulamasını sunmuşlardır. Yöntem, birinci derece perturbasyon yöntemini esas alınarak formüle edilmiştir. Rastgele değişkenlerin değişim oranları ile birlikte özdeğer kısıtlamaları, gerilme ve deplasmanlarını da hesaba katmaktadır.

Zhang ve Peil (1997) statik yük koşulları altında stokastik sonlu elemanlar yöntemini yapısal tepki analizlerini elde etmek için kullanmışlardır. Stokastik yükler rastgele olarak tanımlanmış ve rastgele değişkenler ikinci derece perturbasyon yöntemi kullanılarak genişletilmiştir. Daha sonra ise deterministik sonlu elemanlar yöntemi, yapısal tepkilerin istatistiksel özelliklerini çözmek için kullanılmıştır.

Papadopoulos ve Papadrakakis (1997), ağırlıklı integral ve MCS yöntemlerinin birleşimini kullanarak uzay çerçevelerin stokastik sonlu eleman analizini gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında gerçekleştirdikleri sayısal uygulamalarla bu bileşik çözüm tekniğinin büyük çaplı üç boyutlu bina çerçevelerinin stokastik sonlu eleman analizi için gerçekçi bir çözüm sunabileceğini göstermişlerdir.

Adhikari ve Manohar (1999), rijitlik özellikleri ve kütlelerin stokastik değişimi ile viskoz sönümlü kirişlerden oluşan kemer çerçevelerin zorlanmış harmonik titreşim analizini çalışmışlardır. Bu analiz, stokastik dinamik rijitlik matrisleri elemanlarının çevrilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımların başarımı MCS yönteminin sonuçlarıyla mukayese edilerek değerlendirilmiştir.

Papadrakakis ve Kotsopoulos (1999), iki boyutlu düzlem gerilme şekildeğiştirme problemleri ve üç boyutlu kütle yapıların SFEM analizi ve yine MCS yönteminin hesapsal etkisini artırmak için bu yöntemlerin esas özelliklerini birleştirerek yüksek derecede etkili çözümler önermişlerdir. Bu çalışmayla, çözümün ağırlıklı integral yöntemiyle mukayese

edildiğinde hesap süresinin önemli derecede (%68) azaldığı ve yöntemin daha ekonomik olduğu görülmüştür.

Lei ve Qiu (2000a), yaptıkları çalışmalarında stokastik parametrelerle yapıların dinamik analizi için bir yöntem sunmuşlardır. Çalışmalarında verilen dinamik Neumann stokastik sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, yapılar için dinamik tepkilerinin istatistiki özelliklerini türetmeyi amaçlayan bir süreç geliştirmişlerdir. Ayrıca Neumann genişleme yöntemini geliştirmiş ve MCS yöntemi çerçevesindeki rastgele bir yapı sisteminin dinamik tepkisinin istatistiki çözümünün türetilmesi için bu denkleme uygulamışlardır.

Yine aynı yazarlar (Lei ve Qui, 2000b), stokastik yapısal parametreleri ve rastgele dinamik uyarımları direkt olarak dinamik fonksiyonlu değişen formülasyonlara ilave ettikleri çalışmalarında anlık minimum potansiyel enerji ve küçük değişkenli perturbasyon yöntemiyle ilgili olarak stokastik sonlu elemanlar yöntemini geliştirmişlerdir. Küçük değişkenli perturbasyon tekniği, rastgele yapılar için dinamik analizin birleştirilmiş lineer olmayan stokastik değişken fonksiyonunu ifade etmektedir. Artan tekerrür denklemlerinin yardımıyla, rastgele uyarımlar altındaki stokastik parametrelili yapıların geçici lineer olmayan çözümleri elde edilebilmektedir.

Çalışmalarında kısa süreli dinamik yüklere maruz kalan (özellikle sismik yük) lineer olmayan yapılar için zaman bakımından riski değerlendirmek amacıyla etkili bir algoritma öneren Huh ve Haldar (2001), stokastik sonlu eleman fikrini esas almaktadır. Algoritmanın esas özelliği, gerçek deprem yükünün yapılarda kullanılabilir olması ve yük koşullarının gerçekçi olarak temsil edilmesini sağlamasıdır. Bu çözüm yolu çalışmalarında iki örnek yardımıyla doğrulanmıştır.

Yapısal modellerdeki değişimin ele alınmasının, günümüz yapısal analiz tekniklerinin doğal ve gerekli bir uzantısı olduğunu belirten Nieuwenhof ve Coyette (2002), SFEM, perturbasyon esaslı SFEM, spektral SFEM ve MCS yönteminin büyük öneme sahip olduğunu çalışmalarında ifade etmişlerdir. Yazarlar yine çalışmalarında, rastgele alanlarda modellenen rastgele mekanik parametrelili yapıların, zaman uyum analizi için perturbasyon esaslı SFEM yönteminin bir uzantısını sunmaktadırlar.

Falsone ve Impollonia (2002), ayrık yapıların belirsiz sonlu eleman statik tepkisini değerlendirmek için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem klasik stokastik sonlu eleman yaklaşımlarından farklıdır ve rastgele değişkenlerle ilgili yerdeğiştirme tepkisinin açılımını varsaymaktadır. Sunulan yöntem özellikle statik olarak belirli yapılar için kesin çözüm üretmektedir ve ikiden daha yüksek derecede tepki istatistiklerini değerlendirebilmektedir.

Çalışmalarının sonucunda, bu yaklaşımın stokastik sonlu elemanlar yöntemlerinden perturbasyon (daha hassas sonuç) ve MCS yöntemleriyle (hesap yükünü azaltması bakımından) rekabet edebilecek bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır.

Chen vd., (2002), çalışmalarında kafes yapıların özdeğer problemini çözmek için malzeme ve geometrik özelliklerdeki rastgele değişimin etkisini incelemişlerdir.

Noh (2004), stokastik sonlu eleman analizi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda tepki değişimi ile ilgili olarak elastisite modülünün rastgele değişken seçilmekte olduğunu ifade ederek, çalışmasında yalnız elastisite modülünü değil ayrıca malzeme özelliklerinden poisson oranını da rastgele değişken olarak seçmiş ve düzlem-plak yapılarıdaki tepki değişimini belirlemek için bir formülasyon önermiştir.

Sniady ve Zielichowski (2004), çerçevelerdeki olasılığı analiz etmek için yeni bir SFEM sunmuşlardır. Rastgele yüklerin geniş bir değişimi için etkili bir şekilde çalışan SFEM, çerçevelerdeki genel formülleri geliştirmek için kullanılmıştır. Geliştirilen formüller, stokastik uzay yüküne maruz kalan çerçeve yapıların analizini mümkün kılmaktadır.

Gutierrez (2005), sayısal olarak göçme mekanizmasına sahip olan bir çerçeveye rastgele olarak yükler yüklemiş ve çerçevenin davranışı incelemiştir. Ayrıca düzenli ve sürekli tanımlamanın gerekliliğinden dolayı, malzeme parametrelerinin mekanik tepkisinin duyarlılığının değerlendirilmesini algoritmik bakımdan tartışmıştır. Çalışmasında, geometri ve malzeme özellikleri ile sınır koşullar bakımından göçme modlarının önemini çalışmak için ise perturbasyon ve güvenilirlik yöntemlerini kullanmıştır.

Papadopoulos ve Deodatis (2005), stokastik çerçeve sistemlerin tepki değişiminin analizi üzerine geniş bir çalışma hazırlamışlardır. Cheng ve Xiao (2005), asma köprülerin perturbasyon analizi ve olasılıklı serbest titreşimi için stokastik sonlu eleman esaslı bir algoritmayı tepki yüzeyi, sonlu elemanlar ve MCS yöntemlerinin avantajlarının birleşimi vasıtasıyla önermişlerdir. Yapısal parametrelerdeki belirsizlikler de bu algoritmada dikkate alınmıştır. Önerilen algoritmanın doğruluğu ve verimliliği MCS yönteminin sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Bayraktar vd. (2005), çalışmalarında farklı deprem verilerini kullanarak Lagrange yaklaşımı ile baraj-rezervuar-temel sistemlerinin dinamik tepkisinde kaya temellerin etkisini incelemişlerdir. Sıvının sonlu eleman denklemlerine yüzeydeki dalga etkisi ve dalganın yayılma etkileri de ilave edilmiştir. Beton ağırlık baraj seçilerek üç farklı temel (standart rijit temel, yoğun temel ve kaya temel) kullanılmıştır. Bu üç farklı temel

modeline göre yerdeğiştirmeler, dūřey gerilmeler, hidrodinamik basınçlar ve normal gerilmeler karşılaştırılmıştır.

Chaudhuri ve Chakraborty (2005), hem genlik hem de frekans içeriği sabit olmayan deprem yer hareketine maruz kalan belirsiz parametrelili çok serbestlik derecelili lineer elastik yapılar için stokastik analiz gerçekteşirmişlerdir. Perturbasyon esaslı stokastik sonlu eleman yöntemini ise koşulsuz güvenilirliği türetmekte kullanmışlardır. El Centro (1940) depremine maruz kalan bir boyutlu baraj yapı, önerilen koşulsuz zaman değişkenli güvenilirlik hesabını maksimum yerdeğiştirme ve kesme kriteri bakımından değerlendirmek için seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar parametre belirsizliğinden dolayı güvenilirliğin değişimiyle ilişkili belirli bir sistem ile belirsiz bir sistemin güvenilirliklerindeki değişimi karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Kaminski ve Carey (2005), ikinci derece perturbasyon tekniği kullanarak rastgele değişken verileriyle akış problemlerinin çözümlerini gerçekteşirmişlerdir. Yöntem hem sembolik hem de ayırık sonlu eleman hesapları kullanılarak sıvı basıncı ve akış hızı gibi niceliklerin kovaryansları ve beklenen değerlerinin yakınsamasını sağlamaktadır.

Onkar vd. (2006), çalışmalarında rastgele malzeme özelliklerinden oluşan hem homojen hem de tabakalı plakların burkulma analizi için bir SFEM formülasyonu önermişlerdir.

Bayraktar vd. (2007a) uzay kafes çelik bir kulenin perturbasyon ve MCS yöntemlerine göre stokastik statik analizini gerçekteşirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda küçük değişim katsayıları için (%10 COV) her iki yöntemden elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerlerinin birbirine oldukça yakın sonuç verdiği kanaatine varmışlardır.

Bayraktar vd. (2007b), çalışmalarında deprem hareketine maruz kalan, geleneksel çerçeve, D tipi, V tipi ve  $\Lambda$  tipi eğik elemanlardan oluşan çerçeve sistemlerin stokastik sonlu elemanlar analizini gerçekteşirmişlerdir. Gerçekteştirilen analizler sonucunda perturbasyon yönteminin MCS yöntemine oldukça yakın sonuç verdiğini ve stokastik çözümlerde bu yöntemin kullanılabilereği sonucuna varılmıştır. Ayrıca deprem etkisine karşı  $\Lambda$  tipi eğik elemandan oluşan çerçeve sistemin en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

### **1.3. Kompozit Kesitli Yapı Sistemlerinin Analizi ile İlgili Çalışmalar**

Ülkemizde kullanılan taşıyıcı sistem malzemeleri, kargir, betonarme, ahşap ve çeliktir. Son zamanlarda kompozit kesitlerden oluşan yapısal bileşimler ve bu sistemlerin

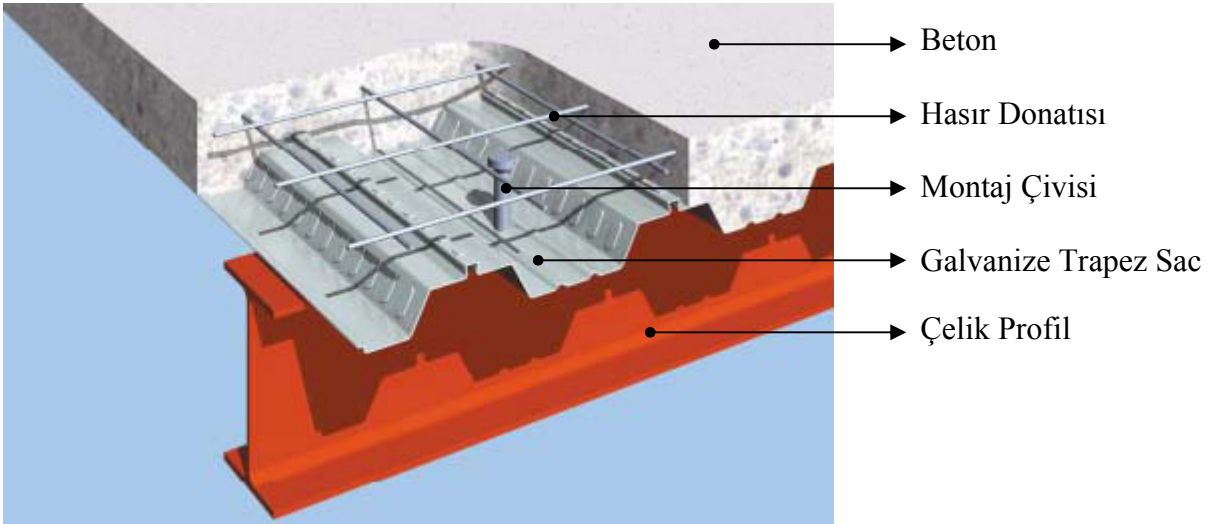
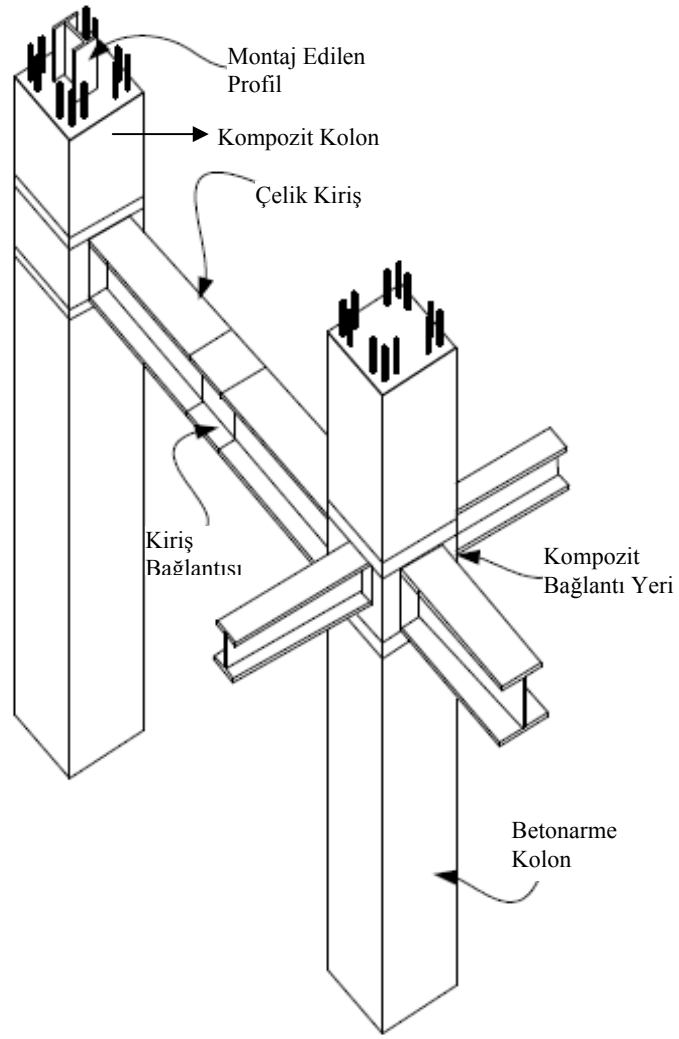
uygulama alanları büyük ölçüde artmıştır. Çelik ve betonun (veya betonarmenin) birlikte kullanıldığı kesitlere kompozit kesitler, çelik ve betonarme elemanların birlikte işlev gördüğü sistemlere de kompozit sistemler denilmektedir (Şekil 1).

Kompozit elemanlar, binalar, köprüler, deniz yapıları vb. birçok yapı sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit elemanların özellikle son zamanlarda hafifliği, korozyona karşı dayanımı, rijitlik oranlarına göre yüksek dayanımı, kolay uygulanabilir olması gibi özelliklerinden dolayı kullanımı yaygınlaşmıştır. Çelik ve betonun en etkili biçimde kullanımıyla ortaya çıkan kompozit sistemler sadece betonarme veya çelikten oluşan geleneksel yapılardan çok daha ekonomiktirler.

Çelik iskeletli bir yapıda, taşıyıcı sistemin bütün elemanlarının malzeme olarak tek başına çelikten oluşması hiçbir zaman söz konusu olamaz. Çeliğin en yüksek oranda kullanıldığı endüstri yapılarında bile, en azından temeller betonarmedir. Köprülerde çelik kirişlere oturan tabliyeler, betonarme döşeme plaklarıyla çelik kirişlerinin, yine betonarme döşeme plaklarıyla kalıcı kalıp olarak kullanılan çelik sacların ve örtü ya da iç dolgu niteliğindeki betonla da, çelik kolonların ortaklaşa çalıştırılması mümkündür. Böylece betonun basıncı daha iyi karşılaması, çeliğin ise çekmeye olan dayanıklılığı sayesinde, kompozit kesitler yalın çelik kesitlere göre daha ekonomik değerler vermektedir. Ayrıca kompozit kesitlerin çelik kesitlere göre bir üstünlüğü de rijitlik artışından dolayı sehim değerlerinin daha küçük çıkmasıdır (Mehanny ve Deierlein, 2000).

Yukarıda anlatılan olumlu özelliklerden dolayı taşıyıcı sistem seçiminde kompozit elemanların seçimi önem kazanmıştır. Kompozit sistemlerin dezavantajları arasında bağlantı bölgelerindeki zayıflık başta gelmektedir. Prefabrikasyon teknikleri bu problemi azaltmasına rağmen yerinde çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca beton ve çelik arasındaki farklı sünme ve rötre etkisi de kompozit sistemlerin diğer sakıncalı yanlarından biridir (Griffis, 1987).





Şekil 1. Kompozit kolon, kiriş ve sistem örnekleri

Modern mühendislik yapılarında yüksek mukavemet ve hafiflik gibi özelliklerinden dolayı kompozit elemanların davranışıyla ilgili çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Günümüzde, çelik-beton kiriş ve kolonlardan oluşan kompozit yapılar depreme dayanıklı yapı tasarımında en genel çözüm yollarından birini oluşturmaktadır. Bu nedenle son on yılda, bu tür yapıların analizi ve sonlu eleman modellemesine önem verilmiştir. Literatürde kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin deterministik analiziyle ilgili çok fazla çalışma olmasına rağmen bu tür kesitlerden oluşmuş yapı sistemlerinin stokastik analizi hakkında yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. El-Tawil vd. (1996), çelik ve betondan oluşan kompozit yapıların dinamik analizini gerçekleştirmek için DYNAMIX adlı bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Sapountzakis ve Mokos (2007), çalışmalarında dinamik burulma, eğilme ve enine veya gelişigüzel yüklemelere maruz üç boyutlu kompozit kiriş elemanların deterministik dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir.

Kompozit sistemlerin ekonomik ve uygulamaya dönük üstünlüklerine rağmen bu tür sistemlerin çözümlenmesi için etkili ve doğru hesapsal kaynakların eksikliği sebebiyle kullanımı kısıtlı kalmıştır. Bir yapının rijitliği, kütlesi, sınır koşulları ve malzeme özellikleri yapı geometrisi bilgisinden başlayarak matris formunda açıklanabilir. Yapıdaki malzeme ve geometrik özelliklerdeki rastgele değişimleri tanımlamak için ise stokastik sonlu elemanlar yöntemi gerekmektedir. Malzeme ve geometrik özelliklerdeki belirsizlikler kompozit yapıların yapısal emniyeti üzerinde önemli etkilere sahiptir, bu sebeple yüksek derecede güvenli kompozit yapıların tasarımı sırasında özellikle dikkate alınmaları büyük önem arz etmektedir. Ancak bu tür kesitlerden oluşan sistemlerin SFEM analizi hakkında kısıtlı sayıda çalışma olması ve bu araştırmalarda da kompozit sistemlerin genellikle statik yükler altındaki davranışını incelemesi bu yönde yapılacak çalışmalara ihtiyaç doğurmaktadır.

Nakagiri vd. (1985), stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle kompozit laminant plakların belirsizliklerini de dikkate alarak özdeğer problemini ilk kez çözmeye çalışmışlardır. Kompozit laminant plakların analizinde SFEM'in önemini vurgulamışlardır. Shi ve Xiong (2000), ise çalışmalarında SFEM uygulamalarından tepki yüzey yöntemini (RSM), lifli metal laminant plakların burkulma yükünün dağılımlarını belirlemek için kullanmışlardır.

Kaminski ve Kleiber (2000), çalışmalarında iki fazlı periyodik kompozit yapıyı homojenleştirmek için ikinci derece perturbasyon ve stokastik ikinci derece merkezi moment tekniğini uygulamışlardır. Çalışmada sunulan teknik çözüm doğruluğunu en iyi

şekilde gerçekleştirerek MCS yönteminin hesap zamanını önemli derecede azaltmayı amaçlamaktadır.

Ganesan ve Kowda (2005), prizmatik kompozit kiriş ve kolonların burkulma yükleri altında ortalama değer, varyans ve standart sapma değerlerini belirlemek için stokastik analiz kapsamında perturbasyon yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında, laminant kiriş ve kolonların malzeme ve geometrik özelliklerindeki rastgeleliğin etkisini de dikkate almışlardır.

Allegri vd. (2006), çalışmalarında uzay uygulamaları için büyük kompozit kafeslerin yapısal tepkisi üzerine mekanik belirsizliklerin etkilerini modellemek için bir karma teknik sunmuşlardır. Yöntem olarak ağırlıklı integral ve MCS yöntemlerini karma olarak kullanmışlardır. Karma MCS yöntemi, rastgele malzeme özelliği ile yapılan üç boyutlu büyük kompozit kafeslerin titreşim tepkisini analiz edebilen stokastik sonlu eleman kodunda geliştirilen program yardımıyla (NASTRAN) gerçekleştirilmiştir. Uygulama olarak ise karmaşık bir yapının modal analizi ve harmonik tepkisini içeren bir karşılaştırmalı problem çalışmışlardır. Yapılan bu uygulamanın sonucunda, özellikle rijitlik modülüyle ilgili mekanik belirsizlik etkilerinin basit geometrik şekillere sahip yapılar için ihmal edilebilmekte olduğunu, ancak karışık geometrik şekillere sahip karmaşık yapılar için ise mekanik belirsizliklerden dolayı yapısal tepki değişiminin oldukça yüksek elde edilebileceğini tespit etmişlerdir.

Kaminski (2006), rastgele parametreler ile mühendislik ve sayısal fizikteki bazı sınır değer problemlerini çözmek için uygulanabilen genelleştirilmiş n. derece stokastik perturbasyon tekniğini çalışmasında önermiştir. Bu teknik bir tek rastgele değişkenle bir boyutlu lineer statik problemi modellemek için sonlu eleman yöntemi ile birlikte gösterilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programı kompozit bir çubuğun basit tek yönlü çekmesi için ilk iki olasılık momentlerinin yakınsaması üzerine hesapsal çalışmaları gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda perturbasyon tekniğinin yakınsamasının rastgele girdilerin değişiminin katsayısına (COV) ve küçük bir oranda da perturbasyon parametresine bağlı olduğu görülmüştür.

Ngah ve Young (2007), çalışmalarında değişik malzeme özellikleri ile tek doğrultulu dikdörtgen kompozit bir yapının çekme etkisi altında performansının tahmini için spektral stokastik sonlu elemanlar yönteminin (SSFEM) bir uygulamasını sunmaktadırlar. Çalışmanın sonucunda SSFEM'in malzeme değişiminin geniş bir aralığında (%24 COV için) uygulanabileceğine kanaat getirmişlerdir.

Antonio ve Hoffbauer (2007), statik olarak yüklü kompozit plak ve kabuk yapıların rastgele malzeme özellikleriyle yapısal tepkilerini hesaplamayı gerçekleştirmişlerdir.

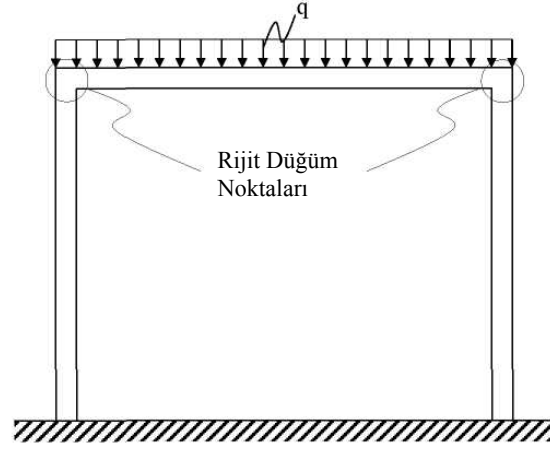
Yapılan araştırmalar sonucunda çelik ve betonun birlikte kullanıldığı kompozit kesitlere sahip yapıların PSFEM yöntemi kullanılarak çözümü üzerine sınırlı sayıda çalışma olduğu tespit edilmiştir.

Çavdar vd. (2008), kompozit kesitlerden oluşan yapısal sistemlerin performansını belirlemek için perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yönteminin bir uygulamasını yaptıkları çalışmışlarında, malzeme özelliklerinden elastisite modülünü rastgele değişken olarak seçerek gerçekleştirmişlerdir. Perturbasyon esaslı SFEM'den elde ettikleri sonuçların doğruluğunu mukayese etmek için ise MCS yöntemini kullanmışlardır.

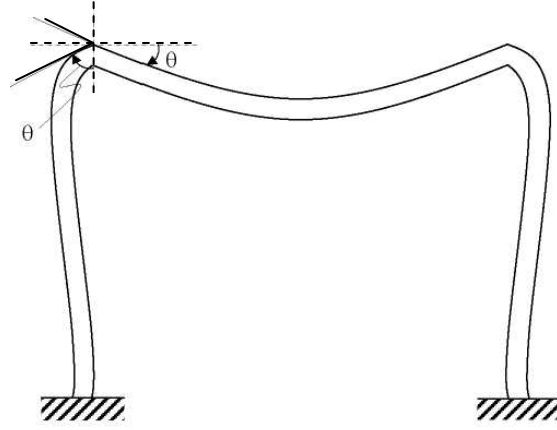
#### **1.4. Yarı Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin Analizi ile İlgili Çalışmalar**

Çelik profillerden oluşan çerçeve sistemlerde kiriş kolon bağlantılarının ya tam rijit ya da mafsallı olduğu kabul edilerek tasarımlar yapılmaktadır. Sismik yüklere maruz kalan çerçeve yapıların emniyeti ve davranışını makul kılmak için bağlantılar, çok önemli yapısal bileşenlerdir. Bağlantı esnekliğini yüksek tahmin etmek beklenilenden daha büyük yerdeğiştirmelere sebep olabilmektedir. Bağlantı esnekliğini düşük olduğunu kabul ederek yapılan analizler sonucunda ise kirişlerde hesaplanan değerlerden daha yüksek kesit tesirleri oluşabilmektedir (Sultan, 2007). Rijit kabul edilerek yapılan tasarımlarda, kiriş ve kolon arasındaki yerdeğiştirme ve çökme sürekliliği eğilme momentlerinin tamamen taşınması ile mümkün olmaktadır (Şekil 2).

Mafsallı olması durumunda ise dönme sürekliliği var olamaz ve eğilme momenti kirişten kolana iletilemez. İki katlı çerçeveye mafsallı bağlanmış bir tek katlı çerçeve Şekil 3'te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi düğüm noktasına birleşen diğer üç çubuk, düğüm noktası ile aynı miktarda dönme yaparken mafsallı uçta ise düğüm noktasından tamamen bağımsız bir dönme meydana gelmektedir. Bu şekilde bağlı olduğu düşünülerek yapılan analiz sonuçları da gerçek yapının davranışını göstermeyerek tasarımda hatalara yol açabilmektedir. Uygulamada var olan çoğu bağlantı türleri bütün yapı yerdeğiştirmelerine katkıda bulunan yarı rijit davranış göstermektedirler. Yarı rijit bağlantı durumu yapı elemanlarındaki kesit etkilerini önemli ölçüde etkilemektedir. Sonuç olarak gerçek yapı davranışı ihmal edilirse, çelik yapıların dayanım ve kesit tesirlerinin hesabı hatalı olabilmekte ve böylece pratikte uygun olmayan tasarımlara sebep olunabilmektedir.



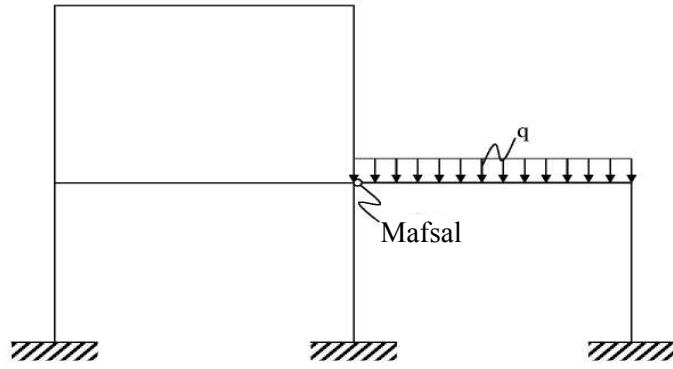
a. Rijit düğüm noktaları



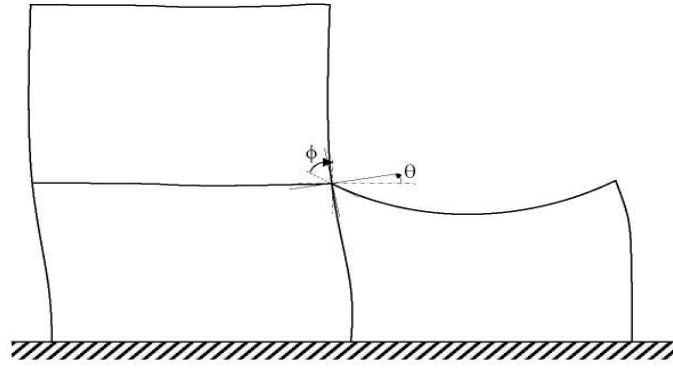
b. Rijit düğüm noktasında dönme

Şekil 2. Rijit düğüm noktası

Bağlantıları modellemek için farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bunlar arasında en yaygın olanı bağlantı elemanının her bir ucuna dönel yaylar eklemekle yarı rijit bağlantı sağlamaktadır. Boyutsuz bir düzeltme faktörü yarı rijit bağlantı davranışını tanımlamak için kullanılmaktadır. Bağlantıların yarı rijit davranışı üzerine son otuz yılda önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu konuyla ilgili ilk çalışma Batho ve Rowen (1934) tarafından yapılmış ve yarı rijit bağlantılarla çerçevelerin analizi gerçekleştirilmiştir. 1960 yılından beri geliştirilen çeşitli bilgisayar esaslı yöntemler ve bilgisayar teknolojisi, matris yöntemleri ve yarı rijit bağlantılarla yapısal sistemlerin analizi için birçok kolaylık sağlamıştır.



a. Mafsallı düğüm noktası



b. Mafsallı düğüm noktasında dönme

Şekil 3. Mafsallı düğüm noktası

Renton (1962), elastik davranan yapıların analizi için rijitlik matrisini elde etmiş ve deneysel olarak elde ettiği sonuçları, teorik olarak bulduğu sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Monforton ve Wu (1963), tamamen rijit olan eleman rijitlik matrisini kısmen değiştirerek yarı rijit bağlantılı çerçevelerin analizi için bir yöntem geliştirmişlerdir.

Tezcan ve Mahapatra (1969), tanjant rijitlik etki katsayılarını bulmak için Taylor açılımı yöntemini kullanmışlardır. Yazarlar, kuvvetlerin uç deplasmanlarına göre kısmi türevlerini alarak rijitlik etki katsayılarını elde etmişlerdir.

Lui ve Chen (1986), esnek bağlı düzlem çelik çerçevelerin davranışının analizi için bir yöntem sunmuşlardır. Çalışmalarında kiriş-kolon elemanı ve bağlantı elemanı kullanmışlardır. Çalışmalarıyla bağlantı esnekliğinin çerçeve davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır.

Birçok araştırmacı, düzlem çerçevelerin kolon-kiriş birleşim noktalarının yarı rijit davranışını incelemiş ve yaylar ile modellenen bu birleşimlerin çerçevenin statik ve dinamik analizi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (Kishi vd., 1993; Chan ve Ho, 1994; Suarez vd., 1995; Chan, 1995; Tin-Loi ve Vimonsatit, 1996; Chui ve Chan, 1996; Lui ve

Lopes, 1997; Chui ve Chan, 1997; Weyand vd., 1998; Awkar ve Lui, 1999; Xu ve Zhang, 2001; Sekulovic vd., 2002; Gong, 2003; Da Silva vd., 2008).

Chui ve Chan (1997), lineer olmayan geometri ile yarı-rijit bağlantılı çerçevelerin yerdeğiştirme ve kesit tesirlerindeki değişimi incelemiştir.

Sekulovic vd. (2002), çelik çerçevelerin dinamik davranışı üzerine viskoz sönüm ve yarı rijitliğin etkisini incelemiştir. Yarı rijit kolon-kiriş bağlantılarının iki tipini hem lineer hem de lineer olmayan sistemler için dikkate almışlardır. Aynı çerçevelerin bir de rijit bağlantılar ile analizini gerçekleştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemin sonuçlarını SAP2000 paket programı ile mukayese etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda viskoz sönümlü yarı-rijit bağlantıların çelik çerçevelerin dinamik davranışını önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir.

Sekulovic ve Nefovska-Danilovic (2008), farklı türde deprem etkisine maruz kalan yarı rijit bağlı çok katlı çelik çerçevelerin dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sayısal uygulamalarında geometri ve bağlantı davranışının lineer olmama durumunu dikkate almışlardır. Bağlantıların esnekliğini lineer olmayan yaylarla ve paraleldeki amortisörlerle idealleştirmişlerdir. Yarı rijit bağlantıların deprem etkisinde önemli bir zarara uğramadan açığa çıkan enerjinin büyük bir kısmını alabilme yeteneğinde olduklarını ve sismik bölgelerde rijit çelik çerçevelerden daha iyi bir davranış sergilediklerini belirtmişlerdir.

Yarı rijit bağlantılarla çelik yapıların stokastik statik analizi üzerine birkaç çalışma mevcut olmasına rağmen bu tür sistemlerin stokastik dinamik analizi ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

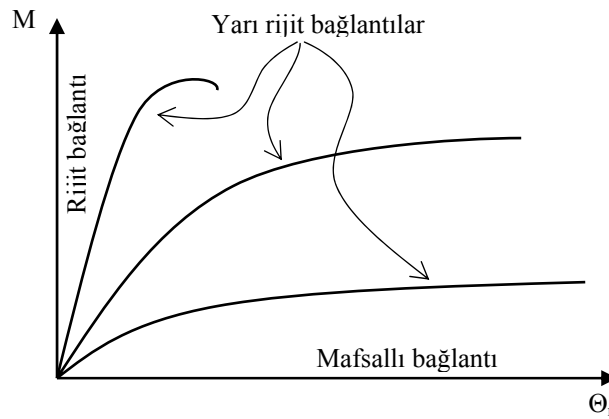
Gao ve Haldar (1995), çalışmalarında özellikle çelik yapılar için uygulanabilen, çerçeve yapıların tasarımı için bir lineer olmayan SFEM önermişlerdir. Çalışmalarında malzeme ve geometrik özellikler, bağlantı parametreleri ve dış yükler rastgele değişken olarak dikkate alınmıştır. Önerilen yöntem çerçevelerin analizi ve tasarımı için şu anki mevcut stokastik çözümlere bir alternatif olarak kullanılabilir.

Sakurai vd. (2001), yarı rijit bağlantılarla çelik çerçevelerin stokastik statik analizini gerçekleştirmişlerdir. Kiriş ve kolonların eğilme rijitliği ve ilk bağlantı rijitliğini rastgele değişken olarak seçen yazarlar, belirsizliklerden dolayı çerçeve sistemlerde oluşan yerdeğiştirmeleri PSFEM'i kullanarak elde etmişlerdir.

### 1.5. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Sistemlerin Analizi ile İlgili Çalışmalar

Kirişten kolona olduğu gibi bir elemandan diğerine transfer edilen kuvvetlerin ve momentlerin arasında bağlantılar bulunmaktadır. Üç boyutlu çerçevelerde kirişten kolona transfer edilen kuvvetler aksenal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momentidir. Birçok bağlantı için aksenal ve ona dik bağıl yerdeğiştirmeler açısal bağıl yerdeğiştirmelere göre daha küçük olmaktadır. Bu nedenle önceki yerdeğiştirmeler birçok çalışmada göz önüne alınmazlar. Ayrıca, burulmaya karşı da bağlantının rijit olduğu kabul edilmektedir.

Açısal bağıl yerdeğiştirmeler bağlantıdaki momentin bir fonksiyonu olarak tarif edilmektedir. Bir bağlantıya  $M$  momenti uygulandığında kiriş ve kolon arasında bağıl dönme meydana gelmektedir. Bu dönme kiriş ve kolon eksenleri arasındaki açının değişimini göstermektedir. Uygulanan moment neticesinde bağlantılarda bağıl dönmeler meydana gelmesine rağmen geleneksel hesaplama yöntemlerinde kiriş kolon bağlantı davranışı idealleştirilerek mafsallı veya tam rijit olarak ele alınmaktadır. Mafsallı bağlantı, kolon ve kiriş arasında moment aktarılmayacağını, kiriş ve kolonun bağımsızca dönebileceğini belirtmektedir. Diğer bağlantı kabulü olan tam rijit bağlantıda ise kolon ve kiriş eksenleri arasındaki açının deformasyonlar ile değişmeden kaldığı kabul edilmektedir. Oysa bağlantı davranışını incelemek için yapılan deneysel çalışmalar neticesinde bağlantı davranışının bu iki ideal durum arasında değiştiğini göstermektedir (Şekil 4). Buna göre, herhangi bir bağıl dönme değeri için bağlantının rijitliği arttıkça aktarabileceği moment de artmaktadır.



Şekil 4. Kiriş-kolon bağlantıları



Kompozit elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin yarı rijit bağılı olması durumu da yeterli sayıda olmamakla beraber son on yıl boyunca bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Leon (1998), çalışmasında sismik yüklere maruz kalan yarı rijit bağılı kompozit çerçevelerin tasarım problemlerine uygun çözüm yöntemi önermiştir. Tam rijit bağılı ve yarı rijit bağılı çerçeve sistemlerin çözüm yöntemlerinin farklı olduğunu ve sismik yüklere maruz çerçevelerde yarı rijitlik etkisinin göz önüne alınması gereken bir husus olduğunu vurgulamıştır.

Dissanayake vd. (1999), kompozit eğik elemanlı çerçevelerde bağlantı sürekliliğinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, hem yerdeğiştirmenin limit durumu hem de eğilme direncinin limit durumunda kirişlerin performansında önemli artışlar elde etmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, kiriş-kolon bağlantılarının yarı rijit olarak bağlanması durumunda elde edilen artışların hem rijitlik hem de dayanıma önemli katkı sağlayacağını belirtmektedirler.

Fang vd. (1999), çalışmalarında yarı rijit çelik-beton kompozit çerçevelerin geometrik ve malzeme bakımından lineer olmayan davranışının dikkate alındığı bir yöntem geliştirmişlerdir. Böylece, uç kısımlardaki bağlantıları içeren kompozit kiriş kolon elemanların yeni bir eleman rijitlik matrisini formüle etmişlerdir. Önerdikleri analitik programı sayısal uygulamalarla örneklendirmişlerdir. Kompozit bağlantılarda eğilme momenti etkisini inceleyerek, çalışmanın sonucunda pratik tasarım amaçları için lineer modellemenin yeterli doğrulukta olacağını belirtmişlerdir.

Rex ve Easterling (2002), kompozit kiriş-kiriş bağlantılarının moment-dönme davranışının etkisini deneysel ve analitik olarak çalışmışlardır. Yarı rijitliğin yapı sistemlerinin davranışı üzerinde önemli etkisinin olduğunu ve bu tür etkiler dikkate alınarak yapılan araştırmaların ülke ekonomisine katkıda bulunulacağını altını çizmişlerdir.

Velasco vd. (2006), yarı rijit bağlantılar ile çelik ve kompozit portal çerçevenin analizini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizlerde, ANSYS sonlu eleman programını kullanmışlardır. Gerçekleştirilen analizlerde, modellerin yarı rijitliğinin yanı sıra malzeme ve geometrik bakımdan lineer olmayan davranış da dikkate alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda, inceledikleri çerçeve modellerinde çelik ağırlığına göre, geleneksel ekonomik çözümlerle mukayese edildiğinde %15'e kadar ekonomiye ulaşabilmişlerdir.

Wong vd. (2007), yarı rijit kolon-kiriş bağlantıları ile kompozit çerçevelerin yanal kuvvet analizi için orijinal Muto yöntemini bu durumları da kapsayacak şekilde biraz değiştirmişlerdir. Önerilen yöntemin doğruluğunu mukayese etmek için çok katlı ve çok açıklıklı yarı rijit bağlantılar ile çelik çerçeve bir sistem başka bir sonlu eleman programı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Wang ve Li (2008), çalışmalarında düşey yükler etkisindeki yarı rijit bağlı kompozit çerçevelerin tasarımı için bir pratik yöntem sunmuşlar ve kolonların etkili uzunluk faktörü ve çerçeve kirişlerin yerdeğiştirmesini hesaplamak için kiriş kolon bağlantılarının dönme rijitliklerini belirlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda yarı rijit bağlı kompozit çerçevelerin sadece çelikten oluşan çerçeve sistemlerden daha etkili ve ekonomik olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri yöntem sonucunda, geleneksel bağlı rijit çerçevelerin tasarım sonuçlarıyla mukayese edildiği zaman yarı rijit bağlı kompozit çerçevelerin çok daha etkili çözümler sağladığını göstermişlerdir.

Yarı rijit bağlantılara sahip kompozit elemanlardan oluşan yapısal sistemlerin stokastik çözümlemesi üzerine ise bir çalışmaya rastlanmamıştır.

## 1.6. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapı sistemlerinin analizinde kullanılan hesap yöntemlerinin doğruluğu, yapılardaki belirsizliklerin de dikkate alınmasıyla bir adım ileriye götürülmüş olmaktadır. Buna göre, rastgele geometri ve malzeme özelliklerine sahip yapısal sistemlerin çözümlemesi için, perturbasyon esaslı SFEM analizinin mevcut uygulama alanlarını inceleyerek, literatürde henüz sıkça karşılaşılmayan bazı uygulama alanları (kompozit kesitli ve/veya yarı rijit bağlı sistemler) için yeni yöntemler geliştirmek, bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, belirsizlik durumlarını da dikkate alarak yapıların olasılıklı analizi için geliştirilen en yaygın iki yöntemin PSFEM ve MCS yöntemi olduğu belirlenmiştir. Perturbasyon esaslı SFEM yöntemi en yalın haliyle Kleiber ve Hien (1992) tarafından formüle edilmiş ve SFEDYN adlı bilgisayar programıyla açık kod haline dönüştürülmüştür. SFEM'in dinamik analiz uygulamalarını göstermek amacıyla deprem yükü altında iki ve üç boyutlu basit ve yarı karmaşık çerçeve sistemlere ve daha kompleks köprü modellerine bu yöntem uygulanmış ve analizler sonucunda malzeme ve geometrik özelliklerin rastgele değişken olması durumunda yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri elde

edilerek, sonuçlar MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve yalın haliyle bu yöntemin doğruluğu öncelikli olarak tartışılmıştır.

Yine çalışmada kompozit elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin, literatürde yaygın örnekleri bulunmayan, stokastik dinamik analizi geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece son zamanlarda kullanım alanı oldukça yaygınlaşan kompozit kesitlerden oluşmuş yapı sistemlerinin rastgele değişen malzeme ve geometrik özellikler altında stokastik dinamik analiz yöntemi de elde edilmiş olmaktadır.

Çalışmada üzerinde durulan bir diğer husus da yarı rijit bağlı sistemlerin stokastik dinamik analizi olmaktadır. Yapı birleşim noktalarını daha gerçekçi bir şekilde dikkate alarak sonuca ulaşan bu hesap yöntemini kullanan bir bilgisayar programı geliştirmek de ayrıca bu çalışmanın kapsamı içinde yer almaktadır.

Son olarak ise stokastik sonlu elemanlar yöntemine göre geliştirilen yarı rijit bağlantılı kompozit yapı sistemlerinin, literatürde tespit edilemeyen üç boyutlu rijitlik matrisi elde edilmiş olup böylece yarı rijit bağlantılara sahip kompozit kesitli yapı sistemlerinin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Geliştirilen yöntemlerin her biri malzeme ve geometri özelliklerinin rastgele değişmesi durumları göz önünde bulundurularak, en sık karşılaşılan yapısal sistemler olan çerçeve ve köprü modellerine uygulanmıştır. Böylece bu çalışmayla, PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri karşılaştırılarak sonuçlar ortaya konulmaktadır.

### **1.7. Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi (SFEM) Formülasyonu**

Yapı sistemlerinde belirsizlikler yapı davranışında önemli değişikliklere sebep olabilmektedir. Yapı sistemlerinin analizinde kullanılan mühendislik yöntemlerinin çoğu bu analizlerde belirsizlik durumları söz konusu olmasına rağmen, geometrik ve malzeme özelliklerinin deterministik olduğu kabulüne göre çözümlemeleri gerçekleştirmektedir.

Belirsizliklere sahip olan yapısal sistemler stokastik veya rastgele sistemler olarak adlandırılmaktadır. Böyle sistemler için belirsizlikler geometri, malzeme özellikleri ve yükleme durumları ile ilişkilidir. Rastgeleliği veya stokastikliği ifade eden belirsizlik, zamana bağımlı ve zamandan bağımsız olarak iki şekilde gruplandırılabilir. Malzeme ve

geometrik özelliklere bağlı belirsizlik zamandan bağımsız, yükleme ve çevresel koşullardaki belirsizlik ise zamana bağımlı olarak değerlendirilebilmektedir (Zheng, 1999).

Bir yapısal sistemin stokastik analizinin amacı sistemde var olan temel tepki mekanizmasını anlayarak mühendise tasarım imkanı sağlamaktır. Malzeme ve geometrik özelliklerin rastgele değişimini içeren mühendislik problemlerini anlamak pek kolay değildir. Stokastik sistemlerin analizi için değişik yöntemler araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada bu yöntemlerden perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo Simülasyon (MCS) yöntemi ele alınmıştır. MCS yöntemi daha çok PSFEM'den elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Bu iki yöntem detaylı olarak daha sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

### **1.7.1. Yapılardaki Belirsizliklerin Kaynakları**

Yapılardaki belirsizlikler iki temel kaynaktan ortaya çıkmaktadır (Prasthofer ve Beadle, 1975):

- 1) İstatistiksel kaynak,
- 2) İstatistiksel olmayan kaynak.

1) İstatistiksel kaynak; malzeme ve geometrik özelliklerdeki rastgele değişimlerin sebep oluşu rijitlik, kütle veya sönüm dalgalanmalarından dolayı oluşan belirsizliklerdir. Uygulanan yükler de stokastik olgu olarak düşünülebilir. Aslında pratikte karşılaşılan çoğu yapısal uyarımlar (deprem, rüzgar v.d) stokastik bir doğa sergilemektedirler.

2) İstatistiksel olmayan kaynak; geometri, sınır şartları ve malzemelerdeki temel davranışın doğru olmamasından ve matematik modellemede karşılaşılan varsayımlardan dolayı oluşan belirsizlikleri kapsamaktadır.

Ayrıca bir sonlu eleman model gibi yapısal modeller düşünüldüğünde belirsizlik kaynakları, sınır koşulları, modellemede eleman rijitliği, modal sönüm katsayıları, yay katsayıları veya yapı zemin etkileşimi düşünüldüğü zaman zemin rijitliği olabilmektedir.

### **1.7.2. Rastgele Değişken**

Bir değişkenin alacağı sayısal değer önceden tam olarak belirlenemiyorsa, bu değişken rastgele değişken olarak kabul edilebilir. Böyle bir değişkenin belirli bir değeri alması veya aldığı değer belirlenmiş bir aralıkta bulunması olasılığı belirlenebilir. Rastgele değişkenin olasılık problemlerinin çözümünde önemli bir yeri bulunmaktadır.

### 1.7.3. Olasılıklı Yoğunluk Fonksiyonu (PDF)

Olasılıklı yoğunluk fonksiyonu, bir rastgele değişkenin verilen bir değeri için olasılık paylaşılan bir fonksiyondur.  $X$  sürekli rastgele değişken olsun,

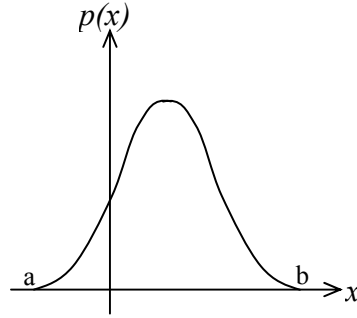
$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b p(x)dx \quad (1)$$

Yani olasılık, Şekil 5'te gösterildiği gibi  $X[a, b]$  aralığında bir değer aldığı zaman yoğunluk fonksiyonunun grafiğinin altında kalan alan olmaktadır.  $p(x)$ 'in grafiği olasılıklı yoğunluk eğrisi olarak isimlendirilmektedir. Verilen rastgele değişken  $X$  için PDF olarak aşağıdaki üç koşulu sağlayan herhangi bir  $p(x)$  fonksiyonu seçilebilir.

$$1) p(x) \geq 0$$

$$2) \int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1 \quad (2)$$

$$3) \Pr(a \leq X \leq b) = \int_a^b p(x)dx$$



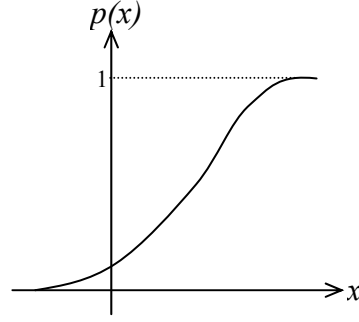
Şekil 5. Olasılıklı yoğunluk fonksiyonu  
(Kleiber ve Hien, 1992).

Bir yığılımlı dağılım fonksiyonu (CDF), PDF'nin integralinin alınmasından ibarettir.

$$P(a) = \int_{-\infty}^a p(x)dx = \Pr(X \leq a) \quad (3)$$

$P(a)$  rastgele değişken,  $X$  a'dan küçük veya ona eşit bir değere sahip olacak olasılıktır. CDF aşağıdaki özelliklere sahip olan artan bir fonksiyondur (Şekil 6).

- 1)  $P(-\infty) = 0$
  - 2)  $0 \leq P(x) \leq 1$
  - 3)  $P(+\infty) = 1$
- (4)



Şekil 6. Yığışımlı dağılım fonksiyonu (Kleiber ve Hien, 1992).

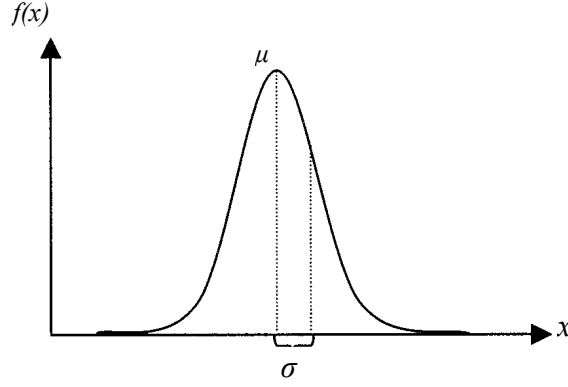
#### 1.7.4. Normal Dağılım

Olasılıklı dağılım yöntemlerinden Gaussian veya normal dağılım, mühendislikte geniş bir kullanım alanına sahiptir. Uygulamada birçok rastgele değişken ya normal dağılımlı rastgele değişkendir ya da normal dağılıma sahip rastgele değişkene dönüştürülebilir (Solnes, 1997). Sürekli değişken  $X$ , standart sapma ( $\sigma$ ) ve ortalama ( $\mu$ ) ile Gaussian dağılıma sahip olsun;

$-\infty < \mu < \infty$  ve  $0 < \sigma$  olduğu zaman  $X$ 'in olasılıklı dağılım fonksiyonu

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (5)$$

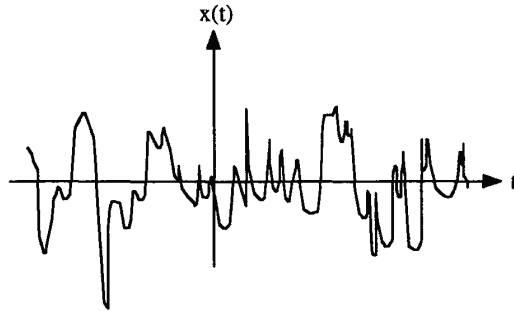
Şekil 7'de normal dağılımın şekli verilmiştir. Bir yapının geometri ve malzeme özelliklerinde karşılaşılan istatistiksel değişimlerin çoğu bu dağılım ile temsil edilebilmektedir.



Şekil 7. Normal dağılım eğrisi

### 1.7.5. Rastgele Değişkenin Ortalama Değeri

Rastgelelik için sebep ne olursa olsun, rastgele olayların olduğu birçok durumda sonuçların ortalamalarının kesin olması, olayın birçok kez tekrarlanması ile mümkündür. Şekil 8'deki gibi rastgele bir dalga hareketi düşünülürse, bu dalga hareketinin matematiksel olarak tanımlanabilmesi mümkün değildir. Dalga hareketini tanımlayabilmek için dalga hareketine ait ortalamaların belirlenmesi gerekmektedir. Rastgele bir değişkenin alacağı değerleri kesin olarak belirlemek mümkün değildir. Ancak dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonunun bilinmesi, rastgele değişkenin tamamen karakterize edilmesi için yeterlidir. Fakat birçok pratik problemde rastgele değişkenin tam karakterize edilmesi kolay olmamakla birlikte gerekli de değildir. Bunun yerine, ortalama değer ve standart sapma gibi rastgele değişkenin önemli özelliklerini belirleyen, istatistiksel bir takım parametreler kullanılabilir (Peebles, 1987). Rastgele analizlerde ortalamalarla çalışmak tüm olasılık ifadesi ile çalışmaktan çok daha kolay olduğu gibi, rastgele olaydan elde edilmeleri de daha kolaydır.



Şekil 8. Rastgele dalga hareketi

### 1.7.6. Perturbasyon Esaslı Stokastik Sonlu Elemanlar Yöntemi (PSFEM) Formülasyonu

PSFEM belirsiz sistemleri analiz etmek için en yaygın olarak kullanılan stokastik sonlu eleman yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, Taylor serileri yardımıyla kendi ortalama değerleri etrafında bir belirsiz sistemin bütün rastgele değişkenleri genişletilerek oluşturulmaktadır ve rastgele değişkenlerin küçük değişiminden dolayı bir yapının mod şekilleri, doğal frekansları gibi istenilen tepki niteliklerinin değişimi için analitik ifadenin türevini almaktan ibarettir. 1960 yılından beri perturbasyon yöntemi stokastik sonlu eleman problemlerini çözmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Boyce ve Goodwin (1964) rastgele giriş ve yayların özdeğer probleminin çözümü için perturbasyon yöntemini ilk kullananlardandır.

N serbestlik dereceli bir sistemin deterministik hareket denklemi,

$$M_{\alpha\beta}\ddot{q}_\beta + C_{\alpha\beta}\dot{q}_\beta + K_{\alpha\beta}q_\beta = Q_\alpha \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $K_{\alpha\beta}, M_{\alpha\beta}, C_{\alpha\beta}$  sırasıyla sistemin rijitlik, kütle ve sönüm matrislerini,  $\ddot{q}_\beta, \dot{q}_\beta, q_\beta$  ise sırasıyla toplam ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini,  $Q_\alpha$  ise dış yük vektörünü göstermektedir. PSFEM yaklaşımı deterministik denklemlerden başlayarak elde edilen denklemlerin ikinci dereceye kadar türetilmesinden oluşmaktadır.

Tek rastgele değişkenli sistemin dinamik davranışını tanımlayan perturbasyon esaslı stokastik sonlu eleman denklemleri (Kleiber ve Hien 1992):

Sıfırıncı-derece ( $(q_\alpha^0(b_l^0; \tau), \alpha = 1, 2, \dots, N)$  için N lineer eşzamanlı sıradan fark denklemlerinin bir sistemi,  $\mathcal{C}^0$  terim)

$$M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) = Q_\alpha^0(b_l^0; \tau) \quad (7)$$

Birinci-derece ( $(q_\alpha^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau), \rho = 1, 2, \dots, N^-, \alpha = 1, 2, \dots, N)$  için N lineer eşzamanlı sıradan fark denkleminin  $N^-$  sistemleri,  $\mathcal{C}^1$  terim)

$$M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) = Q_\alpha^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) - [M_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau)] \quad (8)$$



İkinci-derece  $((q_\alpha^2(b_l^0; \tau), \alpha = 1, 2, \dots, N)$  için N lineer eşzamanlı sıradan fark denklemlerinin bir sistemi,  $\mathbb{C}^2$  terim)

$$\begin{aligned} M_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^0(b_l^0)q_\beta^{\cdot\rho}(b_l^0; \tau) &= \{Q_\alpha^{\cdot\rho\sigma}(b_l^0; \tau) \\ - 2[M_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^{\cdot\sigma}(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^{\cdot\sigma}(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_l^0)q_\beta^{\cdot\sigma}(b_l^0; \tau)] & \quad (9) \\ - [M_{\alpha\beta}^{\cdot\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + C_{\alpha\beta}^{\cdot\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau) + K_{\alpha\beta}^{\cdot\rho\sigma}(b_l^0)q_\beta^0(b_l^0; \tau)]\} S_b^{\rho\sigma} \end{aligned}$$

$$q_\alpha^{(2)}(b_l^0; \tau) = q_\alpha^{\cdot\rho\sigma}(b_l^0; \tau) S_b^{\rho\sigma} \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Bu formülasyonlarda  $b_\ell^0$ ,  $M_{\alpha\beta}^0$ ,  $C_{\alpha\beta}^0$ ,  $K_{\alpha\beta}^0$ ,  $Q_\alpha^0$ ,  $q_\beta^0$  ve  $S_b^{\rho\sigma}$  sırasıyla düğüm noktası rastgele değişkenlerinin vektörü, sistem kütle matrisi, sönüm matrisi, sistem rijitlik matrisi, yük vektörü, yerdeğiştirme ve düğüm noktası rastgele değişkenlerinin kovaryans matrisini ifade etmektedir.  $N^-$  düğüm noktası rastgele değişkenlerinin ve N de sistemdeki serbestlik derecelerinin sayısıdır.

(7-10) nolu denklemlerde sıfıncı derece kütle, sönüm, rijitlik matrisleri ve yük vektörlerinin  $b_\ell$  düğüm noktası rastgele değişkenine göre birinci ve ikinci türevleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Sıfıncı derece fonksiyonlar;

$$M_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \ell_{\bar{\alpha}}^0 \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} d\Omega \quad (11)$$

$$C_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} (\varphi_{\bar{\alpha}}^0 \ell_{\bar{\beta}}^0 \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} + \beta_{\bar{\alpha}}^0 C_{ijkl\bar{\beta}}^0 B_{ij\alpha} B_{kl\beta}) d\Omega \quad (12)$$

$$K_{\alpha\beta}^0(b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} C_{ijkl\bar{\alpha}}^0 B_{ij\alpha} B_{kl\beta} d\Omega \quad (13)$$

$$Q_\alpha^0(b_\ell^0; \tau) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} \ell_{\bar{\alpha}}^0 f_{i\beta}^0 \varphi_{i\alpha} d\Omega + \int_{\partial\Omega_\sigma} \varphi_{\bar{\alpha}} \hat{t}_{i\bar{\alpha}}^0 \varphi_{i\alpha} d(\partial\Omega) \quad (14)$$

Birinci kısmi türevler

$$M_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \ell_{\bar{\alpha}}^{\cdot\rho} \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} d\Omega \quad (15)$$

$$\begin{aligned} C_{\alpha\beta}^{\cdot\rho}(b_\ell^0) &= \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} [(\alpha_{\bar{\alpha}}^{\cdot\rho} \ell_{\bar{\beta}}^0 + \alpha_{\bar{\alpha}}^0 \ell_{\bar{\beta}}^{\cdot\rho}) \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} \\ &+ (\beta_{\bar{\alpha}}^{\cdot\rho} C_{ijkl\bar{\beta}}^0 + \beta_{\bar{\alpha}}^0 C_{ijkl\bar{\beta}}^{\cdot\rho}) B_{ij\alpha} B_{kl\beta}] d\Omega \end{aligned} \quad (16)$$

$$K_{\alpha\beta}^{:\rho} (b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} C_{ijkl\bar{\alpha}}^{:\rho} B_{ij\alpha} B_{kl\beta} d\Omega \quad (17)$$

$$Q_{\alpha}^{:\rho} (b_\ell^0; \tau) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} (\ell_{\bar{\alpha}}^{:\rho} f_{i\bar{\beta}}^0 + \ell_{\bar{\alpha}}^0 f_{i\bar{\beta}}^{:\rho}) \varphi_{i\alpha} d\Omega + \int_{\partial\Omega\sigma} \varphi_{\bar{\alpha}} \hat{t}_{i\bar{\alpha}}^{:\rho} \varphi_{i\alpha} d(\partial\Omega) \quad (18)$$

İkinci kısmi türevler

$$M_{\alpha\beta}^{:\rho\sigma} (b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \ell_{\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} d\Omega \quad (19)$$

$$C_{\alpha\beta}^{:\rho\sigma} (b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} [(\alpha_{\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} \ell_{\bar{\beta}}^0 + \alpha_{\bar{\alpha}}^{:\rho} \ell_{\bar{\beta}}^{:\sigma} + \alpha_{\bar{\alpha}}^{:\sigma} \ell_{\bar{\beta}}^{:\rho} + \alpha_{\bar{\alpha}}^0 \ell_{\bar{\beta}}^{:\rho\sigma}) \varphi_{i\alpha} \varphi_{i\beta} \\ + (\beta_{\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} C_{ijkl\bar{\beta}}^0 + \beta_{\bar{\alpha}}^{:\rho} C_{ijkl\bar{\beta}}^{:\sigma} + \beta_{\bar{\alpha}}^{:\sigma} C_{ijkl\bar{\beta}}^{:\rho} + \beta_{\bar{\alpha}}^0 C_{ijkl\bar{\beta}}^{:\rho\sigma}) B_{ij\alpha} B_{kl\beta}] d\Omega \quad (20)$$

$$K_{\alpha\beta}^{:\rho\sigma} (b_\ell^0) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} C_{ijkl\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} B_{ij\alpha} B_{kl\beta} d\Omega \quad (21)$$

$$Q_{\alpha}^{:\rho\sigma} (b_\ell^0; \tau) = \int_{\Omega} \varphi_{\bar{\alpha}} \varphi_{\bar{\beta}} (\ell_{\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} f_{i\bar{\beta}}^0 + \ell_{\bar{\alpha}}^{:\rho} f_{i\bar{\beta}}^{:\sigma} + \ell_{\bar{\alpha}}^{:\sigma} f_{i\bar{\beta}}^{:\rho} + \ell_{\bar{\alpha}}^0 f_{i\bar{\beta}}^{:\rho\sigma}) \varphi_{i\alpha} d\Omega \\ + \int_{\partial\Omega\sigma} \varphi_{\bar{\alpha}} \hat{t}_{i\bar{\alpha}}^{:\rho\sigma} \varphi_{i\alpha} d(\partial\Omega) \quad (22)$$

(11)-(22) numaralı denklemlerdeki bütün fonksiyonlar düğüm noktası rastgele değişkeninin ( $b_\ell$ )  $b_\ell^0$  ortalamalarında değerlendirilmiştir. Burada  $\Omega$  ve  $\partial\Omega$  bir sonlu eleman aralığı ve üç boyutlu sınırı,  $\varphi_{i\alpha}$ ,  $\varphi_{\bar{\alpha}}$  ise sistem şekil fonksiyon matrisi ve  $\bar{\alpha}$  'ncı düğüm noktası için şekil değiştirme fonksiyonunu göstermektedir.  $B_{ij\alpha}$  şekil değiştirme düğüm noktası yerdeğiştirme matrisi,  $\ell$  korelasyon katsayısı,  $C_{ijkl\bar{\alpha}}$   $\bar{\alpha}$  'ncı düğüm noktası için temel tansörü göstermektedir.  $f_i$  ve  $\hat{t}_i$  ise cisim kuvvetlerinin vektörü ve sınır çekmelerin vektörüdür.  $(\cdot)^0$ ,  $(\cdot)^{\rho}$  ve  $(\cdot)^{\rho\sigma}$  rastgele değişkenlerin ortalamalarını alan sıfırıncı derece nicelikleri, düğüm noktası rastgele değişkenlerine göre birinci kısmi türevleri ve düğüm noktası rastgele değişkenlerine göre ikinci kısmi türevlerini ifade etmektedir.

Perturbasyon esaslı SFEM analizi rastgele değişkenlerin yalnızca ilk iki momentinin bilinmesine ihtiyaç duymaktadır. Bu yöntemin amacı tepki niceliklerinin birinci ve ikinci momentlerini (ortalama ve varyans) hesaplamaktır. MCS gibi istatistiksel

teknikler ise pratikte mevcut olmayan olasılıklı yoğunluk fonksiyonlarının bilinmesini gerektirmektedir. Stokastik sonlu elemanlar yöntemi, (7) - (10) denklemlerinde de görüldüğü gibi rastgele değişkenlerin her biri için sıfıncı derece denklemlerin, birinci derece denklemlerin ve ikinci derece denklemlerin bir sistemini ele almaktadır. Gerekli olan lineer sistem çözümlerinin sayısı düğüm noktası rastgele değişkenlerinin iki fazlasına eşittir. Üstelik bu yöntem istatistiksel yöntemlerdeki gibi rastgele alanların bazı limitleri için analizi kısıtlamamaktadır. Perturbasyon esaslı SFEM normal bir yaklaşım gerekli olmadan hem homojen hem de homojen olmayan rastgele alanlara uygulanabilir (Zhang vd., 1996). Bu istatistiksel olmayan teknik rastgele alan değişkenlerinin dalgalanmaları az olduğu zaman çok etkili bir şekilde çalışmaktadır ve değişim katsayısı (COV) 0.15 değerine kadar oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Kleiber ve Hien 1992; Bayraktar vd., 2007).

(7)-(9) denklemlerinin sol tarafında yer alan kütle, sönüm, rijitlik matrisleri ve yük vektörleri  $(M_{\alpha\beta}^0, C_{\alpha\beta}^0, K_{\alpha\beta}^0, Q_\alpha^0)$  deterministik sistemle ilgilidir ve geleneksel sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenebilirler. Düğüm noktası rastgele değişkenlerine göre  $M_{\alpha\beta}, C_{\alpha\beta}, K_{\alpha\beta}$  ve  $Q_\alpha$ 'nın birinci ve ikinci kısmi türevleri, bu matrisler ve vektörler düğüm noktası rastgele değişkenine göre yakın bir formda açıklanması halinde kesin bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Rastgele alan değişkenleri onların düğüm noktası değerlerine göre açıklandıktan sonra, genel kütle, sönüm, rijitlik matrisleri ve yapısal sistemin yük vektörleri denklemleri oluşturularak ve düğüm noktası rastgele değişkenine göre birinci ve ikinci kısmi türevleri değerlendirilmektedir. (7)-(9) denklemlerinin işlem adımları aşağıdaki gibidir:

a) (7) numaralı denklemde genelleştirilmiş düğüm noktası ivmeleri  $(\ddot{q}_\alpha^0)$ , hızlar  $(\dot{q}_\alpha^0)$  ve yerdeğiştirmeler  $(q_\alpha^0)$  sıfıncı derece için çözülür.

b) (8) numaralı denklemin sağ tarafında yer alan birinci derece yük vektörü oluşturulur ve birinci derece denklemler  $\ddot{q}_\alpha^p, \dot{q}_\alpha^p$  ve  $q_\alpha^p$  için çözülür.

c) (9) numaralı denklemin sağ tarafındaki ikinci derece yük vektörü oluşturulur ve ikinci derece denklem  $\ddot{q}_\alpha^2, \dot{q}_\alpha^2$  ve  $q_\alpha^2$  için çözülür.

d) İfade değişkenleri için beklenen değer ve kovaryanslar değerlendirilir.

Rastgele alanlar için ilk iki istatistiksel moment  $b_r(x_k), r=1,2,\dots,R$ , aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$E[b_r] = b_r^0 = \int_{-\infty}^{+\infty} b_r p_1(b_r) db_r \quad (23)$$

$$Cov(b_r, b_s) = S_b^{rs} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (b_r - b_r^0)(b_s - b_s^0) p_2(b_r, b_s) db_r db_s \quad (24)$$

$r, s = 1, 2, \dots, R$  için

$$S_b^{rs} = \alpha_{b_r} \alpha_{b_s} b_r^0 b_s^0 \mu_{b_r, b_s} \quad (25)$$

$$\alpha_{b_r} = \left[ \frac{Var(b_r)}{b_r^0} \right]^{1/2} \quad \mu_{b_r, b_s} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b_r b_s p_2(b_r, b_s) db_r db_s \quad (26)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;  $E[b_r]$  beklenen değeri,  $Cov(b_r, b_s)$  kovaryansı ve  $Var(b_r)$  varyansı göstermektedir.  $\mu_{b_r, b_s}, \alpha_{b_r}, p_1(b_r)$  ise korelasyon fonksiyonu, değişim katsayısı ve olasılık yoğunluk fonksiyonudur (PDF).  $p_2(b_r, b_s)$  de olasılık yoğunluk fonksiyonunun düğüm noktasıdır. R rastgele değişkendir (elastisite modülü, kütle yoğunluğu, enkesit alanı gibi rastgeleliği göstermektedir). Buradaki bütün denklemler sıfıncı, birinci ve ikinci derece yerdeğiştirmeler, hızlar ve ivmeler için çözülürse; ilk iki olasılıklı moment hesaplanmış olur.

### 1.8. Monte Carlo Simülasyon (MCS) Yöntemi Formülasyonu

Stokastik problemleri ele almakta yaygın olarak olasılıklı yöntemler kullanılmaktadır ve bunlar istatistiksel ve istatistiksel olmayan yaklaşım olarak gruplandırılabilir. Bir önceki bölümde tartışıldığı üzere perturbasyon yöntemi rastgele değişkenlerin ortalama değerlerinden rastgele parametrelerin değişimini kullanarak bu parametrelerin gerçek olasılıklı dağılımını hesaba katmamaktadır. Girdi parametrelerinin gerçek rastgele davranışını hesaplamak için bir sayısal simülasyon programına ihtiyaç duyulmuştur. En yaygın bir şekilde kullanılan sayısal simülasyon tekniği MCS yöntemidir. MCS yöntemi, herhangi bir fiziksel test yapmadan sayısal olarak sonuç üretmek amacıyla kullanılan özel bir tekniktir (Melchers, 1999). Belirsiz parametrelerin değerleri bu teknikte oluşacak problemin olasılıklarını hesaplamak için rastgele bir şekilde seçilmektedir. Bu değerler olasılık dağılımına uygun bir şekilde seçilir ve sabit bir alandan alınır. MCS yönteminde rastgele seçme işlemi doğru sonuca en iyi şekilde ulaşmak için çoğu defa

tekrar edilmektedir. Her bir tekrarda bir değer rastgele olarak seçilir ve o bir olası çözüm oluşturur. Böylece problem için çözüm elde edilmiş olur (Du, 2000).

Bu yöntem hem zamana bağımlı hem de zamandan bağımsız belirsizlik problemlerini ele alabilmektedir. Problem değişkenlerini temsil eden rastgelelik sayıları bir bilgisayar programıyla üretilmektedir. Rastgele ilişkili değişkenler kovaryans matrisin ayırıtılmasıyla üretilmektedir. MCS yönteminin çok yönlü olması önemli bir özelliği olmasına rağmen, istatistiksel yakınsamaları elde etmek için CPU (işlemci) açısından yöntem çok uzun sürmektedir. Bu nedenle bu gerçekçi yöntem daha çok diğer yaklaşık yöntemlerin geçerliliğini kontrol etmek için kullanılmaktadır.

MCS yöntemi diğer bütün yöntemlerin çözmekte başarısız olduğu durumları ele alan oldukça kullanışlı matematiksel bir araçtır. Shinozuka (1972) yapısal dinamik problemlerinin çözümü için bu yöntemi ilk kullananlardandır. Bu yaklaşımı deprem kayıtları, deniz dalgalarının yüksekliği gibi değişik diğer rastgele olguların simülasyonu için kullanmıştır. Zhang ve Chen (1991) ve Zhang ve Ellingwood (1996) da rastgele malzeme özelliklerinin etkilerini elde etmek için bu yöntemi kullananlardandır. Çalışmaların çoğunda MCS yöntemi yaklaşık yöntemlerden elde edilen sonuçları doğrulamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada da, MCS yöntemi perturbasyon esaslı SFEM den elde edilen sonuçları doğrulamak için kullanılacaktır.

Bu yöntem, X rastgele değişkenine ait olasılık yoğunluk fonksiyonuna göre üretilen bir grup rastgele değerlerle işlem yapmaktadır. Değişken için seçilen rastgele değerler  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$  vektörü ile gösterilebilir. Burada N, simülasyon sayısını göstermektedir. Bu yöntemde, her bir X değeri için rijitlik ve kütle matrisleri oluşturulmakta ve elde edilmek istenilen değerler (örneğin; yerdeğiştirme ve gerilme değerleri) hesaplanmaktadır. N simülasyonun sonunda değişkene ait her bir rastgele değer için yerdeğiştirme ve gerilme vektörleri elde edilmektedir.  $\{\{q_{\beta}\}_1, \{q_{\beta}\}_2, \{q_{\beta}\}_3, \dots, \{q_{\beta}\}_N\}$  yerdeğiştirme vektörlerini,  $\{\{\sigma\}_1, \{\sigma\}_2, \{\sigma\}_3, \dots, \{\sigma\}_N\}$  gerilme vektörlerini göstermek üzere yerdeğiştirmenin ve gerilmenin beklenen değerleri (ortalama değerleri);

$$E_{\{q_{\beta}\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{q_{\beta}\}_i \quad (27)$$

$$E_{\{\sigma\}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\sigma\}_i \quad (28)$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır.

### 1.8.1. Rastgele Değişkenlerin Türetilmesi

MCS yönteminde rastgele değişkenler kendi olasılık dağılımına göre oluşturulur. Böyle rastgele değişken üretimleri 0 ve 1 arasında üniform bir şekilde dağılan rastgele sayılar gerektirmektedir. Rastgele sayıların oluşumunun arkasındaki teori aşağıdaki gibidir (Banik, 2003);

Rastgele sayı üretimi modern bilgisayarlarda bir fonksiyon oluşumu ile kolayca sağlatılır. Bu üretimlerde  $X_1, X_2, X_3 \dots$  tamsayıları sıra ile aşağıdaki tekrarlanan denklem ile belirlenir.

$$X_i = (aX_{i-1} + b) - \text{Int}[(aX_{i-1} + b)/c]c; \quad (i=1,2,3\dots) \quad (29)$$

Bu denklemde; Int, kesirli bir sayının tamsayı kısmını; a, çarpan; b, artım sayısı ve c katsayıdır. a, b, c sabitleri pozitif tamsayılardır. Başlangıç değeri  $x_0$  modelin kullanıcı tarafından sağlanması gerekmektedir.  $X_i$  değeri  $(aX_{i-1} + b)$  bölünerek elde edilir ve izin verilen  $X_i$  değeri bölme işleminin kalanıdır. Rastgele sayı  $U_i$ ;

$$U_i = X_i / c \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (30)$$

şeklinde elde edilir.

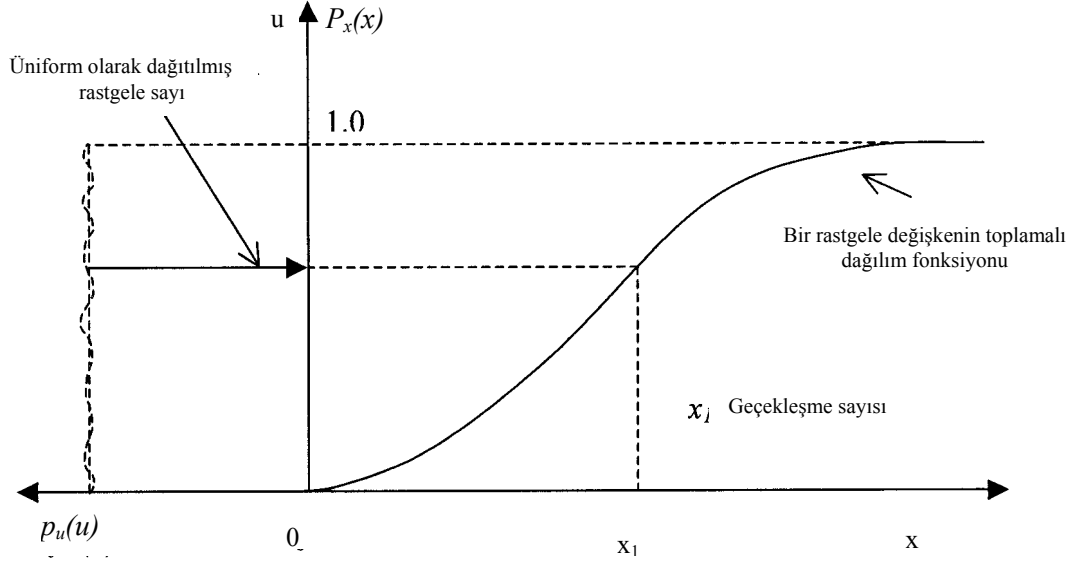
$X_i$  değeri c katsayısına bölünerek normalleştirilir ( $0 \leq X_i \leq c$ ). Bu tekrarlama modeli  $0 < c$ ,  $a < c$ ,  $b < c$  ve  $X_0 < c$  koşullarını sağlaması gerekmektedir.

### 1.8.2. Üniform Olmayan Dağılımlardan Rastgele Sayıların Türetilmesi

Verilen olasılık dağılımından rastgele değişkenleri türetmek için, ters dönüşüm yöntemi basit ve yakın sonuç vermesinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 9'da bu üretimin işlemi görülmektedir. X sürekli rastgele değişken,  $P_x(x)$  onun yığılımlı dağılım fonksiyonu ve u, 0 ve 1 arasında üniform olarak dağılan rastgele bir sayı olmak üzere;

$$X = P_x^{-1}(u) \quad (31)$$

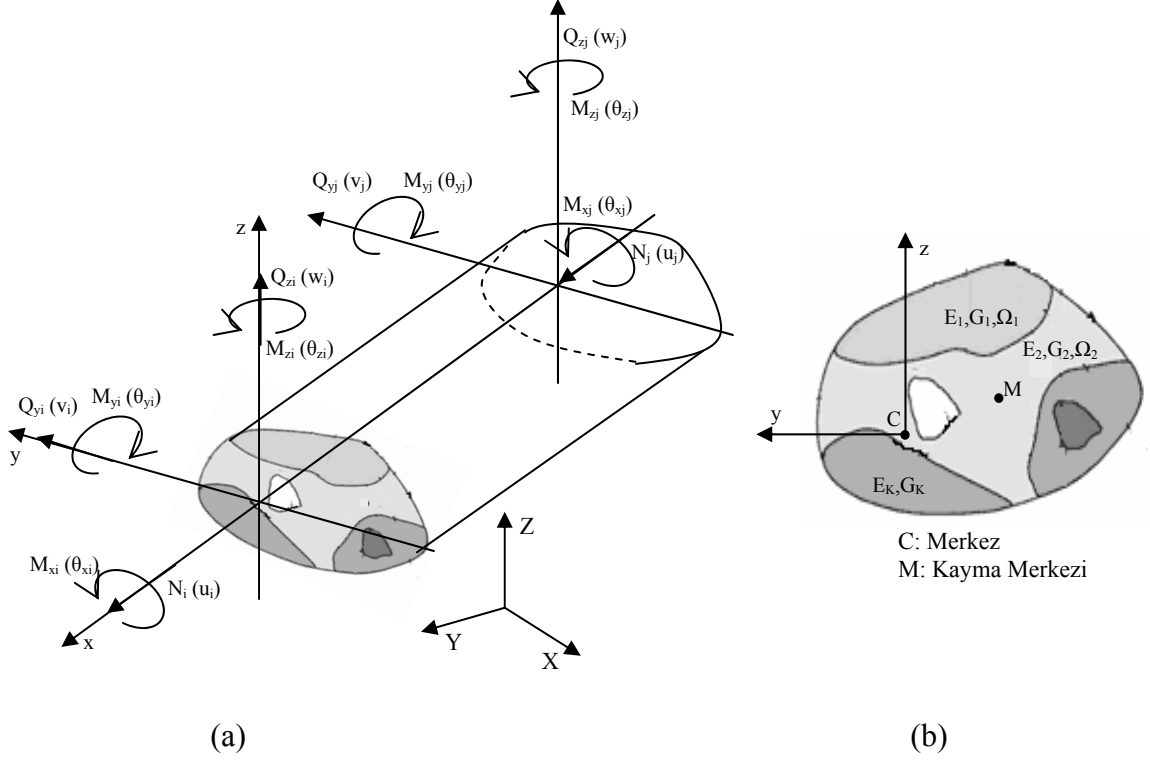
şeklinde belirlenmektedir. Burada  $P_x^{-1}$  rastgele değişken  $X$ 'in yığışımlı dağılım fonksiyonunun tersidir. Bu işlem rastgele sayının ( $u$ ) farklı değerleri kullanılarak gerektiği kadar tekrar edilir.  $P_x(x)$  aralığında  $[0,1]$  için  $x$ 'in tek bir değeri bütün tekrarlar için elde edilir (Banik, 2003).



Şekil 9. Rastgele sayıların türetilmesi için ters dönüşüm yöntemi (Banik,2003).

### 1.9. Üç Boyutlu Kompozit Çerçeve Sistemlerin Rijitlik Matrisi

Homojen olmayan kesitler için elastisite modülü ( $E$ ),  $E=E(y,z)$ 'nin bir fonksiyonudur.  $E_r$ 'nin referans modül olduğunu varsayıp, Şekil 10'da görüldüğü gibi, uzunluğu  $L$  olan üç boyutlu prizmatik bir kiriş eleman ele alınırsa, gelişigüzel şekilli kompozit kesit, sonlu sayıda bileşenden ve her biri birbiriyle temas halinde bulunan malzemeden oluşan, elastisite modülü ( $E_j$ ), kayma modülü ( $G_j$ ), yerel koordinat ( $y-z$ ) düzleminde oluşan bölgenin de ( $\Omega_j$  ( $j= 1,2,\dots, K$ )) olduğu düşünülürse;



Şekil 10. Gelişigüzel şekilli kompozit kesitli prizmatik bir kiriş (a) ve oluşan iki boyutlu bölge  $\Omega$  (b)

Burada  $K$  kompozit kesiti oluşturan malzemelerin sayısını ifade etmektedir. Şekil 10'da görülen bölgelerin malzemelerinin homojen, izotrop ve lineer elastik olduğu varsayılmıştır. Bu şekilden görüldüğü gibi sınır eğriler düzlemdirler ve sonlu sayıda köşelere sahiptirler. Genelleştirmemek kaydı ile burada  $C_{yz}$  ve  $M_{yz}$  sırasıyla kesitin merkezi ve kayma merkezini göstermektedir.

Şekil 10'dan görüldüğü gibi yerel koordinat sistemindeki düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü,

$$\{q_B\}^T = \{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}\} \quad (32)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada;  $u_i, u_j, v_i, v_j, w_i$  ve  $w_j$  sırasıyla  $i$ . ve  $j$ . düğüm noktalarının doğrusal yerdeğiştirmelerini,  $y$  ve  $z$  eksenlerin enine yerdeğiştirmelerini göstermektedir.  $\theta_{xi}, \theta_{xj}, \theta_{yi}, \theta_{yj}, \theta_{zi}$  ve  $\theta_{zj}$  ise,  $i$ . ve  $j$ . düğüm noktalarının  $x, y$  ve  $z$  eksenleri doğrultusundaki dönme yerdeğiştirmelerini göstermektedir.

Şekil 10'dan görüldüğü gibi yerel koordinat sistemindeki düğüm noktası yük vektörü,



$$\{Q_\alpha\}^T = \{N_i, Q_{yi}, Q_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}, N_j, Q_{yj}, Q_{zj}, M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}\} \quad (33)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu ifadede;  $N_i$  ve  $N_j$ , i. ve j. düğüm noktalarının aksel kuvvetini,  $Q_{yi}$ ,  $Q_{yj}$ ,  $Q_{zi}$  ve  $Q_{zj}$  ise, i. ve j. düğüm noktalarının y ve z eksenlerindeki kesme kuvvetini,  $M_{xi}$  ve  $M_{xj}$ , i. ve j. düğüm noktalarının x eksenine doğrultusundaki burulma momentini,  $M_{yi}$ ,  $M_{yj}$ ,  $M_{zi}$  ve  $M_{zj}$  ise i. ve j. düğüm noktalarının y ve z eksenleri doğrultusundaki eğilme momentini göstermektedir.

Denklem (32) ve (33)'teki düğüm noktası yerdeğiştirme ve yük vektörleri, üç boyutlu kompozit kiriş elemanın 12x12 boyutunda yerel rijitlik matrisi ile ilişkilidir.

$$[K_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & 0 & k_{26} & 0 & k_{28} & 0 & 0 & 0 & k_{2,12} \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & k_{35} & 0 & 0 & 0 & k_{39} & 0 & k_{3,11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{4,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{53} & 0 & k_{55} & 0 & 0 & 0 & k_{59} & 0 & k_{5,11} & 0 \\ 0 & k_{62} & 0 & 0 & 0 & k_{66} & 0 & k_{68} & 0 & 0 & 0 & k_{6,12} \\ k_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{82} & 0 & 0 & 0 & k_{86} & 0 & k_{88} & 0 & 0 & 0 & k_{8,12} \\ 0 & 0 & k_{93} & 0 & k_{95} & 0 & 0 & 0 & k_{99} & 0 & k_{9,11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{10,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{10,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{11,3} & 0 & k_{11,5} & 0 & 0 & 0 & k_{11,9} & 0 & k_{11,11} & 0 \\ 0 & k_{12,2} & 0 & 0 & 0 & k_{12,6} & 0 & k_{12,8} & 0 & 0 & 0 & k_{12,12} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Denklem (34)'teki rijitlik matrisinin katsayıları ( $k_{\alpha\beta}$ ) aşağıdaki şekilde yazılabilir (Sapountzakis ve Mokos; 2006):

$$k_{11} = -k_{71} = k_{17} = -k_{77} = \frac{E_r A_x}{L} \quad (35)$$

$$k_{22} = -k_{28} = -k_{82} = k_{88} = \frac{12E_r G_r A I_z}{G_r A L^3 + 12a_y E_r I_z L} \quad (36)$$

$$k_{26} = k_{2,12} = k_{62} = -k_{68} = -k_{86} = -k_{8,12} = k_{12,2} = -k_{12,8} = \frac{6E_r G_r A I_z}{G_r A L^2 + 12a_y E_r I_z} \quad (37)$$

$$k_{33} = -k_{39} = -k_{93} = k_{99} = \frac{12E_r G_r A I_y}{G_r A L^3 + 12a_z E_r I_y L} \quad (38)$$

$$k_{59} = -k_{3,11} = -k_{53} = -k_{35} = k_{95} = k_{9,11} = -k_{11,3} = k_{11,9} = \frac{6E_r G_r A I_y}{G_r A L^2 + 12a_z E_r I_y} \quad (39)$$

$$k_{44} = -k_{4,10} = -k_{10,4} = k_{10,10} = \frac{G_r I_t}{L} \quad (40)$$

$$k_{55} = k_{11,11} = \frac{4E_r G_r I_y A L^2 + 12a_z E_r^2 I_y^2}{G_r A L^3 + 12a_z E_r I_y L} \quad (41)$$

$$k_{5,11} = k_{11,5} = \frac{2E_r G_r I_y A L^2 + 12a_z E_r^2 I_y^2}{G_r A L^3 + 12a_z E_r I_y L} \quad (42)$$

$$k_{66} = k_{12,12} = \frac{4E_r G_r I_z A L^2 + 12a_y E_r^2 I_z^2}{G_r A L^3 + 12a_y E_r I_z L} \quad (43)$$

$$k_{6,12} = k_{12,6} = \frac{2E_r G_r I_z A L^2 + 12a_y E_r^2 I_z^2}{G_r A L^3 + 12a_y E_r I_z L} \quad (44)$$

Bu denklemlerdeki (35-44)  $E_r, G_r, A, L$  ise sırasıyla referans malzemenin elastisite modülü, kayma modülü, kompozit sistemin kesit alanı ve kompozit elemanın uzunluğudur.  $I_y, I_z$  ise, y ve z eksenlerine göre kompozit kesitin atalet momentlerini göstermektedir. A ve  $A_x$  kompozit kesitin enkesit alanını ifade etmektedir ve

$$I_y = \sum_{j=1}^K \frac{E_j}{E_r} \int_{\Omega_j} z^2 d\Omega_j, \quad (45)$$

$$I_z = \sum_{j=1}^K \frac{E_j}{E_r} \int_{\Omega_j} y^2 d\Omega_j$$

$$A = \sum_{j=1}^K \frac{G_j}{G_r} \int_{\Omega_j} d\Omega_j \quad (46)$$

$$A_x = \sum_{j=1}^K \frac{E_j}{E_r} \int_{\Omega_j} d\Omega_j$$

şeklinde elde edilmektedir.

Burulmadan dolayı oluşan çarpılma ihmal edilirse, kompozit kesitin polar atalet momenti ( $I_t$ ):

$$I_t = \sum_{j=1}^K \frac{E_j}{E_r} \int_{\Omega_j} (y^2 + z^2) d\Omega_j \quad (47)$$

Referans malzemenin elastisite modülü kullanılarak denklem (45) ve (46) denklemleri azaltılabilir. Yine benzer şekilde referans malzemenin kayma modülü kullanılarak denklem (47) diğer hiçbir malzemenin kullanılmasına gerek kalmadan kullanılabilir.

Kompozit kesitler için kayma deformasyon katsayıları  $(a_y, a_z)$ , kayma şekildeğiştirme enerji formülünden aşağıdaki gibi elde edilebilir (Pilkey, 2002) :

$$a_y = \frac{A}{E_r \Delta^2} \sum_{j=1}^K \int_{\Omega_j} E_j ((\nabla \psi)_j - d) \cdot ((\nabla \psi)_j - d) d\Omega_j \quad (48)$$

$$a_z = \frac{A}{E_r \Delta^2} \sum_{j=1}^K \int_{\Omega_j} E_j ((\nabla \phi)_j - h) \cdot ((\nabla \phi)_j - h) d\Omega_j$$

Burada;  $(\nabla)_j \equiv i_y (\partial / \partial y) + i_z (\partial / \partial z)$ , bir sembolik vektördür,  $i_y, i_z$  ise y ve z eksenleri boyunca birim vektörlerdir.  $\Delta$  ise aşağıdaki bağıntıdan elde edilebilir;

$$\Delta = 2(1 + \nu) I_y I_z \quad (49)$$

Burada;  $\nu$ , malzemelerin kesit alanının Poisson oranı; d ve h ise vektörlerdir.

$$d = (\nu I_y \frac{y^2 - z^2}{2} i_y + (\nu I_y yz) i_z \quad (50)$$

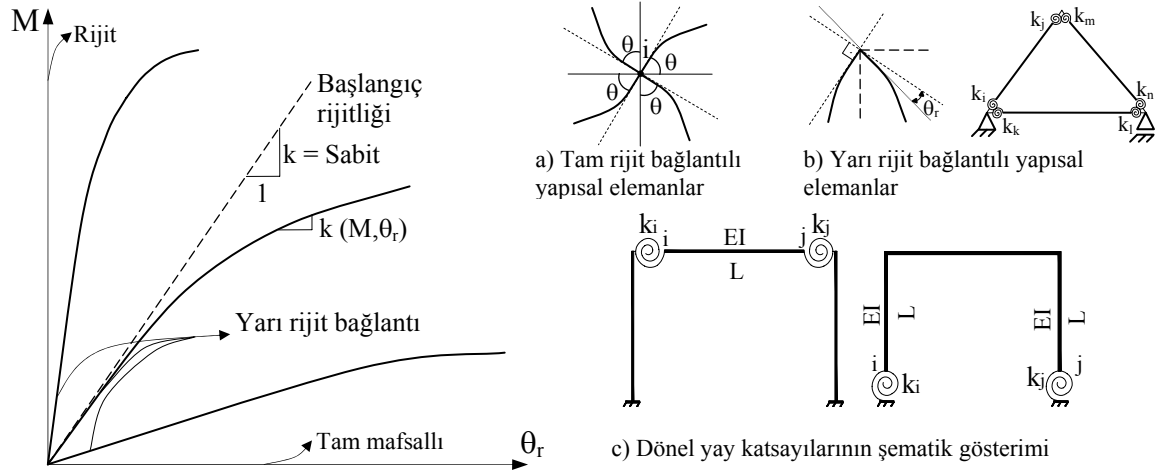
$$h = (\nu I_z yz) i_y + (\nu I_z \frac{z^2 - y^2}{2}) i_z$$

Burada;  $\psi, \phi$  ise gerilme fonksiyonlarıdır (Sapountzakis ve Mokos, 2007).

### 1.10. Üç Boyutlu Yarı Rijit Bağlı Sistemlerin Rijitlik Matrisi

Çerçeve sistemlerin bağlantılarının tam rijit olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Gerçekte, yapısal bağlantılar moment-dönme eğrilerine göre isimlendirilmesi gerekmektedir. Bu eğriler deneysel verilere uygun eğrilerden oluşturulmaktadır. Şekil 11'de moment dönme eğrileri (M- $\theta_r$ ) verilmektedir ve bu şekilden

görüldüğü gibi, moment (M) aynı düğüm noktasına bağlantılı yapısal elemanlar arasındaki rölatif dönmenin bir fonksiyonuna bağlı olmaktadır.



Şekil 11. Yapısal bağlantılar

Bağlantılar çubukların her iki asal düzleminde, çubuk uçlarında sonsuz küçük uzunlukta dönel yaylar olarak tanımlanmıştır. Dönel yayların ilk bağlantı rijitliğini elde edebilmek için, elastisite modülü (E), eylemsizlik momenti (I) ve sürekli enkesit ile ilişkili kirişin uzunluğunun (L) kullanımı çok etkili olmaktadır.

Üç boyutlu çerçeve sistemlerde dönel yayların olması durumunda rijitlik matrisi (Erdem, 1998; McGuire, vd., 1999; Sultan, 2007),

$$[K] = \begin{bmatrix} [k_{11}] & [k_{12}] \\ [k_{21}] & [k_{22}] \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$[k_{11}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} \frac{U_{1z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \frac{U_{2z}}{D_z} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} \frac{U_{1y}}{D_y} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 & \frac{4EI_y}{L} \frac{U_{3y}}{D_y} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \frac{U_{2z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \frac{U_{3z}}{D_z} \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$[k_{12}] = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z U_{1z}}{L^3 D_z} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z U_{4z}}{L^2 D_z} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y U_{1y}}{L^3 D_y} & 0 & -\frac{6EI_y U_{4y}}{L^2 D_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y U_{2y}}{L^2 D_y} & 0 & \frac{2EI_y U_{5y}}{L D_y} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z U_{2z}}{L^2 D_z} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z U_{5z}}{L D_z} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$[k_{22}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z U_{1z}}{L^3 D_z} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z U_{4z}}{L^2 D_z} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y U_{1y}}{L^3 D_y} & 0 & \frac{6EI_y U_{4y}}{L^2 D_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y U_{4y}}{L^2 D_y} & 0 & \frac{4EI_y U_{6y}}{L D_y} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z U_{4z}}{L^2 D_z} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z U_{6z}}{L D_z} \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$[k_{21}] = [k_{12}]^T \quad (55)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Yukarıdaki matrislerde kullanılan kısaltmalar aşağıda verilmektedir.

$$U_{1y} = k_{1y} + k_{2y} + 4k_{1y}k_{2y} \quad (56)$$

$$U_{1z} = k_{1z} + k_{2z} + 4k_{1z}k_{2z}$$

$$U_{2y} = 2k_{1y}(1 + 2k_{2y}) \quad (57)$$

$$U_{2z} = 2k_{1z}(1 + 2k_{2z})$$

$$U_{3y} = k_{1y}(3 + 4k_{2y}) \quad (58)$$

$$U_{3z} = k_{1z}(3 + 4k_{2z})$$

$$U_{4y} = 2k_{2y}(1 + 2k_{1y}) \quad (59)$$

$$U_{4z} = 2k_{2z}(1 + 2k_{1z})$$

$$U_{5y} = 4k_{1y}k_{2y} \quad (60)$$

$$U_{5z} = 4k_{1z}k_{2z}$$

$$U_{6y} = k_{2y}(3 + 4k_{1y}) \quad (61)$$

$$U_{6z} = k_{2z}(3 + 4k_{1z})$$

$$D_y = 3 + 4k_{1y} + 4k_{2y} + 4k_{1y}k_{2y} \quad (62)$$

$$D_z = 3 + 4k_{1z} + 4k_{2z} + 4k_{1z}k_{2z}$$

$$k_{1y} = \frac{k_{iy}L}{4E I_y} \quad (63)$$

$$k_{1z} = \frac{k_{iz}L}{4E I_z}$$

$$k_{2y} = \frac{k_{jy}L}{4E I_y} \quad (64)$$

$$k_{2z} = \frac{k_{jz}L}{4E I_z}$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadelerdeki y ve z eksen takımlarını,  $k_i$  ve  $k_j$  kirişin i. ve j. uçlarındaki dönel yay rijitliklerini göstermektedir. E malzemenin elastisite modülü,  $I_y$  ve  $I_z$  ise sırasıyla y ve z eksenlerine göre kesitin atalet momentlerini göstermektedir.

$$k_{i,j} = \frac{3EI_{i,j}}{(1 - \nu_{i,j})L} \quad (65)$$

Bu bağıntıdaki  $v_i$  ve  $v_j$  düzeltme faktörlerini ifade etmektedir ve yarı rijitliği yüzde olarak göstermektedir (Sekulovic ve Salatic, 2001).

$$v_{i,j} = \frac{k_{i,j}L}{3EI + k_{i,j}L} \quad (66)$$

### 1.11. Üç Boyutlu Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Sistemlerin Rijitlik Matrisi

Önceki bölümlerde kullanılan rijitlik matrisi formülasyonları kompozit kesitlerden oluşan sistemler veya yarı-rijit bağlı sistemler için geçerli olmaktadır. Ancak, kompozit kesitlerden oluşmuş ve aynı zamanda yarı-rijit bağlantılara sahip yapısal sistemler için sistem rijitlik matrisi,

$$[K_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} \frac{U_{1z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{26} \frac{U_{2z}}{D_z} & 0 & k_{28} \frac{U_{1z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{2,12} \frac{U_{4z}}{D_z} \\ 0 & 0 & k_{33} \frac{U_{1y}}{D_y} & 0 & k_{35} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 & 0 & 0 & k_{39} \frac{U_{1y}}{D_y} & 0 & k_{3,11} \frac{U_{4y}}{D_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{4,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{53} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 & k_{55} \frac{U_{3y}}{D_y} & 0 & 0 & 0 & k_{59} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 & k_{5,11} \frac{U_{5y}}{D_y} & 0 \\ 0 & k_{62} \frac{U_{2z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{66} \frac{U_{3z}}{D_z} & 0 & k_{68} \frac{U_{2z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{6,12} \frac{U_{5z}}{D_z} \\ k_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{82} \frac{U_{1z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{86} \frac{U_{2z}}{D_z} & 0 & k_{88} \frac{U_{1z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{8,12} \frac{U_{4z}}{D_z} \\ 0 & 0 & k_{93} \frac{U_{1y}}{D_y} & 0 & k_{95} \frac{U_{2y}}{D_y} & 0 & 0 & 0 & k_{99} \frac{U_{1y}}{D_y} & 0 & k_{9,11} \frac{U_{4y}}{D_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{10,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{10,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{11,3} \frac{U_{4y}}{D_y} & 0 & k_{11,5} \frac{U_{5y}}{D_y} & 0 & 0 & 0 & k_{11,9} \frac{U_{4y}}{D_y} & 0 & k_{11,11} \frac{U_{6y}}{D_y} & 0 \\ 0 & k_{12,2} \frac{U_{4z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{12,6} \frac{U_{5z}}{D_z} & 0 & k_{12,8} \frac{U_{4z}}{D_z} & 0 & 0 & 0 & k_{12,12} \frac{U_{6z}}{D_z} \end{bmatrix} \quad (67)$$

şeklinde ortaya konmaktadır. Burada;  $k_{\alpha\beta}$  (35-44) nolu denklemlerde tanımlandığı gibidir.

$U_{iy}$ ,  $U_{iz}$  ( $i=1,2,3,\dots,6$ ) ve  $D_y$ ,  $D_z$  ise sırasıyla (56-61) ve (62) nolu denklemlerdeki gibi elde edilmektedir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde öncelikle elde mevcut bulunan ve çalışma kapsamında geliştirilen SFEDYN bilgisayar programının doğruluğu kontrol edilmekte, daha sonra ise çalışmanın amacına uygun olarak seçilen örnekler tanımlanmaktadır. Bu örnek modellerin analizinden elde edilen sonuçlar ve irdemeleri ise “3. Bulgular ve İrdemeler” bölümünde yer almaktadır.

### 2.1. Geliştirilen Bilgisayar Programı (SFEDYNCPR)

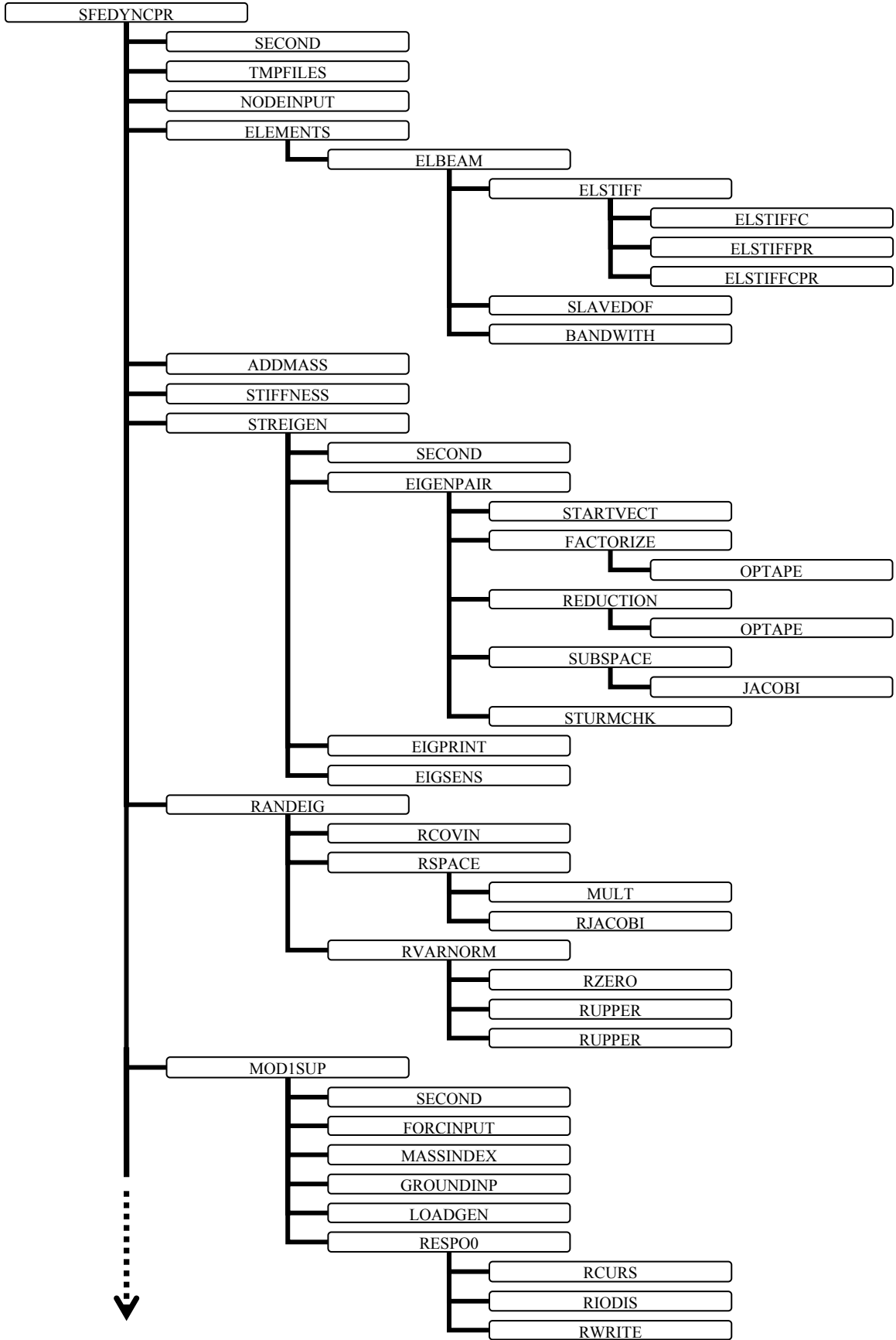
Deterministik veya stokastik olarak tanımlanan parametrelerle çubuk tipi elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin dinamik analizi FORTRAN dilinde kodlanmış SFEDYN programıyla (Kleiber ve Hien, 1992) yapılabilmektedir. Yapısal elemanların, geometri (kesit alanı) ve malzeme özelliklerindeki (elastisite modülü, kütle yoğunluğu) rastgelelik, stokastik sistemler için sonlu elemanlar yöntemi ve ikinci-derece perturbasyon yönteminin bir birleşimi kullanılarak SFEDYN programında sunulmaktadır (Kleiber ve Hien, 1992). Bu çalışmada;

1. Kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapabilmek amacıyla “1. Genel Bilgiler” bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan (34)-(50) nolu denklemler FORTRAN programlama dilinde kodlanmıştır. Kodlanan bu alt program, belirsiz malzeme ve geometrik özelliklerle yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini gerçekleştiren SFEDYN programına eklenerek, bu programın kompozit kesitlerden oluşan sistemlerin de stokastik dinamik analizini yapabilecek bir duruma gelmesi sağlanmıştır.
2. Daha sonra, ilk haliyle SFEDYN programı dikkate alınarak, birinci bölümde yer alan (51)-(66) nolu denklemler FORTRAN dilinde kodlanmış ve geliştirilen bu alt program yardımıyla ise SFEDYN programı yarı rijit bağlı sistemlerin stokastik çözümlemesine elverişli hale getirilmiş bulunmaktadır.
3. Son olarak, yarı rijit bağlı olma ve kompozit kesitli olma durumu (34)-(66) nolu tüm denklemler (67) nolu formülasyonda olduğu gibi birleştirilerek bir alt program halinde ana programa eklenmiş ve geliştirilen bu program SFEDYNCPR olarak adlandırılmıştır.



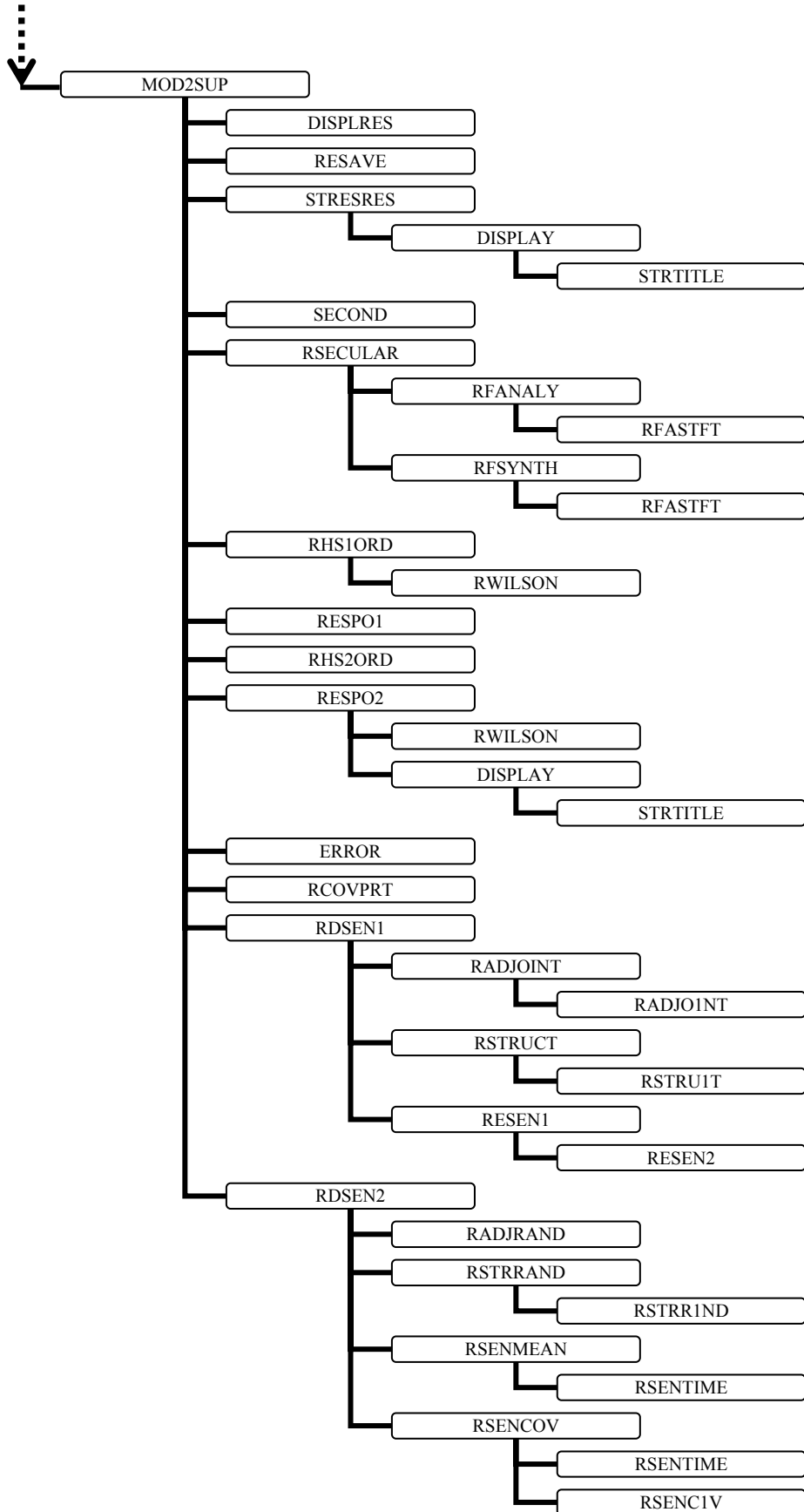
4. Bununla birlikte, geliştirilen programları kontrol etmek amacıyla kullanılan MCS yöntemi de aynı işlem adımları takip edilerek SFEDYN programına paralel olarak geliştirilmiş bulunmaktadır.

Bu çerçevede geliştirilen SFEDYNCPR programının akış diyagramı Şekil 12’de verilmektedir. Şekildeki kutular alt programları gösterirken, aralardaki çizgiler alt programlar arasındaki bağlantıya işaret etmektedir. Her bir alt program, bir üstündeki çizgi ile bağlantılı olduğu alt program ile çağrılmaktadır.



Şekil 12. Bilgisayar programı akış diyagramı

Şekil 12'nin devamı



SFEDYN programı üzerinde kompozit kesitler ve yarı rijit birleşim durumunu içerebilmesi için yapılan değişiklikler ELBEAM alt programında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bilgisayar programının temel işlem adımları aşağıda sıralanmaktadır.

1. Yapısal elemanların geometrik ve malzeme özelliklerindeki rastgelelik sonlu elemanlar yöntemi ve ikinci-derece perturbasyon yönteminin bir birleşimi kullanılarak SFEDYN (Kleiber ve Hien 1992) programıyla gerçekleştirilmektedir.
2. Üç boyutlu kiriş eleman verilerini okuma işlemi ve serbestlik derecelerini ana serbestlik derecelerine dönüştürme işlemi ELBEAM alt programı ile gerçekleştirilmektedir. Üç boyutlu kiriş elemanın kütle ve rijitlik matrislerinin düzenlenmesi, rastgele veya tasarım değişkenlerine bağlı türevler ve gerilme-yerdeğiştirme ilişkileri ise ELSTIFF alt programıyla gerçekleştirilmektedir.
3. Kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle, belirsiz malzeme ve geometrik özelliklerle stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla SFEDYN programına ELSTIFFC alt programı ilave edilmiştir. Bu alt program “1. Genel Bilgiler” bölümünde verilen (32)-(50) numaralı denklemler kullanılarak oluşturulmuştur.
4. Yarı rijit bağlı yapı sistemlerinin SFEM ile stokastik dinamik analizini gerçekleştirebilmek için (51)-(65) nolu denklemler FORTRAN dilinde kodlanarak ELSTIFFPR alt programı oluşturulmuş ve ana programa eklenmiştir. Böylece kısmi bağlı çelik çerçeve ve köprülerin hem deterministik hem de PSFEM ile stokastik analizi gerçekleştirilmektedir.
5. Yarı rijit bağlı kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin rastgele değişen malzeme ve geometrik özelliklerle deterministik ve stokastik dinamik analizini gerçekleştirebilmek amacıyla SFEDYN programına ELSTIFFCPR alt programı ilave edilmiştir.

Böylece SFEDYN programı ilave edilen alt programlar yardımıyla rijit veya yarı rijit bağlı, homojen veya kompozit kesitlerden oluşan yapı sistemlerinin deterministik ya da stokastik dinamik analizini gerçekleştirilecek düzeye erişmiş olmaktadır.

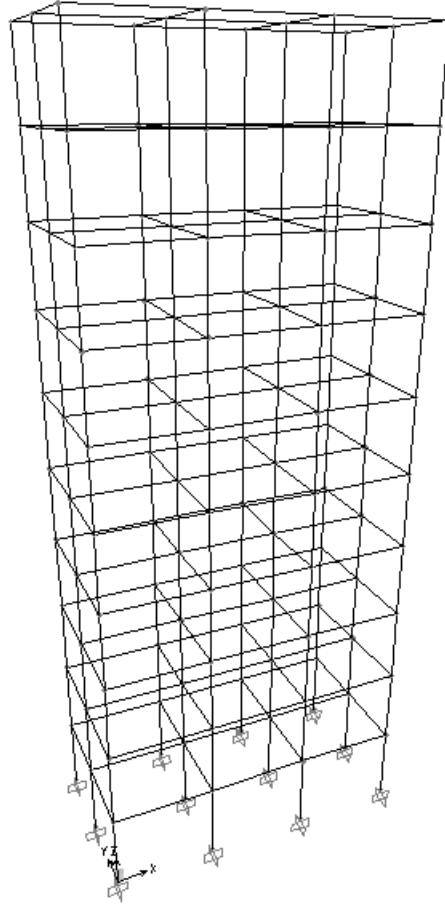
## 2.2. Geliştirilen Bilgisayar Programının Kontrol Edilmesi

Bu bölümde geliştirilen bilgisayar programının kontrol edilmesi için rijit bağlı üç boyutlu bir çerçeve sistem ve büyük açıklıklı bir asma köprü modeli kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiş olup frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesirleri karşılaştırılarak programın doğruluğu araştırılmıştır.

### 2.2.1. Üç Boyutlu Çerçeve Analizi

Mevcut programın doğruluğu ve geçerliliği üç boyutlu çerçeve sistem modeli kullanılarak, deterministik analiz sonuçları SAP2000 (Wilson, 1997) programından ve stokastik dinamik analiz sonuçları da MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak kontrol edilmektedir. Bu amaca yönelik olarak, 10 katlı, X yönünde 3, Y yönünde 2 açıklıklı, üç boyutlu çerçeve sistem örnek model olarak seçilmiştir (Şekil 13). Bu çerçeve sistem modeli için her bir açıklık x yönünde 4 m, y yönünde 3 m, kat yükseklikleri ise 3 m alınmıştır. Çerçeve sistem modeli için elastisite modülünün rastgele değiştiği kabul edilerek, %15 değişim katsayısı (COV) için stokastik dinamik çözümler gerçekleştirilmiştir.

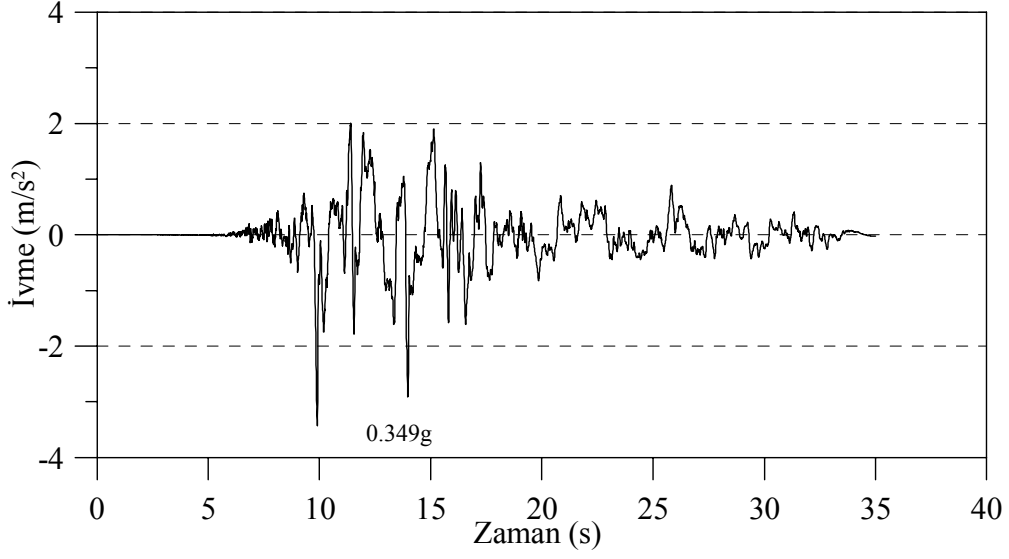
Seçilen çerçeve modelindeki kolon ve kiriş elemanların enkesit boyutları sırasıyla 900 mm × 450 mm, 700 mm × 400 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan çerçevelerde kolon enkesit boyutlarından büyüğünün eğilme doğrultusunda olduğu kabul edilmiştir. Malzemenin elastisite modülü (E)  $2.8 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup> olarak kullanılmış, sönüm oranı ( $\xi$ ) 0.05, betonun birim ağırlığı ile poisson oranı ( $\nu$ ) sırasıyla 25 kN/m<sup>3</sup> ve 0.2 olarak alınmıştır (TSE 500). Hesaplar sırasında kolonların kütleleri enkesit boyutlarına bağlı olarak belirlenmiş ancak kirişlerin kütleleri enkesit boyutlarına ilave olarak eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak, kirişlere döşemelerden ve duvarlardan 20 kN/m'lik yükün geldiği varsayımıyla hesaplanarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. 10 katlı, X yönünde 3, Y yönünde 2 açıklıklı, üç boyutlu çerçeve modeli

#### 2.2.1.1. Seçilen Yer Hareketinin Özellikleri

Analizlerde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin YPT330 bileşenli ivme kaydı kullanılmıştır (URL-1, 2008). Deprem ivmesinin, incelenen bina türü sistemlerde yatay doğrultuda, köprü türü sistemlerde ise düşey doğrultuda etkidiği kabul edilmiştir. Kocaeli depreminin maksimum ivmesi 0.349g'dir ve depremin ivme kaydı Şekil 14'te verilmektedir.

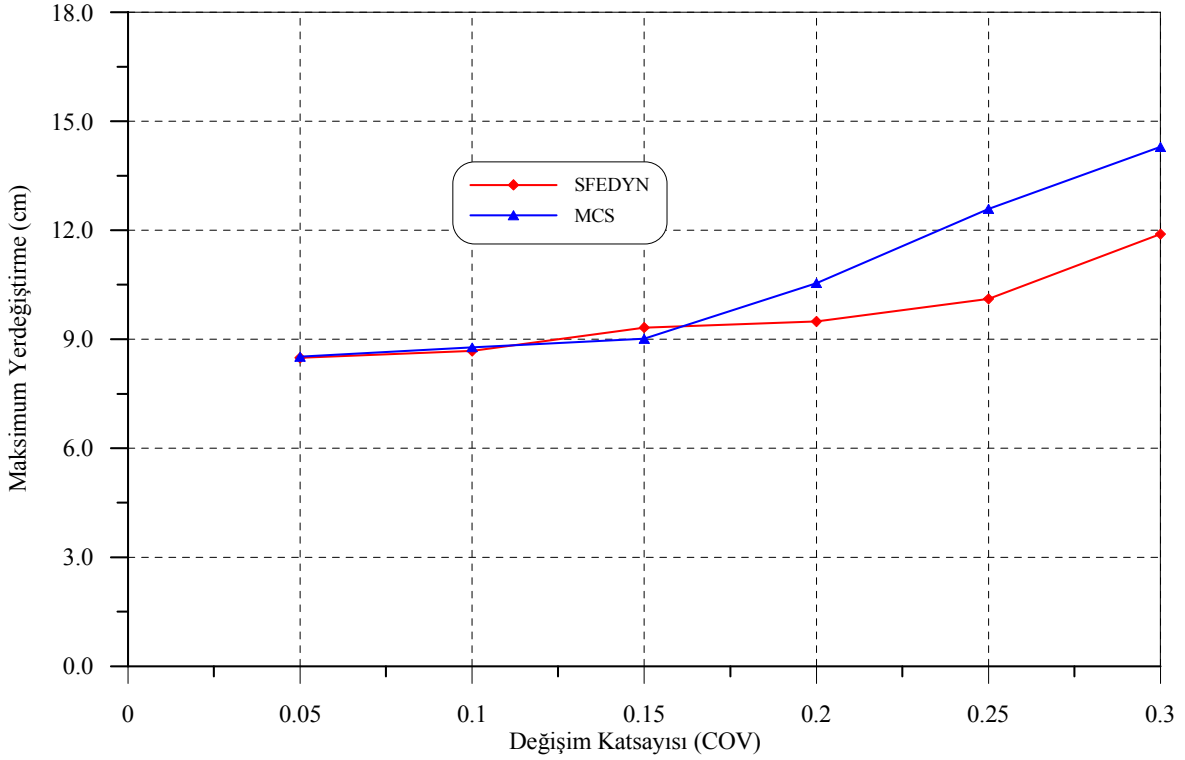


Şekil 14. 1999 Kocaeli depremi YPT330 bileşeni ivme kaydı (URL-1, 2008)

#### 2.2.1.2. Değişim Katsayısının (COV) Belirlenmesi

Perturbasyon ve MCS yöntemleri arasındaki hassasiyetin ortaya konabilmesi için, değişim katsayısı (COV),  $0 < \text{COV} \leq 0.30$  aralığında seçilerek, bu değişim aralığı için üç boyutlu çerçeve sistemin en üst katındaki yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu analizin amacı, perturbasyon yönteminin hangi değişim katsayısı değerine kadar MCS yöntemine yakın sonuçlar verdiğinin ortaya koyulmasıdır. Üç boyutlu çerçeve sistemin en üst katındaki maksimum yerdeğiştirme değerleri, farklı COV değerleri için Şekil 15'te karşılaştırılmaktadır.

Şekil 15'ten görüldüğü gibi PSFEM ve MCS yöntemleri düşük değişim katsayısı için (%5-%15) birbirine çok yakın değerler verirken, bu katsayının artmasıyla (%20-%30) birlikte her iki yöntemin sonuçları birbirinden giderek uzaklaşmaktadır. Düşük COV değerleri için PSFEM ve MCS yöntemleri arasındaki fark %0.36-%3.1 arasında değişmekteyken, değişim katsayısının artmasıyla beraber bu fark %25-%40'a kadar çıkmaktadır. Kısaca belirtmek gerekirse, PSFEM düşük değişim katsayısı (%15'e kadar) için MCS yöntemine yakın sonuçlar vermektedir.



Şekil 15. PSFEM ve MCS yöntemlerinin farklı COV değerleri için karşılaştırması

PSFEM, rastgele değişkenlerin ortalama değerlerinden rastgele parametrelerin değişimini kullanarak bu parametrelerin gerçek olasılıklı dağılımını dikkate almamaktadır. MCS yöntemi ise rastgele değişken girdi parametrelerin gerçek rastgele davranışını hesaba katmaktadır. Bu çalışmada genellikle çelik ve beton malzemelerden oluşan yapı sistemleri ve kompozit kesitlerden oluşan sistemler kullanılacağından bu malzemelerin değişim katsayısı çelik için %10, beton için %15 (Button, 1989; Melchers, 1999) ve kompozit sistemler için ise %15 (Mirza, 1998; Weng ve Yeng, 2002) olarak alınarak gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü gibi çalışmada kullanılan malzemelerin COV katsayıları %15 değerinden büyük olmadığı için yukarıda varılan sonuç, çalışmada kullanılan sistemler için bir sorun teşkil etmeyecektir.

### 2.2.1.3. Frekanslar

Üç boyutlu çerçeve sistem modelinin SFEDYN, MCS ve SAP2000 programlarından elde edilmiş ilk beş mod için frekans değerleri Tablo 1’de verilmektedir.



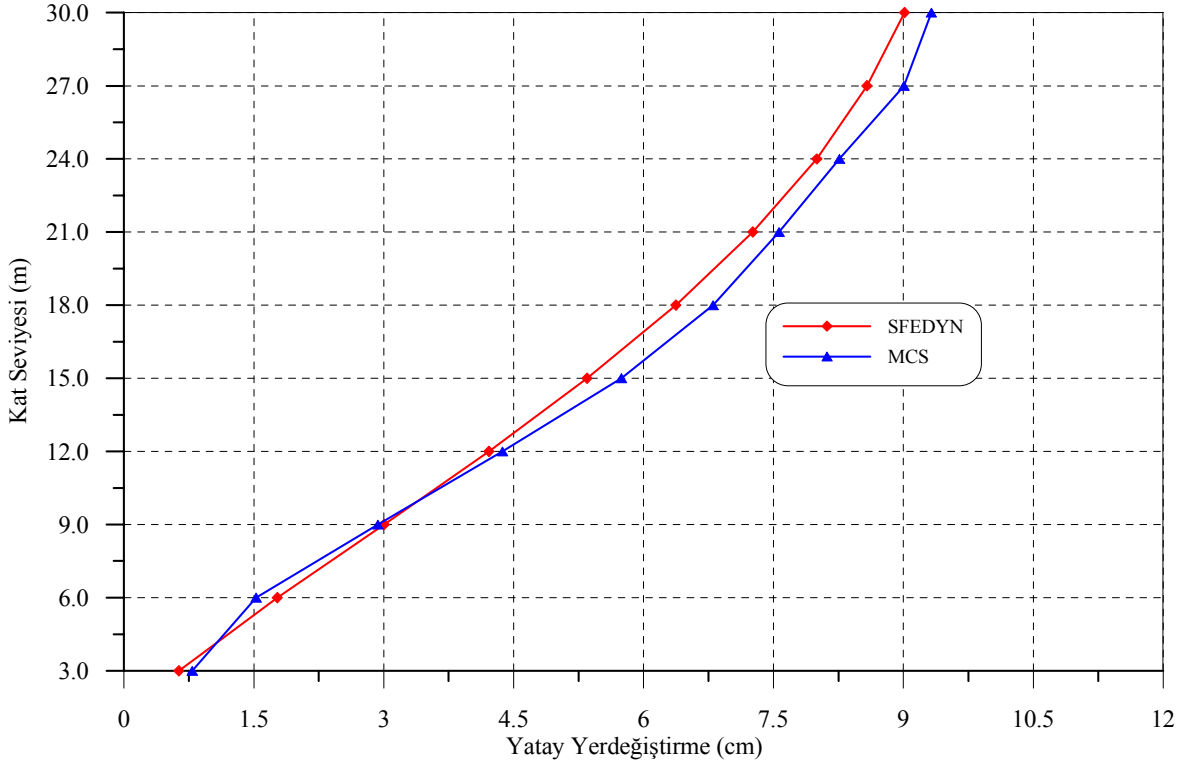
Tablo 1. Üç boyutlu çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)			
	Deterministik		Stokastik	
	SFEDYN	SAP 2000	SFEDYN	MCS
1	1.020	1.020	1.056	1.110
2	1.359	1.360	1.425	1.360
3	1.368	1.369	1.437	1.425
4	3.186	3.187	3.311	3.278
5	4.041	4.043	4.221	4.200

Tablo 1’den görüldüğü gibi rastgele değişken olarak seçilen elastisite modülü için çerçeve sistemin SFEDYN programının deterministik çözümü sonucu elde edilen frekans değerleriyle ve SAP 2000 paket programından elde edilen frekans değerleri yaklaşık olarak eşit düzeydedir. PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonuçları da incelendiğinde, iki yöntemin sonuçlarının hemen hemen örtüşmekte olduğu görülmektedir. Bu benzer durum ile sonuçların doğruluğu teyit edilmektedir.

#### 2.2.1.4. Yerdeğiştirmeler

Üç boyutlu çerçeve sistem modelinin perturbasyon ve Monte Carlo Simülasyon yöntemiyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca X doğrultusundaki maksimum yatay yerdeğiştirme grafikleri Şekil 16’da görülmektedir. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) çerçeve sisteme X doğrultusunda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, kat seviyesi boyunca yakın bir seyir izlemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle 10 katlı çerçeveden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri birinci katta, MCS yöntemine göre yaklaşık %9.80 oranında farklılık arz ederken, bu fark üst katlara doğru hızla azalmakta ve en üst katta %3.3 seviyesine kadar düşmektedir. Diğer bir ifadeyle en üst kat için perturbasyon yönteminden elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri yaklaşık 9 cm iken MCS yönteminde bu değer 9.34 cm’dir. Bu değer deterministik analiz sonucunda ise 10.5 cm olarak elde edilmiştir.

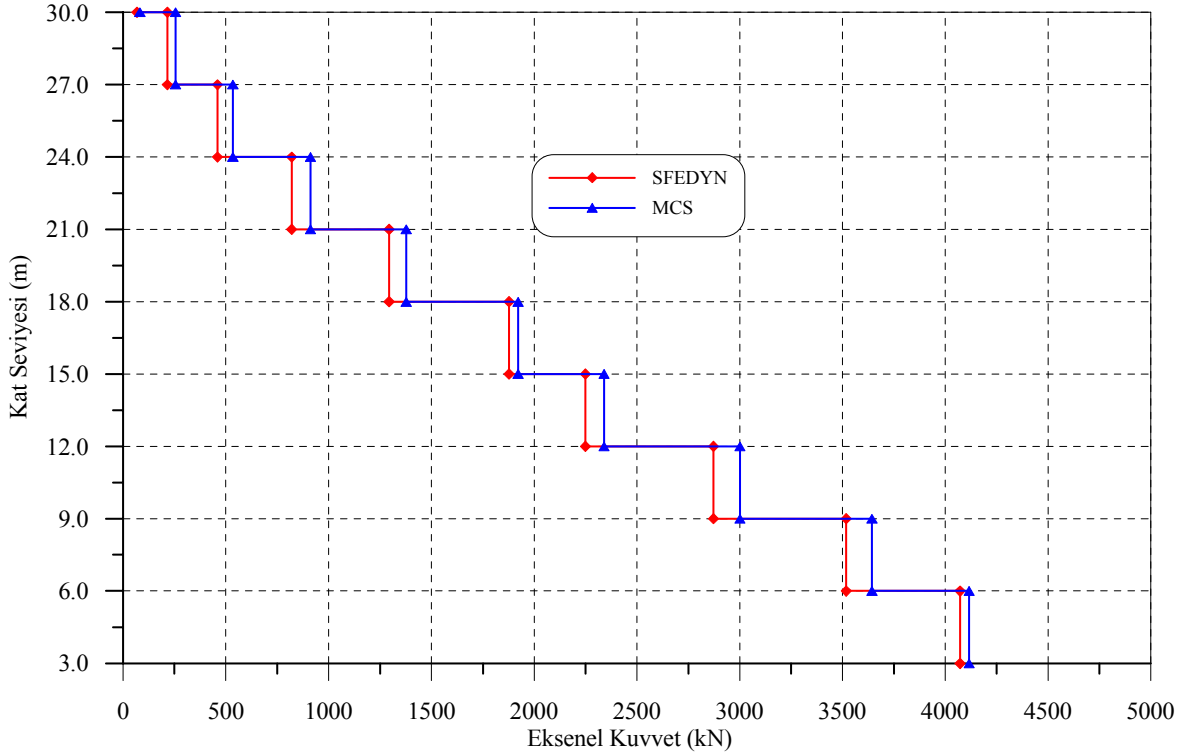


Şekil 16. Çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca rastgele değişken elastisite modülü için X doğrultusundaki maksimum yatay yerdeğiştirmeleri

### 2.2.1.5. Kesit Tesirleri

Rastgele değişken olarak elastisite modülü seçilerek, çerçeve sistem modelinin (Şekil 13) SFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentleri değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

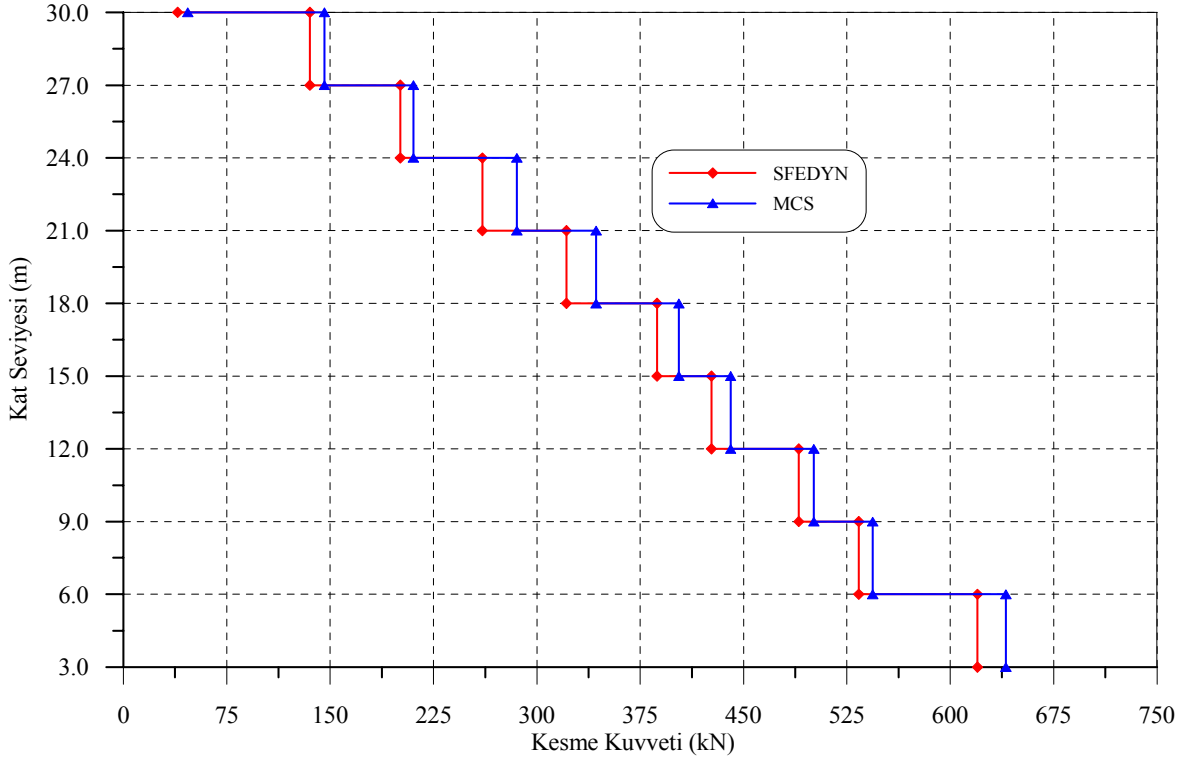
Şekil 17’de seçilen modelin kat seviyesi boyunca kolon uçlarında meydana gelen maksimum aksenal kuvvetleri her iki stokastik yöntem için verilmektedir. Aksenal kuvvet değerleri en alt kat kolonlarında maksimum değere ulaşmışken bu değer yükseklik boyunca azaldığı ve en üst katta minimum değerine ulaştığı görülmektedir. Rastgele değişken seçilen elastisite modülü için SFEDYN programından elde edilen stokastik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda daha büyük aksenal kuvvet değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 17). Bu verilere göre, en küçük aksenal kuvvetlerin oluştuğu en üst katlarda fark %8.55 iken, en büyük aksenal kuvvetin oluştuğu en alt katlarda bu oran %2’nin altına düşmektedir.



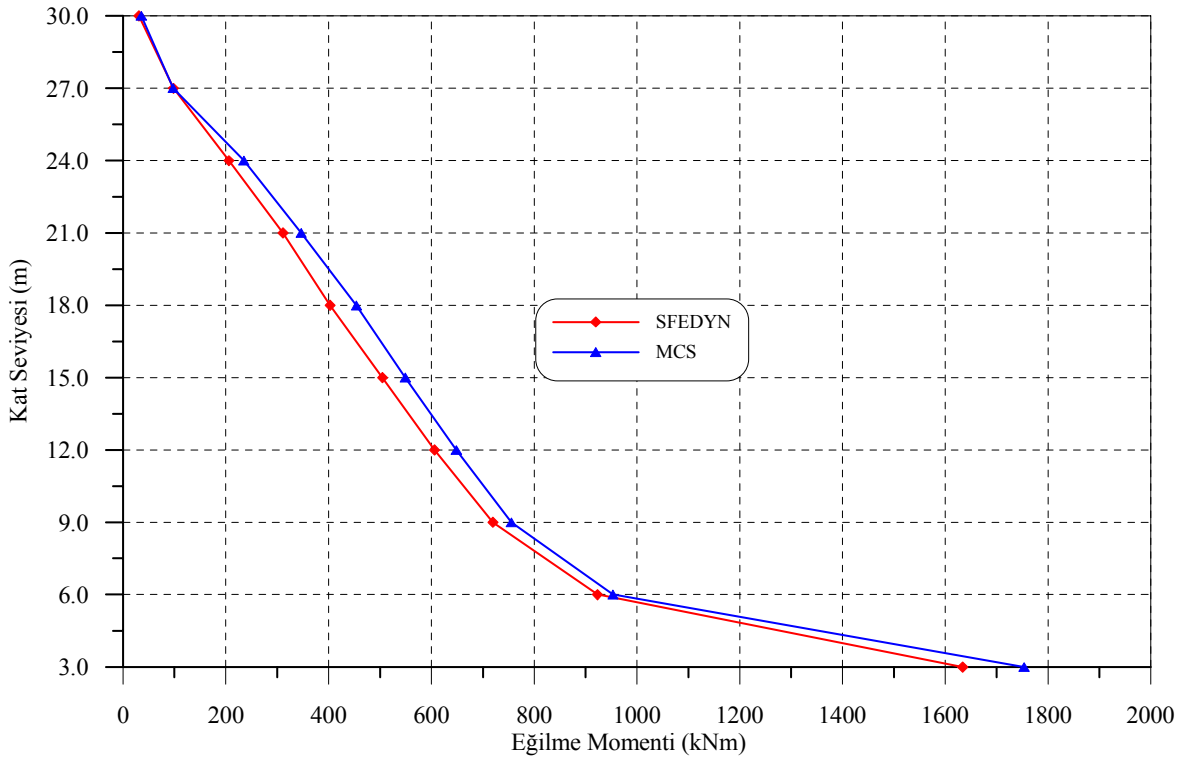
Şekil 17. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum aksenal kuvvetleri

Çerçeve sistem modelinin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen maksimum kesme kuvvetleri (Şekil 18) ve eğilme momenti (Şekil 19) değerlerinin iki farklı stokastik yöntemden elde edilen sonuçları grafiklerle sunulmaktadır. Bu grafiklerden görülebileceği gibi (Şekil 18-19), yatay yerdeğiştirme değerlerine benzer olarak, iki yöntemden elde edilen maksimum kesme kuvvetleri ve moment değerleri için de benzer yakınsama oranları söz konusudur. Üç boyutlu çerçeve sistem için, iki yöntemden elde edilen en küçük kesme kuvveti farkının üst katlarda %4-7 düzeyindeyken, en büyük kesme kuvvetinin olduğu en alt katlarda bu oran %3'ün altına düşmektedir.

Görüldüğü gibi örnek model olarak seçilen üç boyutlu çerçeve sistem için, iki yöntemden elde edilen en küçük momentlerin olduğu fark üst katlarda %4.20 iken, en büyük momentin olduğu en alt katlarda ise bu oran %2'nin altına düşmektedir. Yine burada da perturbasyon yönteminin MCS yöntemine yakın değerleri vermesi, bu yöntemin kullanılabilirliğini gözler önüne sermektedir.



Şekil 18. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum kesme kuvvetleri

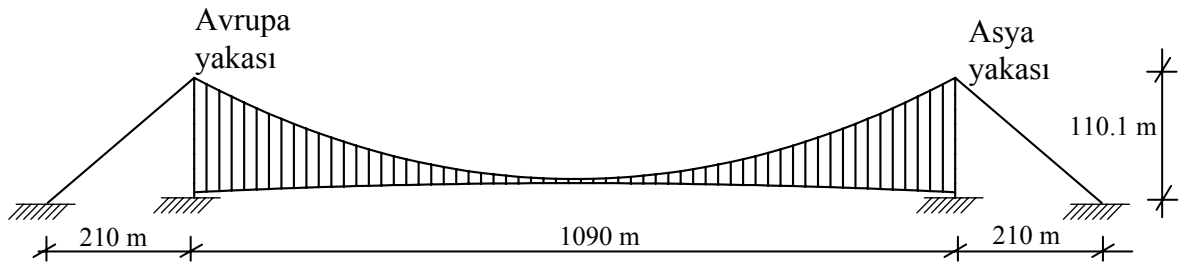


Şekil 19. Çerçeve sistem modelinin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca kolon üst uçlarındaki maksimum eğilme momentleri

### 2.2.2. Köprü Analizi

Mevcut SFEDYN programının köprü sistemlerinde kontrolü için, Şekil 20’de iki boyutlu sonlu eleman modeli verilen Fatih Sultan Mehmet köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Tablo 2’de kesit özellikleri verilen Fatih Sultan Mehmet köprüsü, 1090 m’lik ana açıklığı ve 210 m olan iki kenar açıklığıyla, toplam üç açıklıktan oluşmaktadır.

Birçok yapı sisteminin (bina, baraj vb.) deprem analizi yapılırken, depremin düşey bileşeni genelde önemli değildir. Depremin yatay bileşeninin düşey bileşenine oranla daha etkili olduğu yapılarda, projelendirme yatay bileşen dikkate alınarak yapılır. Fakat uzun asma köprüler için düşey deprem hareketi daha fazla etkili olmaktadır (Abdel-Ghaffar ve Lawrance, 1982). Bu nedenle 1999 Kocaeli depremi ivme kaydı (Şekil 14) köprüye düşey doğrultuda uygulanmıştır.



Şekil 20. Fatih Sultan Mehmet köprüsünün iki boyutlu sonlu eleman modeli

Tablo 2. Fatih Sultan Mehmet köprüsüne ait çeşitli elemanların kesit özellikleri (Adanur, 2003)

Elemanlar	Atalet momenti (m <sup>4</sup> )	Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	Kütle yoğunluğu (kN/m <sup>3</sup> )	Kesit alanı(m <sup>2</sup> )	Sönüm oranı
Kiriş	1.73	2.05x10 <sup>8</sup>	38.54~122.6	1.26~2.68	2%
Askı	-	1.93x10 <sup>8</sup>	78.28	0.7376	2%
Kablo	0.0428	1.93x10 <sup>8</sup>	77.00~78.28	0.6904	2%
				0.0088	
				0.0241	

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü modelinde, 128 düğüm noktası ve 186 eleman kullanılmıştır. Her düğüm noktasında yatay ve düşey yerdeğiştirme ve yanal ekseninde dönme serbestliği olmak üzere üç serbestlik derecesi mevcuttur.

### 2.2.2.1. Frekanslar

Fatih Sultan Mehmet Asma Köprüsü modelinin PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilmiş ilk 15 modun frekans değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3'ten görüldüğü gibi, elastisite modülünün belirsiz olması durumunda yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda bu köprü için PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen ilk 15 modun frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Her iki yöntem arasında ortalama %0.67 oranında bir fark oluşmaktadır. Deterministik analiz sonucunda da SFEDYN ve SAP 2000 programlarından bulunan frekans değerlerinin birbiriyle hemen hemen eşit düzeyde olduğu görülmektedir. Bu benzer durum ile sonuçların doğruluğu teyit edilmektedir.

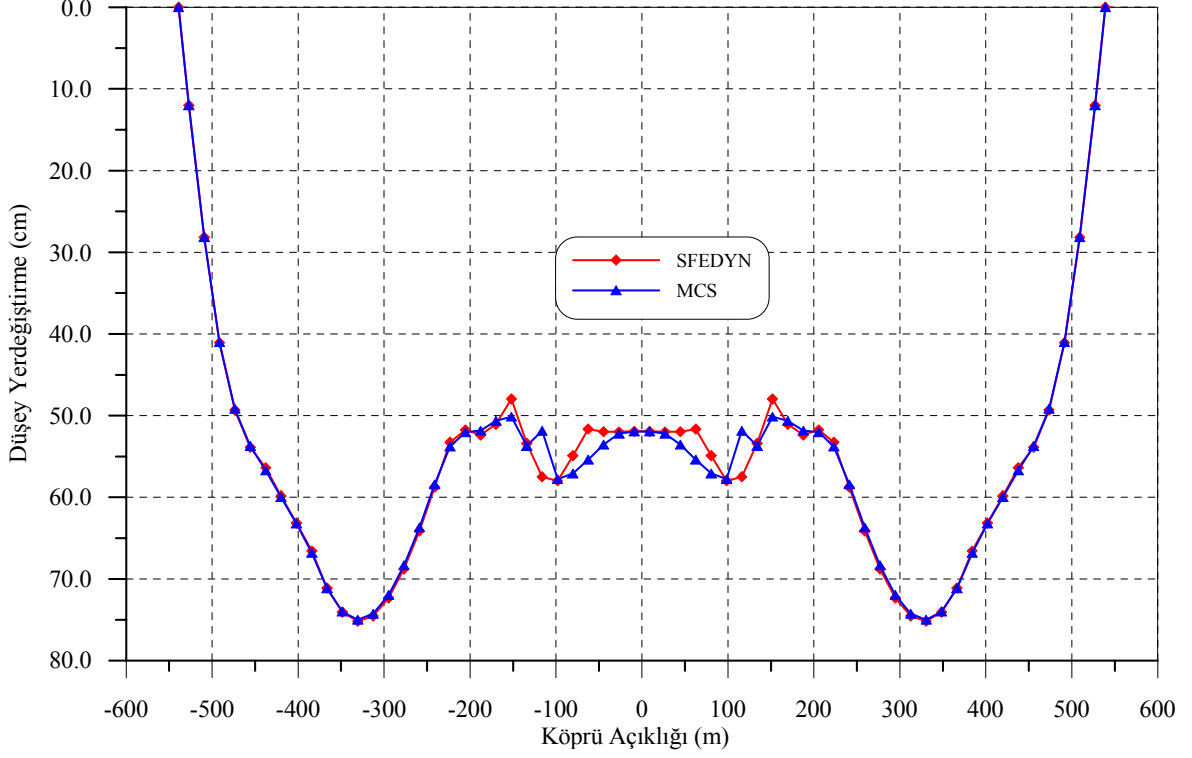
Tablo 3. Fatih Sultan Mehmet köprüsünün rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)			
	Deterministik		Stokastik	
	SFEDYN	SAP 2000	SFEDYN	MCS
1	0.022	0.023	0.0029	0.0028
2	0.045	0.047	0.0113	0.0112
3	0.088	0.088	0.0317	0.0316
4	0.131	0.132	0.0588	0.0577
5	0.187	0.189	0.0661	0.0665
6	0.194	0.196	0.0998	0.0993
7	0.269	0.269	0.119	0.1185
8	0.348	0.348	0.1454	0.1449
9	0.440	0.440	0.1975	0.1964
10	0.521	0.521	0.2612	0.2595
11	0.542	0.542	0.3329	0.3305
12	0.652	0.654	0.4114	0.4085
13	0.773	0.776	0.4962	0.493
14	0.905	0.908	0.590	0.587
15	1.042	1.048	0.6934	0.6884

### 2.2.2.2. Yerdeğiştirmeler

Köprü modelinin PSFEM ve MCS yönteminden elde edilmiş köprü tabliyesi boyunca Z doğrultusundaki maksimum düşey yerdeğiştirme grafikleri Şekil 21'de görülmektedir. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen köprü tabliyesindeki maksimum yerdeğiştirme değerleri şekilden görüldüğü gibi çoğu zaman üst üste

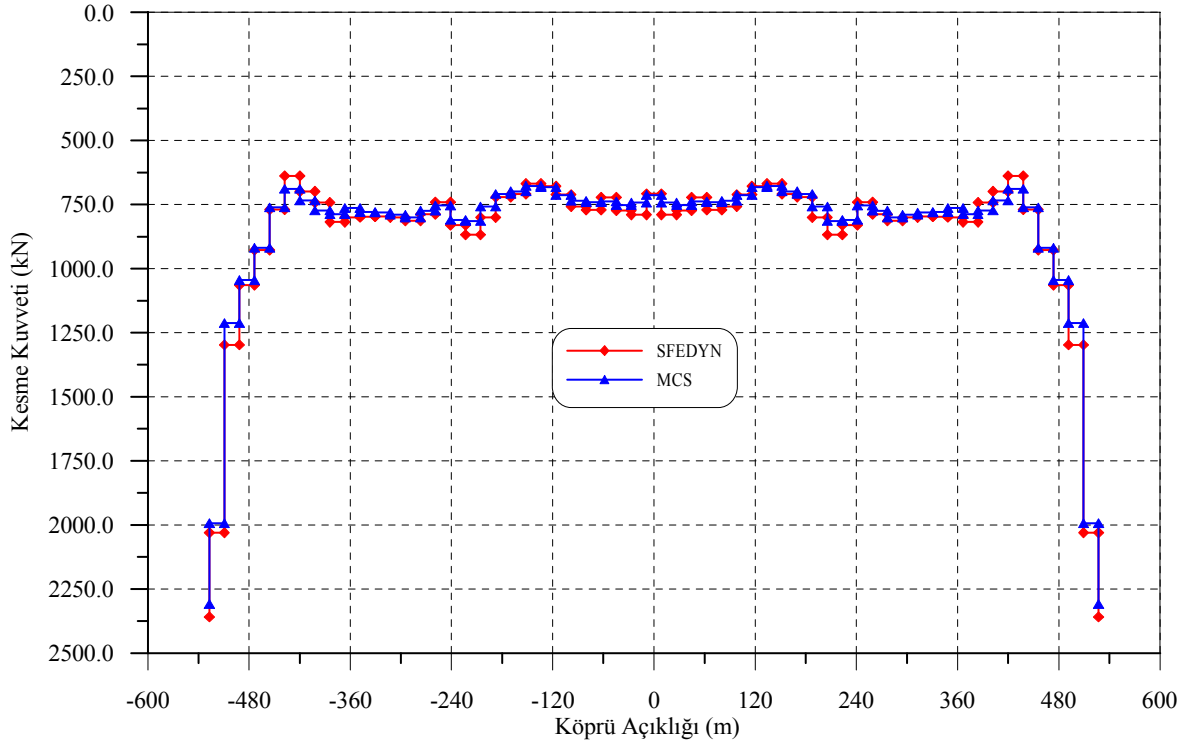
çakışmaktadır. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, PSFEM'den elde edilen tabliyedeki maksimum düşey yerdeğiştirme değeri 75.2 cm, MCS yöntemine göre ise 74.9 cm değerini almaktadır. Her iki yöntem arasındaki maksimum fark %10.8, minimum fark ise %0.08 olmaktadır.



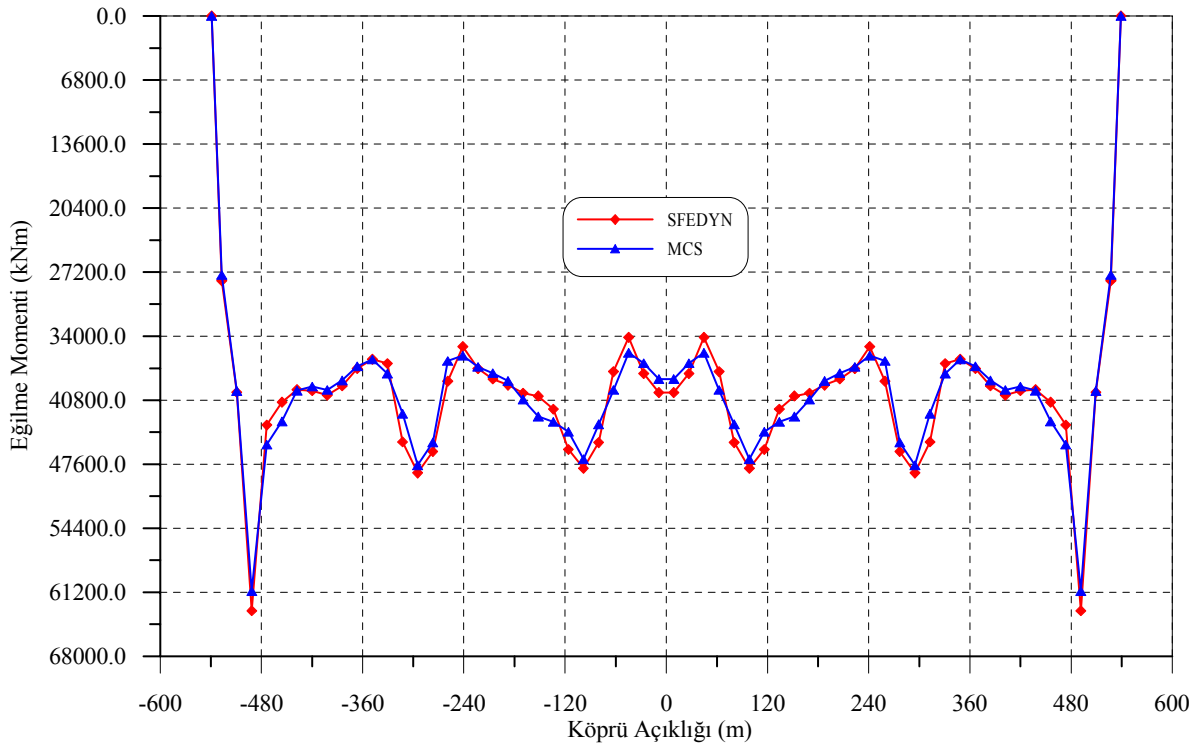
Şekil 21. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeler

### 2.2.2.3. Kesit Tesirleri

Köprü modelinin (Şekil 20) tabliyesinde meydana gelen maksimum kesme kuvveti (Şekil 22) ve eğilme momentleri (Şekil 23), elastisite modülünün rastgele değişken olduğu kabul edilerek, SFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş olup sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.



Şekil 22. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 23. Köprü açıklığı boyunca rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen maksimum eğilme momentleri



Şekil 22-23'te köprü tabliyesinde oluşan en büyük kesme kuvvetleri ve eğilme momenti değerlerinin iki farklı stokastik yöntemden elde edilen sonuçları yer almaktadır. Grafiklerden görüleceği üzere, düşey yerdeğiştirme değerlerine benzer olarak, iki yöntemden elde edilen kesme kuvvetleri (Şekil 22) ve eğilme momenti (Şekil 23) değerleri için de benzer yakınsama durumu söz konusudur. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (Şekil 20) için, iki yöntemden elde edilen kesme kuvvetlerinin oluşturduğu maksimum fark %7.31, minimum fark ise %0.23'tür. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen momentler için maksimum fark %5.85, minimum fark %0.06 olmaktadır. Yine burada da her iki yönteme göre yapılan stokastik dinamik analiz sonuçlarında çok yakın benzerlik olması, PSFEM'in kullanılabilirliğini gözler önüne sermektedir.

### 2.3. Stokastik Dinamik Analizlerde Kullanılan Modeller

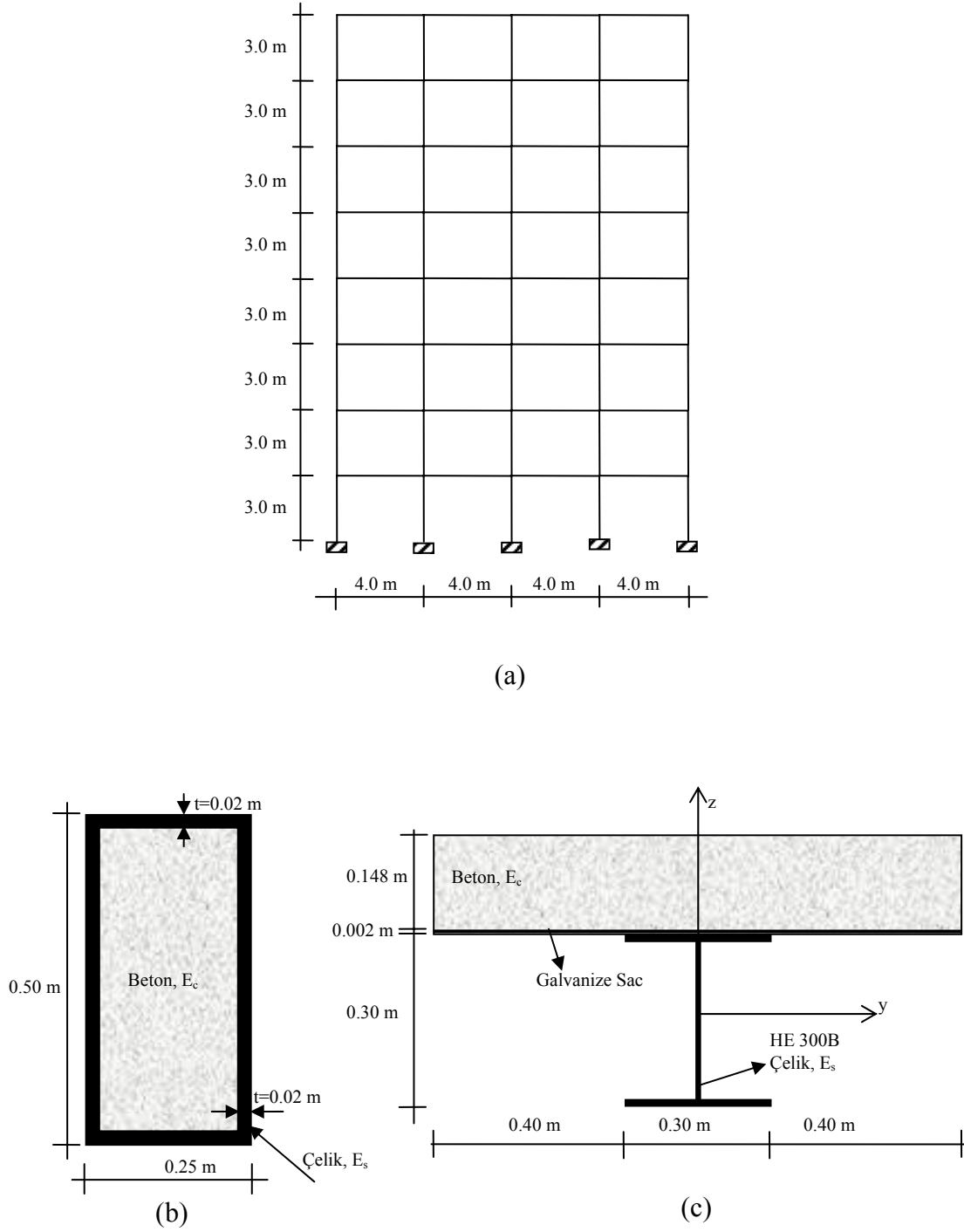
Çelik veya kompozit kesitlerden oluşan, rijit veya yarı rijit bağlantılara sahip yapı sistemlerinin perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemlerine göre, malzeme ve geometri özellikleriyle bağlantı rijitliklerinin rastgele değiştiğini kabul ederek stokastik dinamik davranışlarını belirlemek için uygulamaya dönük olarak farklı türde çerçeve ve köprü sistem modelleri seçilmiştir.

#### 2.3.1. Kompozit Kesitli Çerçeve Sistem Modeli

Kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemlerin stokastik dinamik davranışlarını belirlemek için Şekil 24'teki çerçeve sistem modeli seçilmiştir. 8 katlı ve 4 açıklıklı olan yapı sistemi 24 m yüksekliğinde ve 16 m genişliğindedir. Kolon ve kiriş en kesitleri çelik ve beton malzemelerinin birlikte kullanıldığı kompozit kesitlerden oluşmaktadır (Şekil 24a-24b) (Lui, 1999). Çerçeve sistemin sonlu eleman modelinde 125 düğüm noktası ve 152 eleman kullanılmıştır. Her düğüm noktasında yatay ve düşey yerdeğiştirme ve yanal ekseninde dönme serbestliği olmak üzere üç serbestlik derecesi mevcuttur.

Kompozit kesitte kullanılan betonun kütle yoğunluğu ( $\rho_c$ )  $25 \text{ kN/m}^3$ , elastisite modülü ( $E_c$ )  $3.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$  ve kayma modülü ( $G_c$ )  $1.25 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$  olarak ve çeliğin kütle yoğunluğu ( $\rho_s$ )  $78.6 \text{ kN/m}^3$ , elastisite modülü ( $E_s$ )  $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$  ve kayma modülü ( $G_s$ )  $8.75 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmıştır. Hesaplar sırasında kolonların kütleleri enkesit boyutlarına bağlı olarak belirlenmiş ancak kirişlerin kütleleri enkesit boyutlarına ilave olarak eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak, döşemelerden ve duvarlardan  $7.50 \text{ kN/m}$ 'lik

yükün geldiği varsayımıyla hesaplanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kompozit kesitli sistemlerde sönüm oranı ( $\xi$ ) 0.03 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 24. Kompozit kesitli çerçeve sistemin boyutları (a), çerçevenin kolon (b) ve kiriş en kesit boyutları (c)

Kompozit kesitlerden oluşan kolon ve kiriş elemanlar için gerekli hesaplamalar “1.Genel Bilgiler” bölümünde verilen (45)-(47) nolu denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu denklemlere göre elde edilen kompozit kesitli çerçeve sistemin kesit özellikleri Tablo 4’te verilmektedir. İnşaat Mühendisliği uygulamalarında etkisi oldukça küçük olan kayma deformasyon katsayısı, eleman üzerine etkiyen eğilme momentlerinin kesme kuvvetleriyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu durumlarda dikkate alınması gerekmektedir (Sapountzakiz ve Mokos, 2007). Bu sebeple her iki kesit için kayma deformasyon katsayıları  $a_y=a_z=0$  olarak seçilmiştir.

Hesaplamalarda beton malzemesi referans malzeme olarak seçilmiş ve buna göre işlemler gerçekleştirilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Kompozit kesitli çerçeve sisteme ait elemanların kesit özellikleri

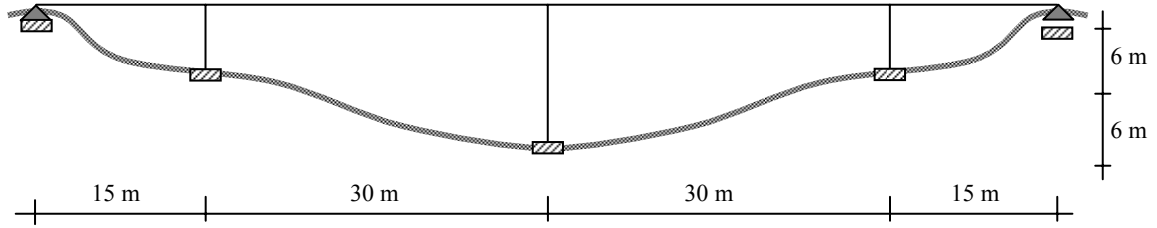
Eleman	Enkesit Alanı (m <sup>2</sup> )		Atalet Momentleri (m <sup>4</sup> )		Polar Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )
	A <sub>E</sub>	A <sub>G</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>t</sub>
Kolon	0.2954	0.2954	0.00801	0.00243	0.084
Kiriş	0.285	0.285	0.005743	0.0188	0.1963

### 2.3.2. Kompozit Kesitli Köprü Sistem Modeli

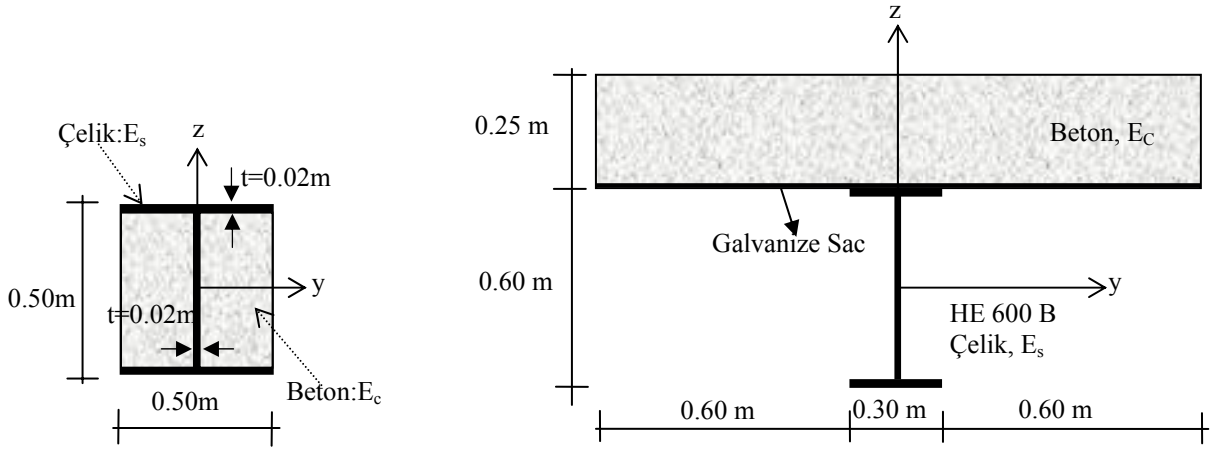
Kompozit kesitlerden oluşan köprü sistemlerinin stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla Şekil 25’te boyutları ve kesit özellikleri verilen iki boyutlu karayolu köprüsü model olarak seçilmiştir. Üç kolon ve dört açıklıktan oluşan köprü 90 m uzunluğunda ve 12 m yüksekliğindedir. Köprünün kolon ve kirişleri beton ve çelikten müteşekkil kompozit kesitlerden oluşmaktadır (Sapountzakis ve Mokos, 2006) (Şekil 25b). Kompozit kesitli köprü modelinde, 115 düğüm noktası ve 114 eleman kullanılmıştır. Her düğüm noktasında yatay ve düşey yerdeğiştirme ve yanal ekseninde dönme serbestliği olmak üzere üç serbestlik derecesi mevcuttur.

Kompozit kesitte kullanılan betonun kütle yoğunluğu ( $\rho_c$ ) 25 kN/m<sup>3</sup>, elastisite modülü ( $E_c$ ) 3.0x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> ve kayma modülü ( $G_c$ ) 1.25x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> olarak ve çeliğin kütle yoğunluğu ( $\rho_s$ ) 78.6 kN/m<sup>3</sup>, elastisite modülü ( $E_s$ ) 2.1x10<sup>8</sup> kN/m<sup>2</sup> ve kayma modülü ( $G_s$ ) 8.75x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Hesaplar sırasında kolonların kütleleri enkesit boyutlarına bağlı olarak belirlenmiş ancak kirişlerin kütleleri enkesit boyutlarına ilave olarak eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak, kirişlere tabliyeden 35 kN/m’lik yükün

geldiği varsayımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Kompozit kesitlerden oluşan kolon ve kiriş için gerekli hesaplamalar “1. Genel Bilgiler” bölümünde verilen (45)-(47) nolu denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu denklemlere göre elde edilen kompozit kesitli karayolu köprüsünün kesit özellikleri Tablo 5’te gösterilmektedir. Kayma deformasyon katsayısı her iki kesit için  $a_y=a_z=0$  olarak seçilmiştir. Tablo 5’te gerçekleştirilen hesaplamalarda çelik malzemesi referans malzeme olarak seçilmiş ve hesaplamalarda bu durum dikkate alınmıştır.



(a) Karayolu köprüsünün genel şekli



(b) Kompozit kolon kesiti

(c) Kompozit kiriş kesiti

Şekil 25. Kompozit kesitli karayolu köprüsünün genel boyutları (a), kolon (b) ve kiriş (c) en kesit boyutları

Tablo 5. Kompozit kesitli köprü modelinin kesit özellikleri

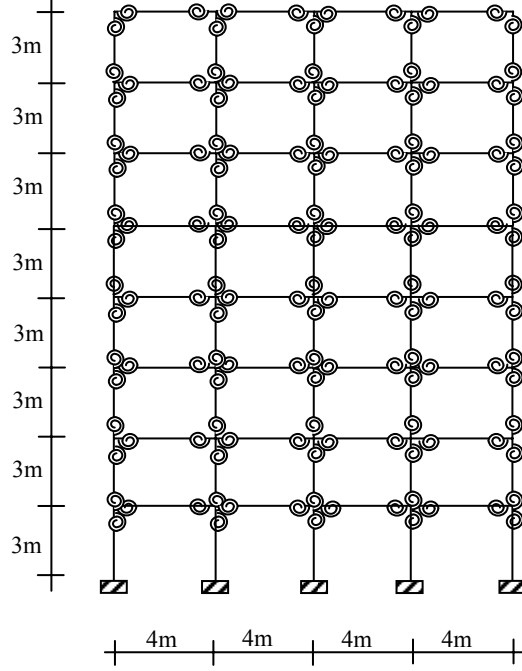
Eleman	Enkesit Alanı (m <sup>2</sup> )		Atalet Momentleri (m <sup>4</sup> )		Polar Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )
	A <sub>E</sub>	A <sub>G</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>t</sub>
Kolon	0.061	0.061	0.00187	0.00110	0.00392
Kiriş	0.084	0.084	0.005593	0.0158	0.0245

### 2.3.3. Yarı Rijit Bağlı Çerçeve Sistem Modeli

Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemlerin stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla Şekil 26’da verilen iki boyutlu çerçeve sistem model olarak seçilmiştir. 8 kat ve dört açıklıktan oluşan çerçeve sistemde zemine bağlı olan kolonların ankastre olduğu ve üst katlarda kolon ve kirişlerin kısmi bağlı olduğu kabul edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmektedir (Sekulovic vd., 2002). Bağlantıları modellemek için literatürde farklı yaklaşımlar mevcut bulunmaktadır. Bu çalışmada bağlantısı gerçekleştirilen her bir elemanın ucunda dönel yaylar bulunduğunun kabulüyle hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Bağlantı davranışını belirlemek için hesaplarda boyutsuz bir düzeltme faktörü kullanılmaktadır. Seçilen çelik çerçeve sistemdeki kolon ve kiriş bağlantı rijitlikleri iki farklı durum için çözümlenmektedir. Birinci durumda bağlantıların yarı rijit (%50 kısmi bağlı), ikinci durumda ise nispeten daha rijit (%75 kısmi bağlı) olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, sonuçları karşılaştırmak amacıyla aynı çerçeve sistemin geleneksel bağlantılı (tamamen rijit ve mafsallı) olması durumları da dikkate alınmaktadır.

24 m yüksekliğinde ve 16 m genişliğinde olan yarı-rijit bağlı çelik çerçeve sistemin kolon ve kirişleri Amerikan kesit profillerden ASTM A6’ ya göre sırasıyla W14x370 ve W24x131 olarak seçilmiştir (Salazar ve Haldar, 1999). Yarı-rijit bağlı çelik çerçeveye ait elemanların kesit özellikleri Tablo 6’da sunulmaktadır. Çeliğin kütle yoğunluğu 78.60 kN/m<sup>3</sup> ve sönüm oranı 0.02 olarak dikkate alınmıştır.

“1. Genel Bilgiler” bölümünde verilen (65)-(66) nolu denklemler kullanılarak dönel yay rijitlikleri hesaplanmıştır. %50 kısmi bağlı olması durumunda kolonlar için dönel yay rijitliği  $k_1=475000$  kNm/rad kirişler için ise  $k_1=263000$  kNm/rad olarak elde edilmektedir. Nispeten daha rijit bağlı olması durumunda kolonlarda  $k_2=1430000$  kNm/rad, kirişler için ise  $k_2=790000$  kNm/rad olarak hesaplanmaktadır.



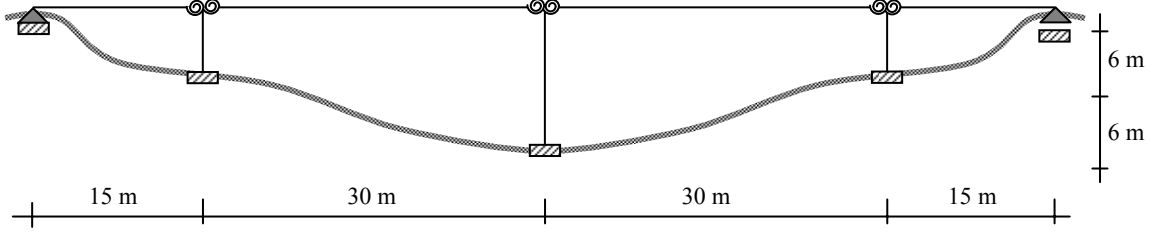
Şekil 26. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistem modeli

Tablo 6. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin elemanlarının kesit özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	Enkesit Alanı (m <sup>2</sup> )	Atalet Momentleri (m <sup>4</sup> )	
	E	A	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>
Kolon	2.1x10 <sup>8</sup>	0.0703	2.264x10 <sup>-3</sup>	8.283x10 <sup>-4</sup>
Kiriş	2.1x10 <sup>8</sup>	0.0248	1.673x10 <sup>-3</sup>	1.415x10 <sup>-4</sup>

#### 2.3.4. Yarı Rijit Bağlı Köprü Sistem Modeli

Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemlerin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla Şekil 25'te verilen kompozit kesitli köprü modeli çelik olarak tasarlanmış ve gerekli çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 27'de görüldüğü gibi, kolon ve kiriş birleşim noktalarının kısmi bağlı olduğu kabulüyle stokastik dinamik hesaplamalar yapılmaktadır. Çelik köprü sisteminde kolonlar IPE 400 profili ve kirişler HE 340-A profilinden oluşmaktadır. Yarı rijit bağlı köprü sisteminin elemanlarına ait kesit özellikleri Tablo 7'de verilmektedir. Çeliğin kütle yoğunluğu 78.60 kN/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır.



Şekil 27. Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemi

Tablo 7. Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin elemanlarının kesit özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> )	Enkesit Alanı (m <sup>2</sup> )	Atalet Momentleri (m <sup>4</sup> )	
	E		A	I <sub>y</sub>
Kolon	2.1x10 <sup>8</sup>	0.00845	2.313x10 <sup>-4</sup>	1.318x10 <sup>-5</sup>
Kiriş	2.1x10 <sup>8</sup>	0.01335	2.769x10 <sup>-4</sup>	7.436x10 <sup>-5</sup>

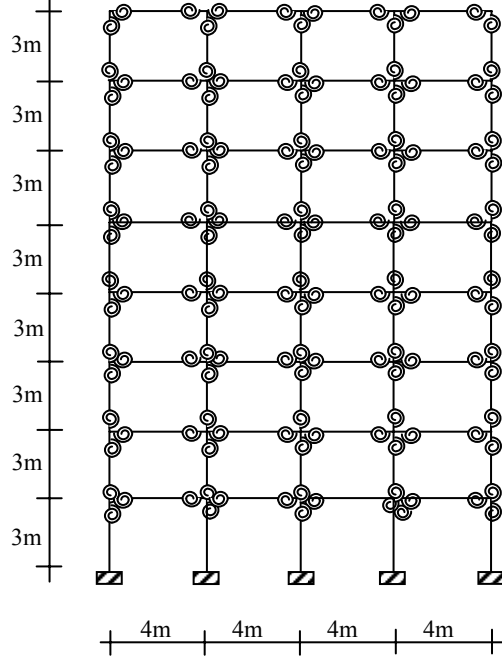
Seçilen köprü modelindeki kiriş bağlantı rijitlikleri iki farklı durum için çözümlenmektedir. Birinci durumda bağlantıların zayıf (%50 kısmi bağlı), ikinci durumda ise nispeten daha rijit (%75 kısmi bağlı) olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca bu çalışmada da, sonuçları karşılaştırmak amacıyla aynı sistem kiriş bağlantılarının tamamen rijit ve mafsallı bağlı olması durumları için dikkate alınmaktadır. Birinci durumda kiriş bağlantılarının %50 kısmi bağlı olduğu kabulüyle gerçekleştirilen hesaplamalarda kiriş uçlarındaki dönel yay rijitliği kenar açıklıklarda  $k_i=1.16 \times 10^4$  kNm/rad, orta açıklıklarda ise  $k_i=5.81 \times 10^3$  kNm/rad olarak elde edilmektedir. Nispeten daha rijit bağlı olması durumunda kiriş uçlarındaki dönel yay rijitliği kenar açıklıklarda  $k_i=3.49 \times 10^4$  kNm/rad, orta açıklıklarda ise  $k_i=1.74 \times 10^4$  kNm/rad olarak hesaplanmaktadır.

### 2.3.5. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Çerçeve Sistem Modeli

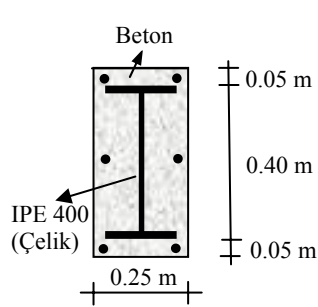
Yarı rijit bağlı kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistem modeli olarak Şekil 28'de gösterilen sekiz katlı ve dört açıklıklı çerçeve sistem seçilmiştir. Kolon ve kiriş bağlantılarının kısmi bağlı olduğu kabul edilen çerçeve sistem, çelik ve beton malzemedan oluşan kompozit kesitlere sahiptir (Dissanayake, 1999).

Şekildeki kompozit çerçeve sisteminin sonlu eleman modelinde 45 düğüm noktası ve 72 eleman kullanılmıştır. Yarı rijit bağlı kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemin kolon ve kiriş en kesiti için gerekli hesaplamalar "Genel Bilgiler" bölümünde verilen (45)-

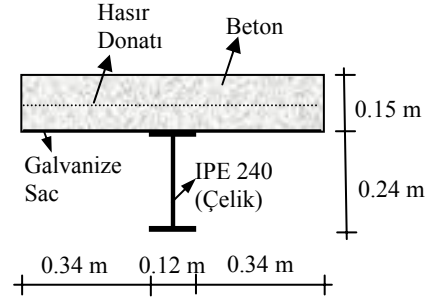
(47) nolu denklemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu denklemlere göre elde edilen yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin kesit özellikleri Tablo 8’de görülmektedir. Hesaplamalarda çelik isteğe bağlı olarak referans malzeme olarak seçilmektedir. Kayma deformasyon katsayısı her iki kesit için  $a_y=a_z=0$  olarak seçilmiştir.



(a) Kompozit çerçeve sistem



(b) Kolon en kesiti



(c) Kiriş en kesiti

Şekil 28. Kompozit kesitli çerçeve sistemin boyutları (a), kolon (b) ve kiriş (c) en kesit boyutları



Tablo 8. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sisteme ait elemanların kesit özellikleri

Eleman	Enkesit Alanı (m <sup>2</sup> )		Atalet Momentleri (m <sup>4</sup> )		Polar Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )
	A <sub>E</sub>	A <sub>G</sub>	I <sub>y</sub>	I <sub>z</sub>	I <sub>t</sub>
Kolon	0.0251	0.0251	0.000536	0.000199	0.000829
Kiriş	0.147	0.147	0.0014	0.0064	0.063

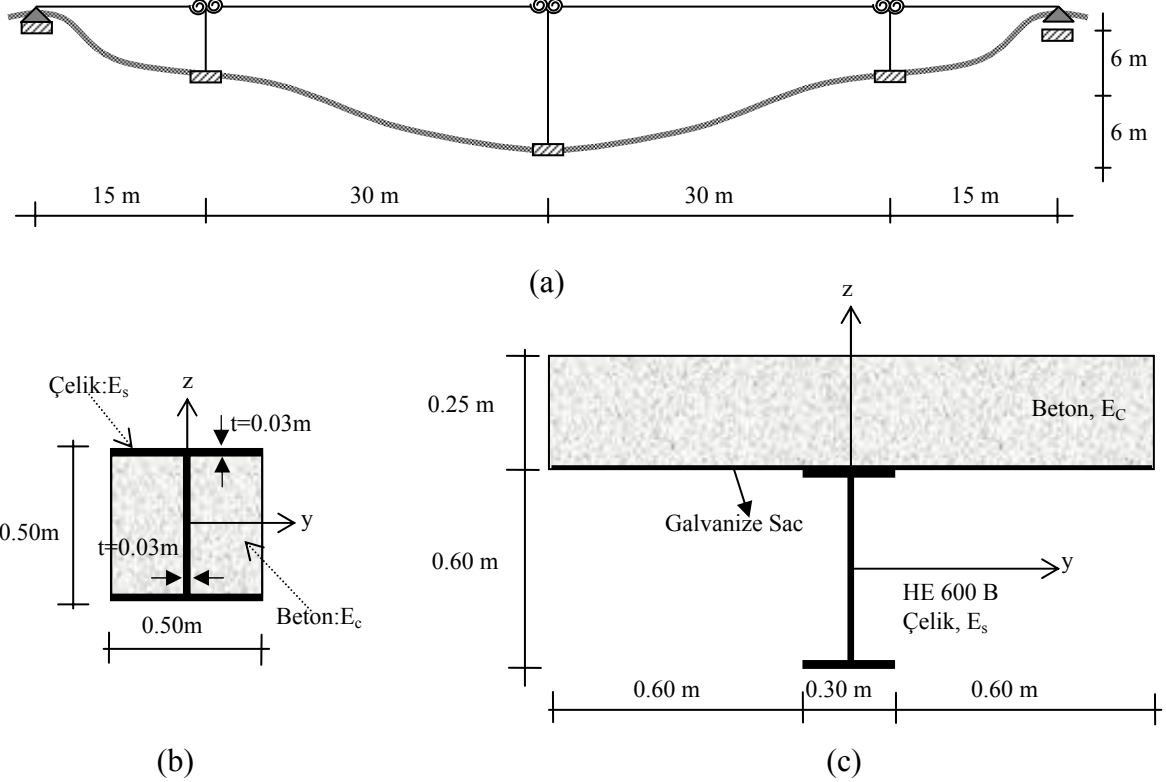
Kompozit kesitte kullanılan betonun kütle yoğunluğu ( $\rho_c$ ) 25 kN/m<sup>3</sup>, elastisite modülü ( $E_c$ ) 3.0x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> ve kayma modülü ( $G_c$ ) 1.25x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> olarak ve çeliğin kütle yoğunluğu ( $\rho_s$ ) 78.6 kN/m<sup>3</sup>, elastisite modülü ( $E_s$ ) 2.1x10<sup>8</sup> kN/m<sup>2</sup> ve kayma modülü ( $G_s$ ) 8.75x10<sup>7</sup> kN/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Hesaplar sırasında kolonların kütleleri enkesit boyutlarına bağlı olarak belirlenmiş ancak kirişlerin kütleleri enkesit boyutlarına ilave olarak eklenmiş kütle yaklaşımı kullanılarak, kirişlere döşemelerden ve duvarlardan 18 kN/m'lik yükün geldiği varsayımıyla analizler gerçekleştirilmiştir.

Seçilen çerçeve sistemdeki kolon ve kiriş bağlantı rijitlikleri iki farklı durum için hesaplanmaktadır. Birinci durumda bağlantıların yarı rijit (%75 kısmi bağlı), ikinci durumda ise nispeten daha rijit (%90 kısmi bağlı) olduğu kabul edilmektedir. Burada bağlılık oranının %90 seçilmesinin sebebi kiriş ve kolon bağlantılarında az da olsa bir yarı rijitlik söz konusu olduğunda sonuçlar üzerindeki etkisinin görülebilmesidir. Ayrıca bu çalışmada da sonuçları karşılaştırmak amacıyla aynı çerçeve sistemin tamamen rijit bağlı olması durumu dikkate alınmaktadır. Kolon ve kiriş bağlantılarının %75 kısmi bağlı olması durumunda kolon uçlarındaki dönel yay katsayısı  $k_i=3.38 \times 10^5$  kNm/rad, kiriş uçlarında ise  $k_i=6.60 \times 10^5$  kNm/rad'dır. İkinci durum için yapılan hesaplamalarda kolonlardaki dönel yay katsayısı  $k_i=1.02 \times 10^6$  kNm/rad, kiriş uçlarındaki dönel yay katsayısı ise  $k_i=1.98 \times 10^6$  kNm/rad olarak elde edilmektedir.

### 2.3.6. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Köprü Sistem Modeli

Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla Şekil 25'te verilen kompozit kesitli köprü modelindeki kiriş kolon bağlantı yerlerinin kısmi bağlı olduğu kabulüyle gerekli çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 29'da görüldüğü gibi, kolon ve kiriş birleşim noktalarının kısmi bağlı olduğu kabulüyle stokastik dinamik hesaplamalar

yapılmıştır. Bu sistemdeki elamanların kesit özellikleri Tablo 5’te verilen özelliklerle aynıdır.



Şekil 29. Kompozit kesitli köprü sistemin boyutları (a), kolon (b) ve kiriş (c) en kesit boyutları

Seçilen kompozit köprü modelindeki kiriş bağlantı rijitlikleri iki farklı durum için çözümlenmektedir. Birinci durumda bağlantıların zayıf (%50 kısmi bağlı), ikinci durumda ise nispeten daha rijit (%90 kısmi bağlı) olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca bu örnekte, sonuçları karşılaştırmak amacıyla aynı çerçeve sistemin tamamen rijit bağlı olması durumu da göz önünde bulundurulmaktadır. Tablo 5’te verilen elemanların kesit özellikleri ve birinci bölümde verilen (65)-(66) nolu denklemler kullanılarak dönel yay katsayıları hesaplanmaktadır. Birinci durumda kiriş bağlantılarının zayıf bağlı olduğu kabulüyle gerçekleştirilen hesaplamalarda kiriş uçlarındaki dönel yay rijitliği kenar açıklıklarda  $k_i=2.35 \times 10^5$  kNm/rad, orta açıklıklarda ise  $k_i=1.17 \times 10^5$  kNm/rad’dır. Nispeten daha rijit bağlı olması durumunda kenar açıklıklarda dönel yay katsayısı  $k_i=2.11 \times 10^6$  kNm/rad, orta açıklıklarda bu katsayı  $k_i=1.06 \times 10^6$  kNm/rad olarak elde edilmektedir.

### **3. BULGULAR VE İRDELEMELER**

Bu kısımda, “2. Yapılan Çalışmalar” bölümünde farklı başlıklar altında verilen sistemlerden elde edilen bulgular ve bu bulguların irdelemelerine yer verilecektir.

#### **3.1. Kompozit Kesitlerden Oluşan Sistemlerin İncelenmesi**

Bu kısımda 2. Bölüm’de malzeme ve geometrik özelliklerinin rastgele değişken olması durumları için stokastik dinamik analizleri yapılan kompozit kesitlerden oluşmuş sistemlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir.

##### **3.1.1. Kompozit Kesitli Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi**

Şekil 24’te verilen kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş olup, bu analizler sırasında yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depreminin YPT330 ivme bileşeni (Şekil 14) dikkate alınmıştır.

##### **3.1.1.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu**

Malzeme özelliklerinden elastisite modülünün belirsiz olması durumu için kompozit kesitli kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve sistem modelinin, PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir.

Kompozit kesitlerden oluşan sistemlerde, değişim katsayısı (COV) yaklaşık olarak %14-%15 olarak dikkate alınmaktadır (Mirza, 1998; Weng ve Yeng, 2002). Bu bölümde değişim katsayısının %15 olduğu kabulü yapılarak çözümler elde edilmiştir. Elastisite modülünün ( $E_p$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır (Kleiber ve Hien, 1992).

$$E[E_p] = 3.0 \times 10^7 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(E_\rho, E_\sigma) = e^{\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda l}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 152$$

$$\alpha = 0.15$$

Burada  $x_\rho$ ,  $l$  ve  $\lambda$  sırasıyla eleman orta noktalarının ordinatları ( $n$  rastgele değişken için,  $\rho, \sigma = 1, 2, \dots, n$ ), eleman uzunluğu ve azaltma katsayısını göstermektedir.

### 3.1.1.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) SFEDYN CPR programı kullanılarak PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilmiş frekans değerleri Tablo 9’da verilmektedir.

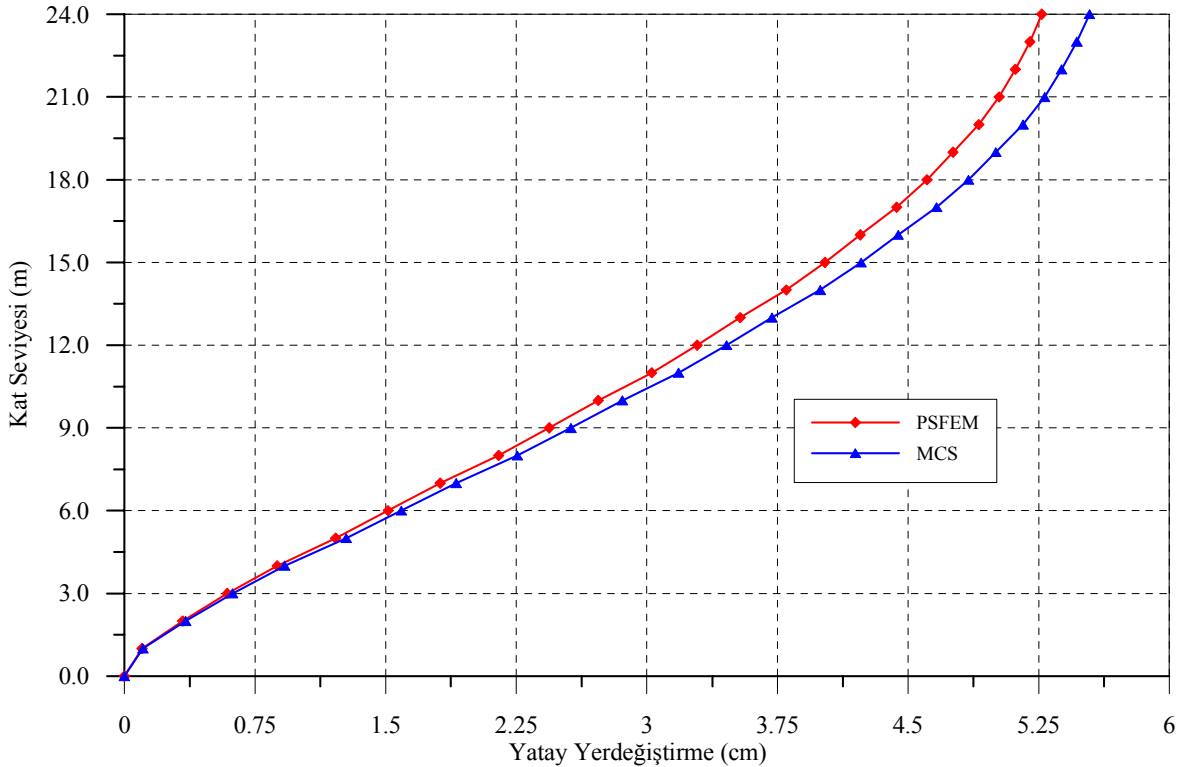
Tablo 9. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.137	0.137
2	0.858	0.856
3	1.749	1.736
4	1.798	1.794
5	2.402	2.397
6	4.703	4.693
7	5.114	5.092
8	5.733	5.726
9	7.747	7.727
10	8.354	8.319

Tablodan da görüleceği üzere, PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonuçları incelendiğinde kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin ilk on modunun frekans değerleri birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Öte yandan, PSFEM’den elde edilen frekans değerlerinin MCS yöntemine göre bir miktar daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Buna göre PSFEM’den elde edilen frekans değerlerinin değişimi, MCS yöntemine göre %0.29 oranında daha büyük olmaktadır.

### 3.1.1.1.2. Yerdeşistirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca yatay doğrultudaki en büyük yerdeğiştirme grafikleri Şekil 30'da görölmektedir. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) çerçeve sisteme yatay doğrultuda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin stokastik dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, kat seviyesi boyunca yakın bir seyir izlemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle 8 katlı kompozit çerçeve sistemden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre yaklaşık %5 oranında bir farklılık göstermektedir. Diğer bir ifadeyle en üst kat için perturbasyon yönteminden elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri yaklaşık 5.3 cm iken MCS yönteminde bu değeri 5.5 cm'dir. Bu değeri deterministik analiz sonucunda ise 6.2 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 30. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modölü için kat seviyesi boyunca yatay doğrultudaki en büyük yerdeğiştirmeleri

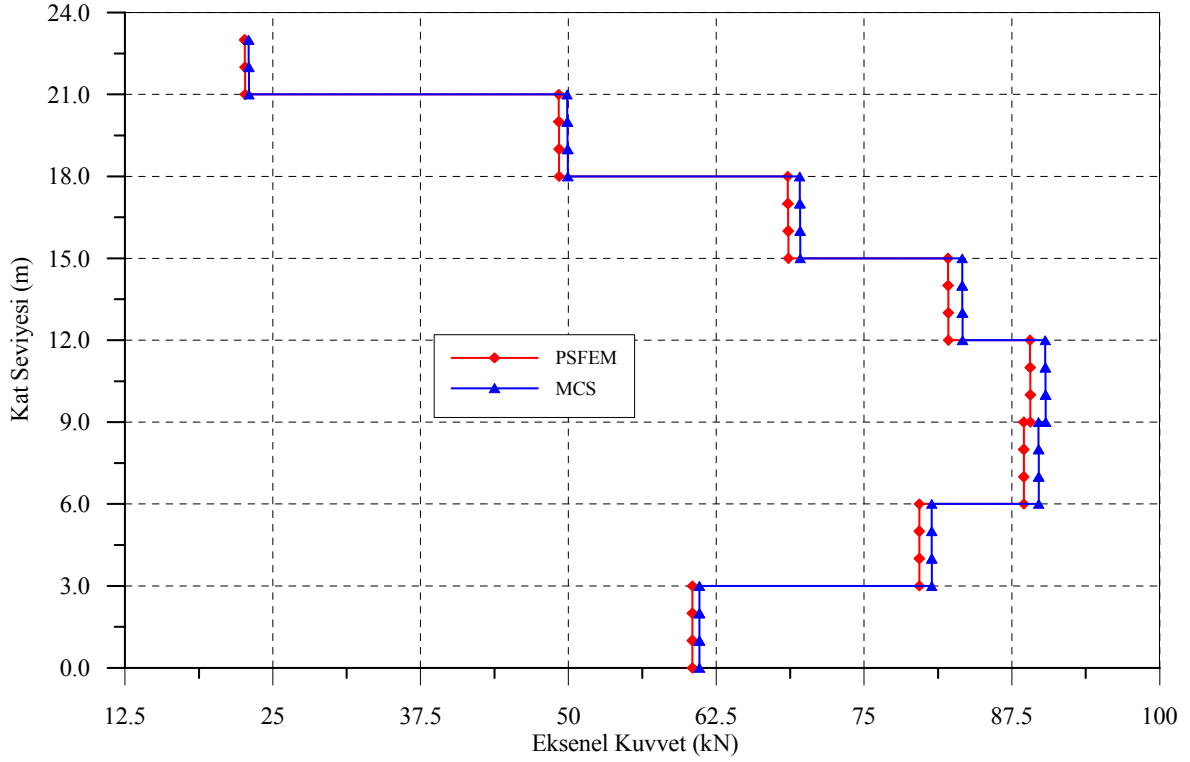
### 3.1.1.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Şekil 31-33'te elastisite modülünün rastgele değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

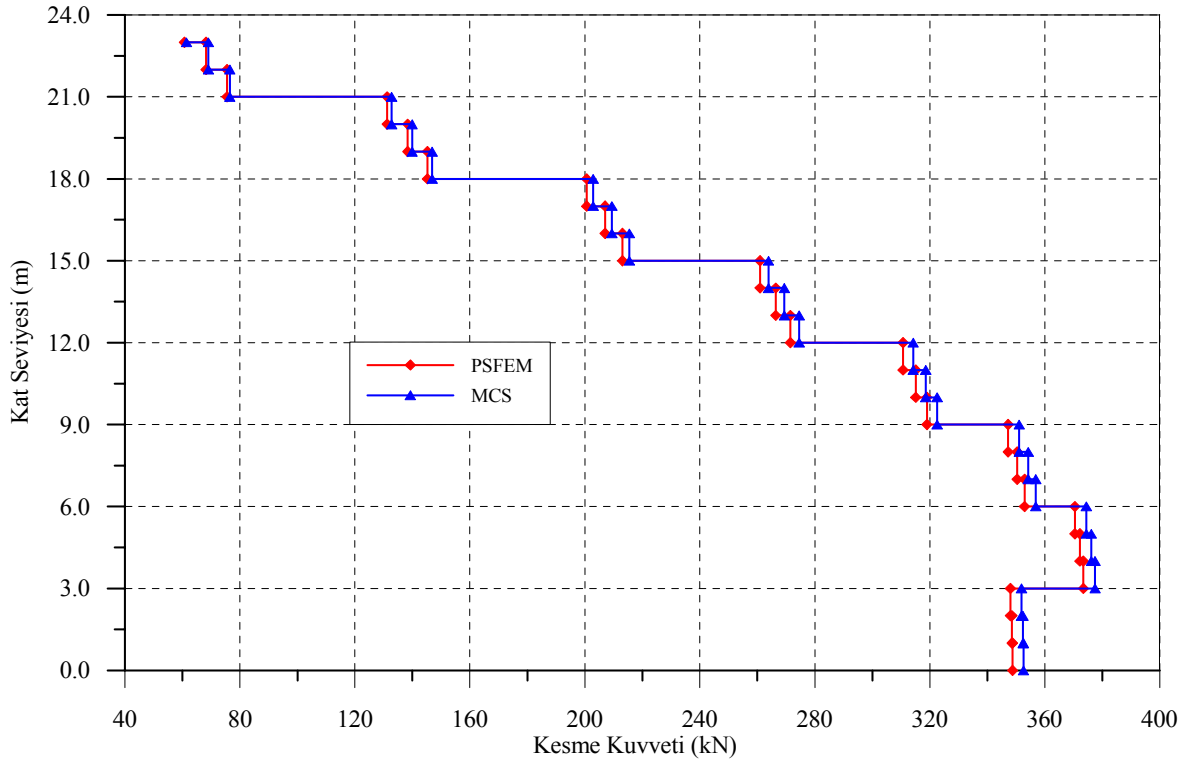
Seçilen modelin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük aksenal kuvvet değerleri iki farklı stokastik yöntem için Şekil 31'de verilmektedir. Aksenal kuvvet değerleri en alt kat kolonlarında en büyük değere ulaşmışken bu değer in yükseklik boyunca azaldığı ve en üst katta en küçük değerine ulaştığı görülmektedir. Rastgele değişken seçilen elastisite modülü için, SFEDYN CPR programından elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda daha büyük aksenal kuvvet değerleri verdiği görülmüştür (Şekil 31). Bu verilere göre, en küçük aksenal kuvvetlerin oluştuğu en üst katlarda bu iki yöntemden elde edilen fark %1.5 iken, en büyük aksenal kuvvetin oluştuğu alt katlarda ise bu fark %0.9'un altına düşmektedir.

Çerçeve sistem modelinin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri (Şekil 32) değerlerinin iki farklı stokastik yöntemden elde edilen sonuçları grafiklerle sunulmaktadır. Bölüm 2.3.1.'de verilen kompozit kesitli çerçeve sistem modeli için, iki yöntemden elde edilen en büyük kesme kuvveti farkı %1.12 olarak elde edilmektedir.

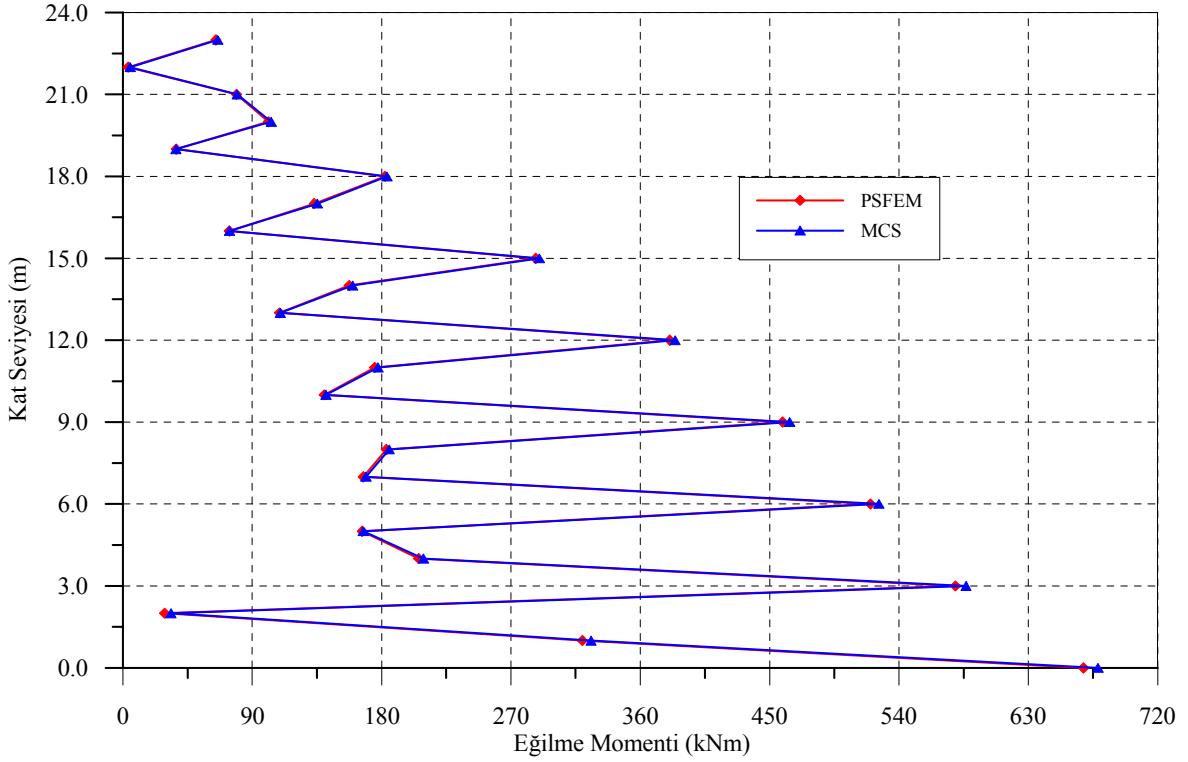
Yine iki yöntemden elde edilen en büyük moment değerleri için de benzer yakınsama oranları söz konusudur. Şekil 33'ten görüldüğü gibi kompozit çerçeve sistem için, PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum momentlerin oluştuğu en büyük fark, alt katlarda %3.1 iken, en küçük momentin oluştuğu en üst katlarda ise bu oran %0.8'in altına düşmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği gibi perturbasyon yönteminin MCS yöntemine yakın değerleri vermesi, bu yöntemin değişen malzeme özellikleriyle stokastik dinamik analizlerde kullanılabilirliğini göz önüne sermektedir.



Şekil 31. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eksenel kuvvetleri



Şekil 32. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 33. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri

### 3.1.1.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

Bu bölümde kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemin, enkesit alanının rastgele değişken olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri yapılmaktadır.

Enkesit alanının ( $A_p$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır (Kleiber ve Hien, 1992).

$$E [A_p] = 0.2902 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(A_\rho, A_\sigma) = e^{\left( -\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda} \right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 152$$

$$\alpha = 0.15$$



### 3.1.1.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin enkesit alanının belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilen frekans değerleri Tablo 10'da karşılaştırılmaktadır.

Tablo 10. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.137	0.137
2	0.860	0.861
3	1.750	1.755
4	1.798	1.804
5	2.407	2.411
6	4.713	4.722
7	5.124	5.132
8	5.743	5.753
9	7.759	7.777
10	8.372	8.384

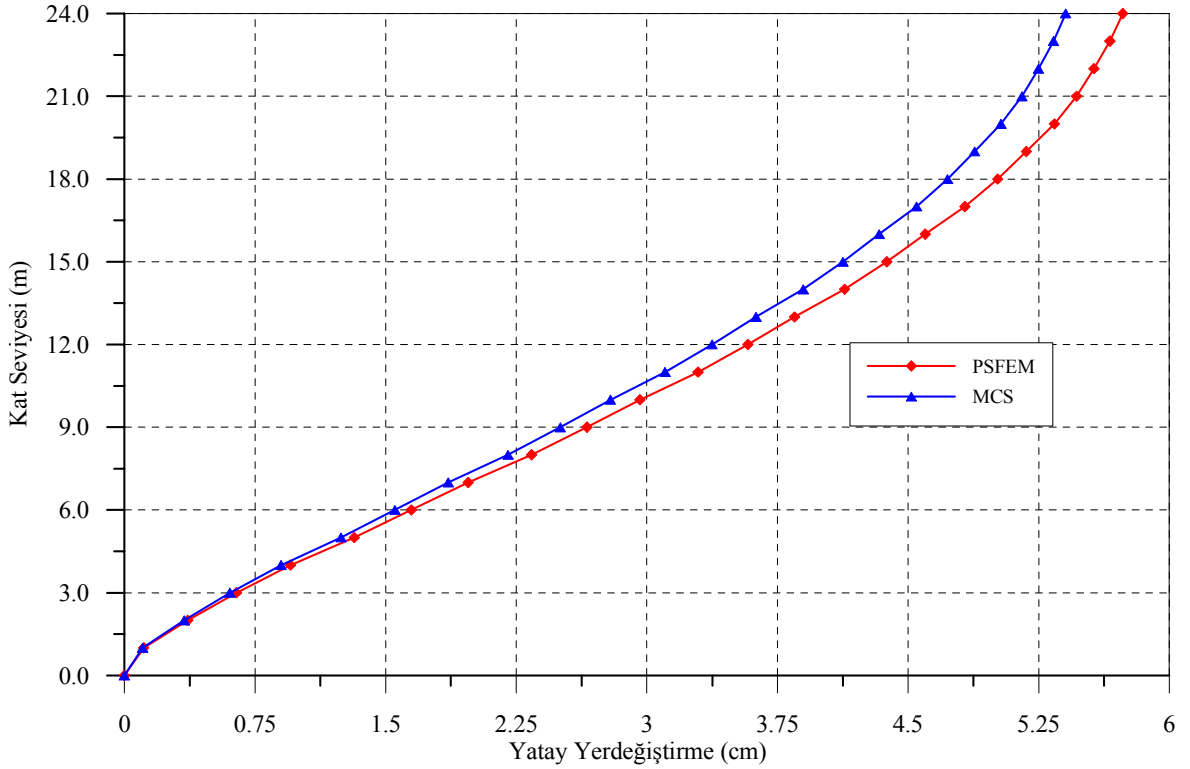
PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonuçlarına göre, kompozit kesitli çerçeve sistem modeli için ilk on modun frekansları birbirine oldukça yakın değerler vermektedir (Tablo 10). PSFEM'den elde edilen frekans değerleri, MCS yöntemine göre %0.18 oranında bir farklılıkla değişmektedir. Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda elde edilen frekans değerleri, elastisite modülünün rastgele değişken olması durumunda elde edilen frekans değerlerine oranla ise %0.61 daha büyük olduğu gözlenmektedir.

### 3.1.1.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Bölüm 2.3.1.'de verilen kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) enkesit alanının belirsiz olması durumu için gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda, kat seviyesi boyunca yatay doğrultuda elde edilen en büyük yerdeğiştirme değerleri Şekil 34'te verilmektedir. İki yöntem sonucunda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, kat seviyesi boyunca yakın bir seyir izlemektedir. Ancak PSFEM'den elde edilen yerdeğiştirme değerleri MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda elde edilen

yerdeğiştirme değerlerinden bir miktar yüksek seyrettiği gözlemlenmektedir. PSFEM ile 8 katlı kompozit çerçeveden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %6.1 oranında bir farklılık arz etmektedir. Diğer bir ifadeyle en üst kat için perturbasyon yönteminden elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri yaklaşık 5.73 cm iken MCS yönteminde bu değer 5.40 cm'dir.

Yatay yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu en üst kattaki değerler dikkate alındığında enkesit alanının stokastik olarak değiştiği durumda elde edilen yatay yerdeğiştirme değerinin, elastisite modülünün rastgele değişken olması durumunda elde edilen yerdeğiştirme değerine göre %7.50 oranında daha büyük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 34. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca yatay doğrultuda meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeleri

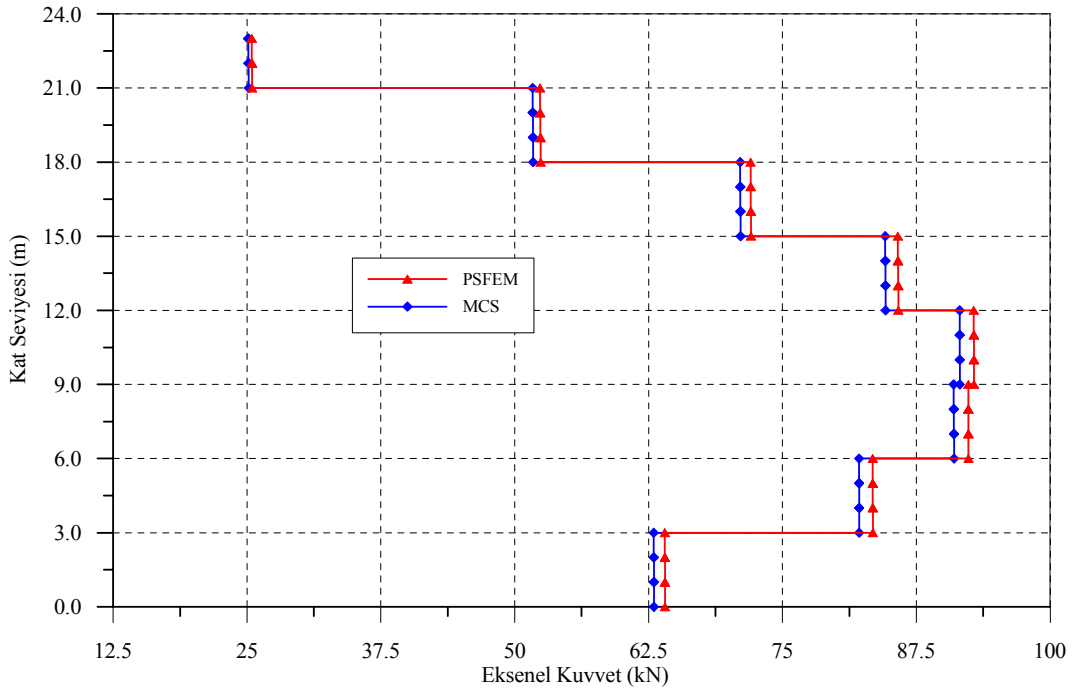
### 3.1.1.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Geometrik özelliklerden enkesit alanının rastgele olarak değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet

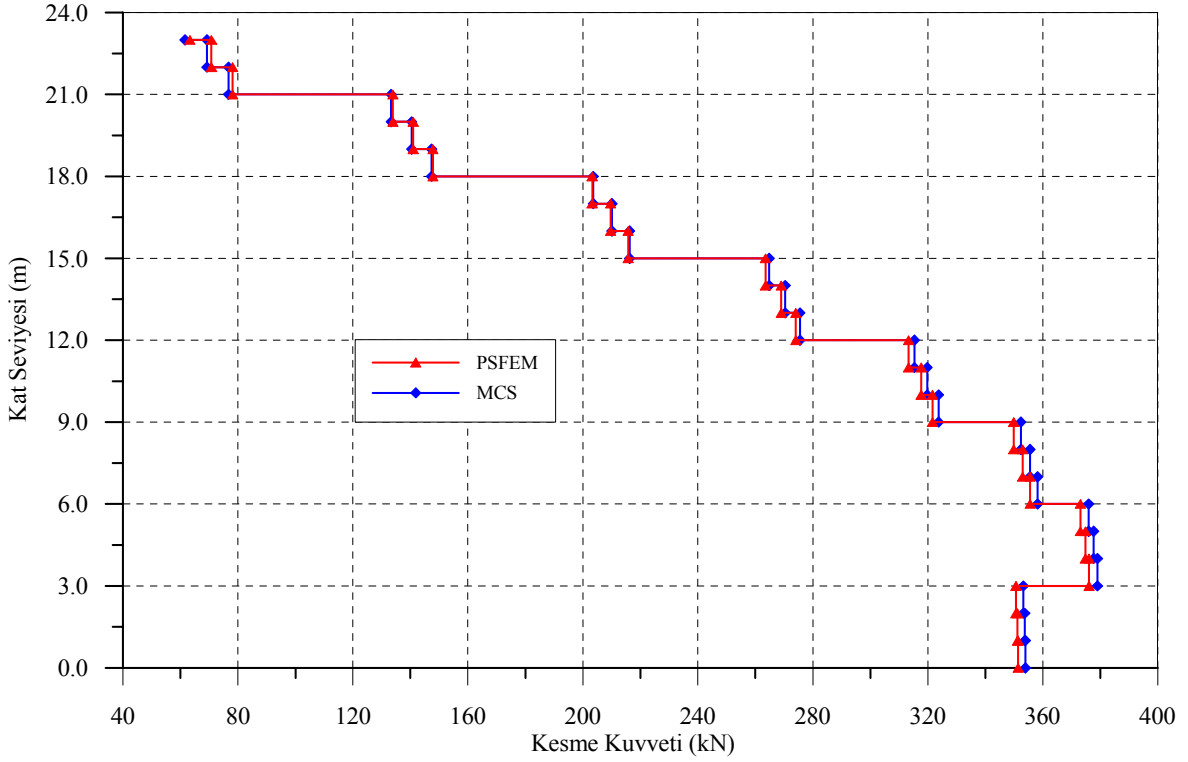
(Şekil 35), kesme kuvveti (Şekil 36) ve eğilme momenti (Şekil 37) değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

Şekil 35'te kompozit çerçevenin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eksenel kuvvetler, iki farklı stokastik yöntem için verilmektedir. Rastgele değiştiği kabul edilen enkesit alanı için, SFEDYNCPR programından elde edilen stokastik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında PSFEM yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda daha büyük eksenel kuvvet değerleri oluşmaktadır (Şekil 35). Bu verilere göre, en küçük eksenel kuvvetlerin olduğu en üst katlarda bu iki yöntemden elde edilen fark %1.2 iken, en büyük eksenel kuvvetlerin olduğu alt katlarda bu oran %1.6 olmaktadır.

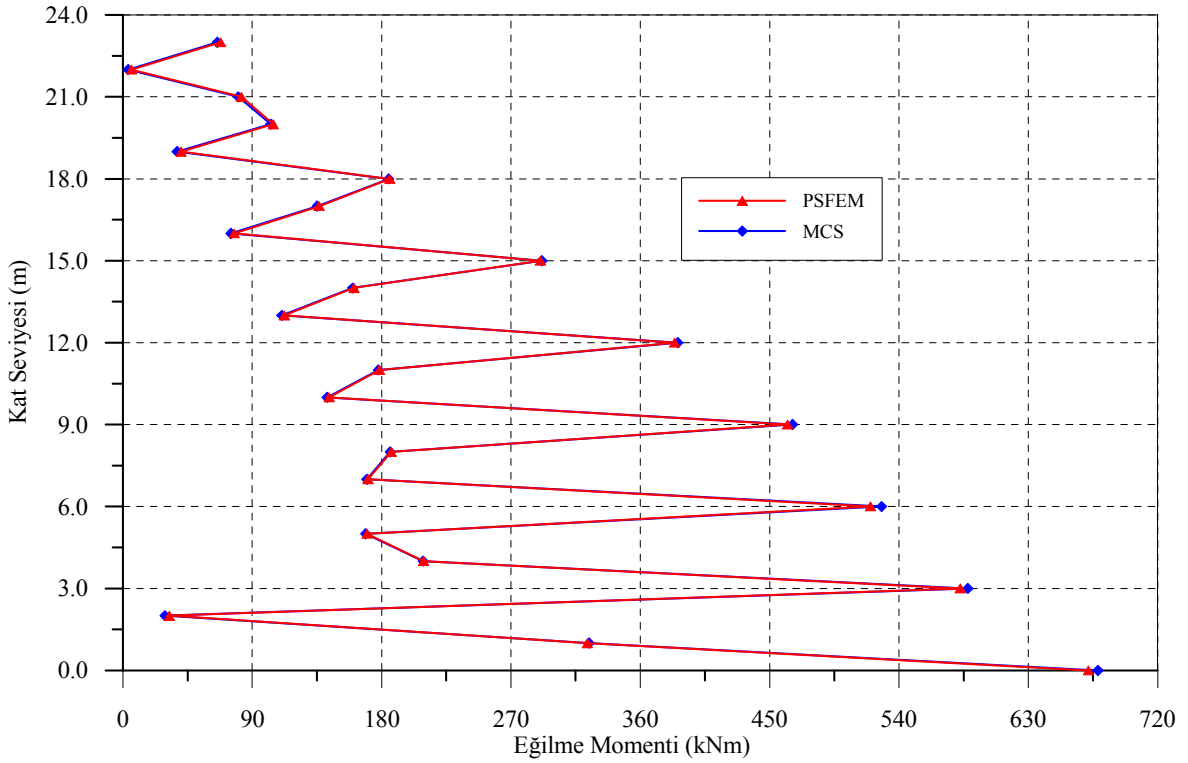
Kompozit kesitli çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri sırasıyla Şekil 36 ve Şekil 37'de görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere, rastgele değişken enkesit alanı için elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçlarında hem kesme kuvveti hem de eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen ortalama fark kesme kuvveti ve eğilme momenti için sırasıyla %0.74 ve %1.71 olmaktadır.



Şekil 35. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eksenel kuvvetler



Şekil 36. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 37. Kompozit çerçeve sistem modelin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri

### 3.1.1.3. Kütle Yoğunluğunun Rastgele Değişken Olması Durumu

Kompozit kesitli kolon ve kirişten oluşan çerçeve sistem modelinin stokastik dinamik analizleri kütle yoğunluğunun belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre gerçekleştirilmektedir. Kütle yoğunluğunun ( $\gamma_\rho$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[\gamma_\rho] = 3790$$

$$\mu(\gamma_\rho, \gamma_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \lambda = 10, \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 152$$

$$\alpha = 0.15$$

#### 3.1.1.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) perturbasyon ve MCS yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen stokastik dinamik analizleri sonucunda elde edilen frekans değerleri birbirleriyle karşılaştırmalı olarak Tablo 11’de sunulmaktadır.

Tablo 11. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken kütle yoğunluğu için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.132	0.137
2	0.843	0.861
3	1.727	1.755
4	1.768	1.805
5	2.400	2.411
6	4.699	4.722
7	5.110	5.132
8	5.733	5.753
9	7.742	7.777
10	8.311	8.383

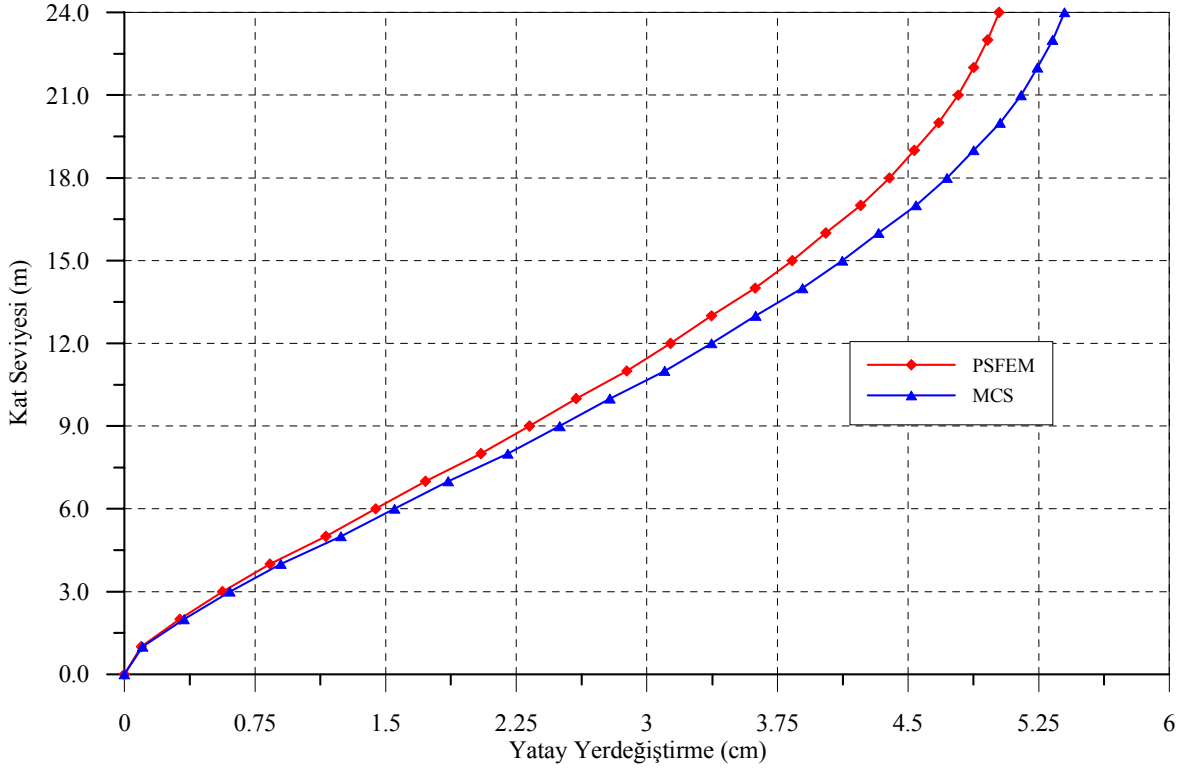
Tablo 11’den görüleceği üzere, PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucunda, kompozit kesitli çerçeve sistem için

ilk on modun frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yönteminden elde edilen frekans değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %1.24 oranında bir fark sergilemektedir. Kütle yoğunluğunun belirsiz olması durumunda diğer stokastik değişkenlerden farklı olarak daha küçük frekanslar elde edilmektedir. Malzeme özelliklerinden kütle yoğunluğunun stokastik olması durumunda en büyük frekansların oluştuğu onuncu moddaki değerler dikkate alındığında, elastisite modülünün rastgele değişken olması durumunda elde edilen değere oranla %0.52, enkesit alanının rastgele değişken olması durumuna göre ise %0.73 oranında daha küçük değerler elde edilmektedir.

### 3.1.1.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistemin, rastgele değişken kütle yoğunluğu için PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilmiş kat seviyesi boyunca en büyük yatay yerdeğiştirme grafikleri Şekil 38'de karşılaştırılmalı olarak yer almaktadır. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) çerçeve sisteme yatay doğrultuda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin stokastik dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, kat seviyesi boyunca paralellik göstermektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle 8 katlı 4 açıklıklı kompozit çerçeveden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %6.42 oranında bir farklılık arz etmektedir. Diğer bir ifadeyle en üst kat için perturbasyon yönteminden elde edilen yatay yerdeğiştirme değeri yaklaşık 5 cm iken MCS yönteminde bu değeri 5.38 cm'dir. MCS yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 38).

Malzeme özelliklerinden kütle yoğunluğunun rastgele olarak değişmesi durumunda diğer stokastik değişkenlere göre daha küçük stokastik yerdeğiştirme değerleri oluşmaktadır. Yatay yerdeğiştirme değerinin en büyük çıktığı en üst kattaki değerler dikkate alındığında, kütle yoğunluğunun stokastik olarak değişmesi durumunda, elastisite modülünün rastgele olması halinde elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla %6.10, enkesit alanının rastgele olması durumundan elde edilen değerlere göre ise %14.60 oranında daha küçük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir.

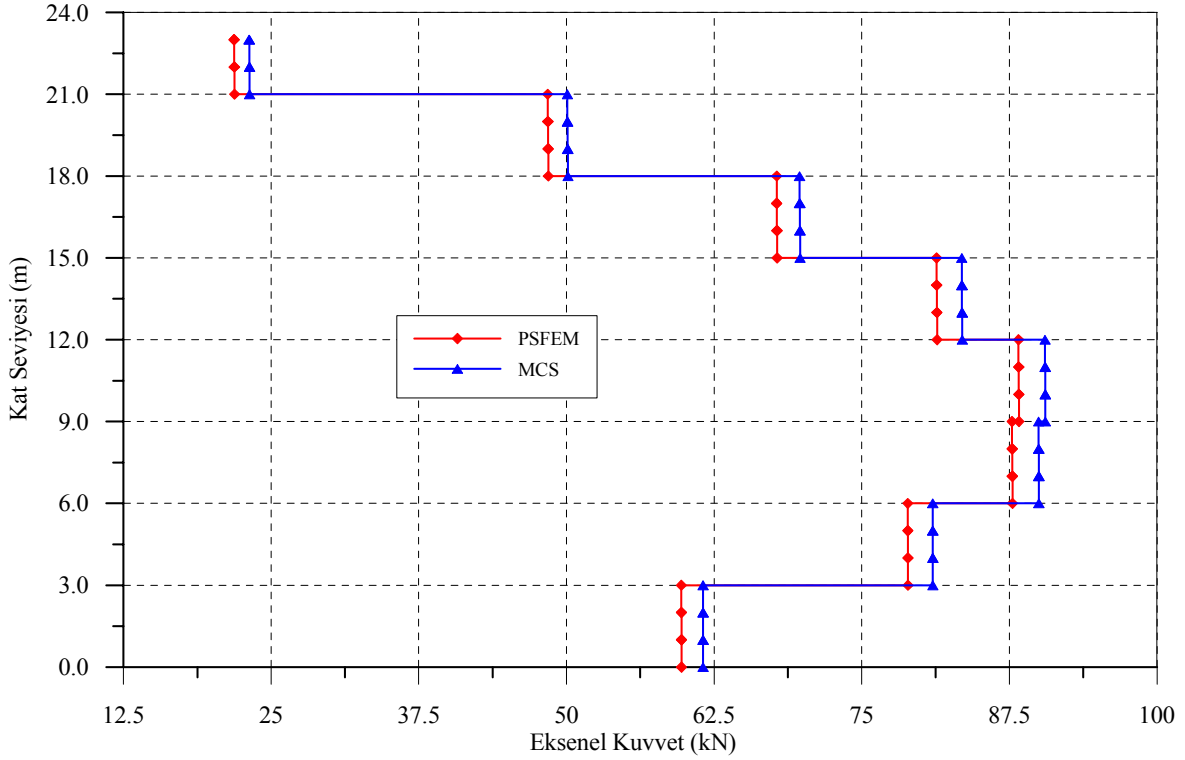


Şekil 38. Kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca yatay doğrultuda meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeleri

### 3.1.1.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Şekil 39-41'de kütle yoğunluğunun rastgele değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin (Şekil 24) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

Seçilen modelin kat seviyesi boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük aksenal kuvvetleri iki farklı stokastik yöntem için Şekil 39'da verilmektedir. Malzeme özelliklerinden kütle yoğunluğunun belirsiz olması durumu için, SFEDYN CPR programından elde edilen stokastik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin bir miktar daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 39). Her iki yöntemin stokastik dinamik analizi sonucunda ortalama %3.10'luk bir fark ortaya çıkmaktadır.

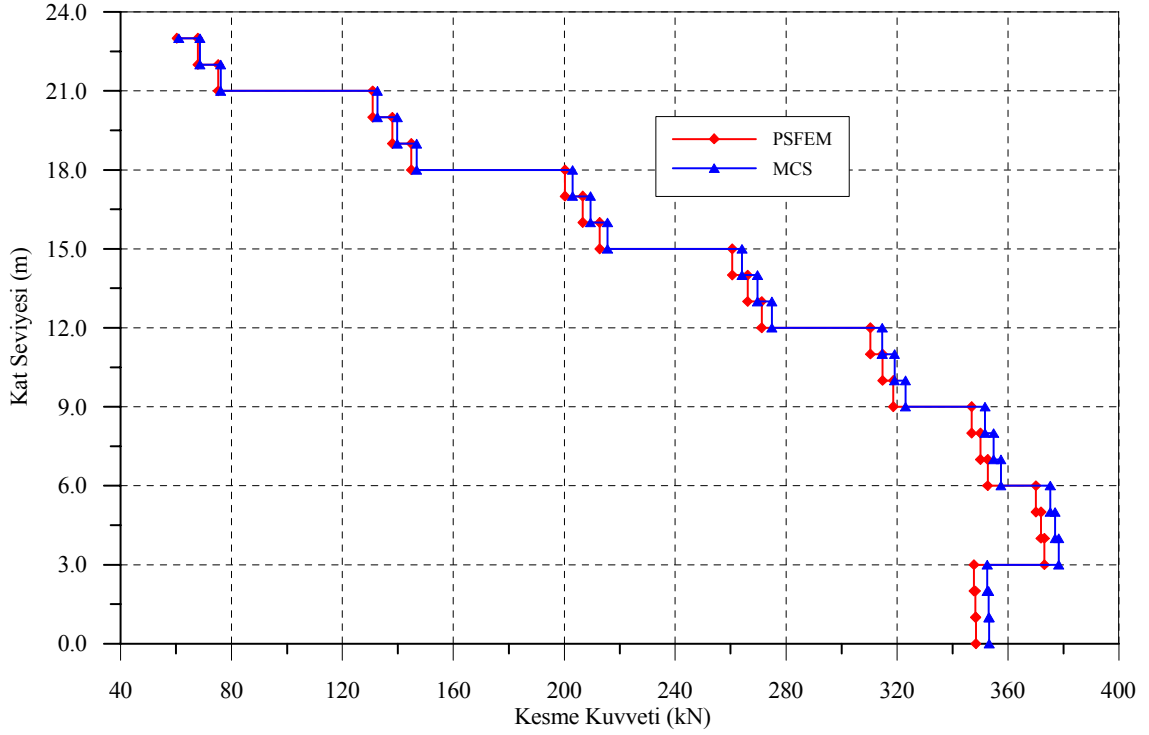


Şekil 39. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eksenel kuvvetler

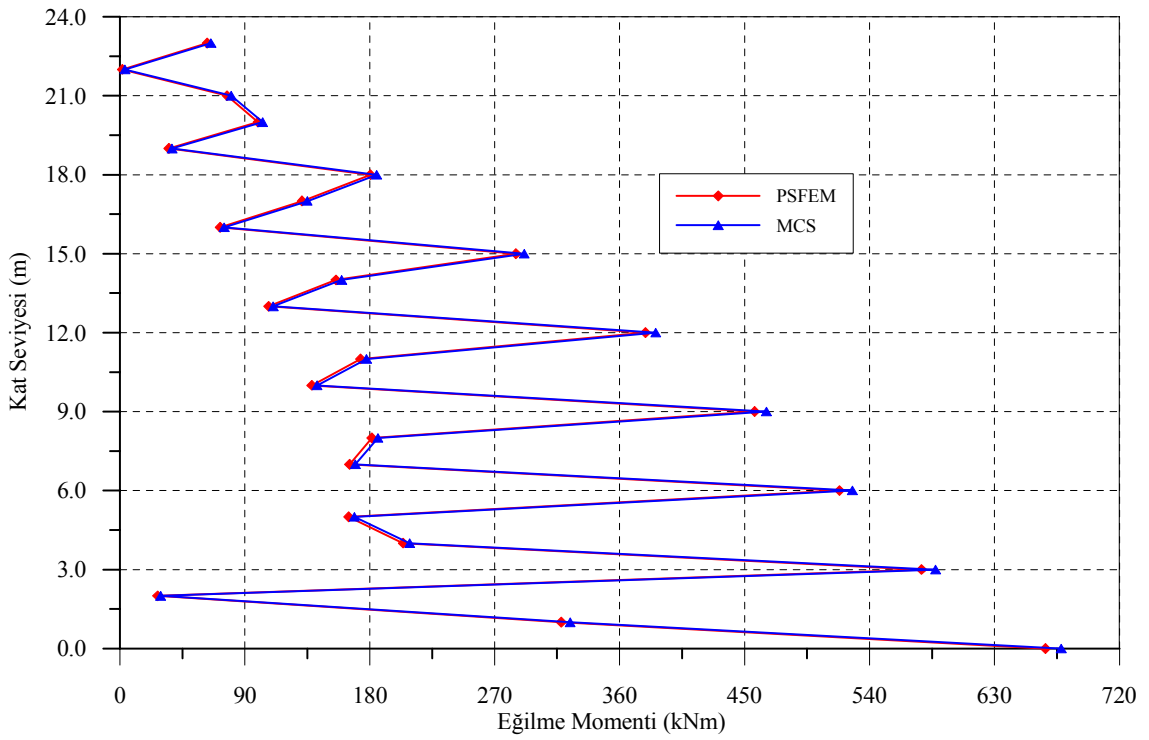
Şekil 40 ve Şekil 41'de rastgele değişkenin kütle yoğunluğu olması durumunda, kompozit çerçeve sistemin sol kenarında, kolon alt uçlarında kat seviyesi boyunca meydana gelen stokastik dinamik kesme kuvvetleri ve eğilme momenti değerleri görülmektedir. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen kesme kuvvetleri arasındaki ortalama fark %1.32, eğilme momentleri arasındaki ortalama fark ise %2.80 olmaktadır.

Kütle yoğunluğunun stokastik olarak değişmesi durumunda, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin en büyük olduğu katlardaki değerler dikkate alındığında, elastisite modülünün rastgele seçildiği durumda elde edilen kesit tesirleri değerlerine göre sırasıyla %1.63, %0.58 ve %0.31 oranlarında, enkesit alanının rastgele seçildiği durumda elde edilen kesit tesirleri değerlerine göre ise sırasıyla %2.55, %1.29 ve %1.75 oranlarında daha küçük olduğu gözlenmektedir.





Şekil 40. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 41. Kompozit kesitli çerçeve sistem modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için yükseklik boyunca kolon alt uçlarında meydana gelen en büyük eğilme momentleri

Bölüm 2.3.1’de verilen kompozit kesitli çerçeve sistemin, malzeme özelliklerinden elastisite modülü ile kütle yoğunluğu ve geometrik özelliklerden enkesit alanının rastgele değişken olması durumları için stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizlerin sonucunda da yerdeğiştirme ve kesit tesirleri sonuçları elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda PSFEM ve MCS yönteminin birbirine yakın sonuçlar verdiği ilgili şekillerden ve verilen yüzde oranlarından görülmektedir. Stokastik analiz yöntemlerinden biri olan MCS yöntemi PSFEM’ e göre çok daha uzun sürede sonuç vermektedir. Burada seçilen sistem için PSFEM bir dakikadan daha az bir sürede stokastik dinamik analizleri gerçekleştirirken, MCS yöntemi ise seçilen 10000 simülasyon sayısı için, yaklaşık yedi buçuk saat gibi uzun bir sürede çözüme ulaşmaktadır. Bu nedenle zamanın önemi düşünüldüğünde, burada elde edilen analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi PSFEM ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analizin, MCS yönteminin yerine kullanılabilecek bir yöntem olduğu gözler önüne serilmiş olmaktadır.

Ayrıca, verilen kompozit kesitli çerçeve sistem modeli (Şekil 24) için, tüm rastgele değişkenlerden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PSFEM analiz sonuçlarından en büyük frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerlerinin enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda elde edildiği görülmektedir.

### **3.1.2. Kompozit Kesitli Köprü Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi**

“2. Yapılan Çalışmalar” bölümünde verilen kompozit kesitli köprü sistem modelinin (Şekil 25) stokastik dinamik analizi perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre, malzeme ve geometrik özelliklerin rastgele değişken olması durumları için incelenmektedir. Bu analizlerin sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesirleri sonuçlarından hareketle PSFEM’in MCS yöntemi yerine kullanılabilirliği tartışılmış olmaktadır.

#### **3.1.2.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu**

Kompozit kesitli kolon ve kirişten oluşan köprü sistem modelinin elastisite modülünün belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri yapılmaktadır.

Kompozit kesitlerden oluşan köprü sistemlerinde, değişim katsayısı (COV) %15 olarak dikkate alınmaktadır. Elastisite modülünün ( $E_\rho$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[E_\rho] = 2.1 \times 10^8 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(E_\rho, E_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.15$$

### 3.1.2.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

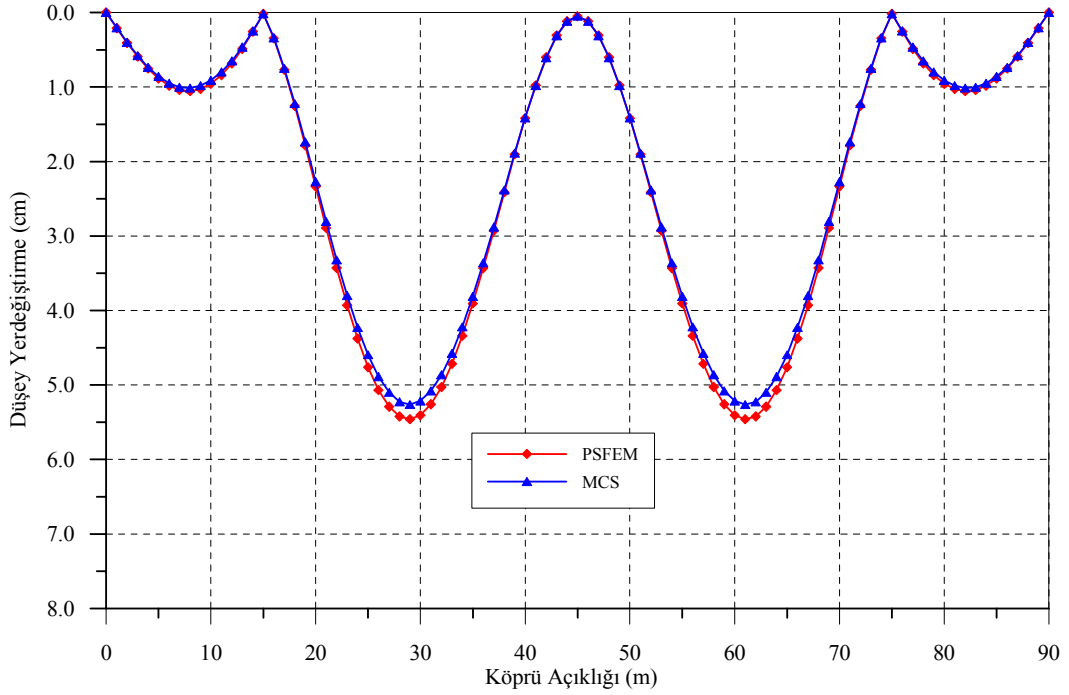
Tablo 12’de kompozit kesitli köprü sistem modelinin (Şekil 25) elastisite modülünün rastgele değişken seçilmesi durumunda, PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilen frekans değerleri verilmektedir. Kompozit kesitli köprü sisteminin, PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analizleri sonucunda ilk on modlarının frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Her iki yöntemin frekans değerleri arasında ortalama %2.64 oranında bir fark bulunmaktadır. Tablodan da görüleceği üzere, PSFEM ile elde edilen frekans değerlerinin, MCS yönteminden elde edilenlere göre bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 12. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.495	0.495
2	1.184	1.179
3	1.341	1.337
4	1.773	1.765
5	1.927	1.924
6	2.882	2.893
7	3.901	3.894
8	4.334	4.192
9	5.012	4.419
10	5.453	5.061

### 3.1.2.1.2. Yerdeşistirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğistirme değerleri Şekil 42’de görülmektedir. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) köprü modeline düşey doğrultuda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin stokastik dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğistirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğistirme değerlerine, köprü tabliyesi boyunca paralel bir durum sergilemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle kompozit köprüünün açıklığı boyunca elde edilen düşey yerdeğistirme değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %2.84 oranında bir farklılık göstermektedir. Köprü tabliyesinin orta kısmında oluşan en büyük düşey yerdeğistirme değerleri, perturbasyon yönteminden elde edilen sonuçlara göre 5.5 cm iken MCS yönteminden elde edilen sonuçlarda bu değer 5.26 cm çıkmaktadır. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük düşey yerdeğistirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 42). Deterministik analiz sonucunda kompozit köprü sisteminin tabliye orta kısmında elde edilen en büyük düşey yerdeğistirme değeri ise 6.38 cm’dir.



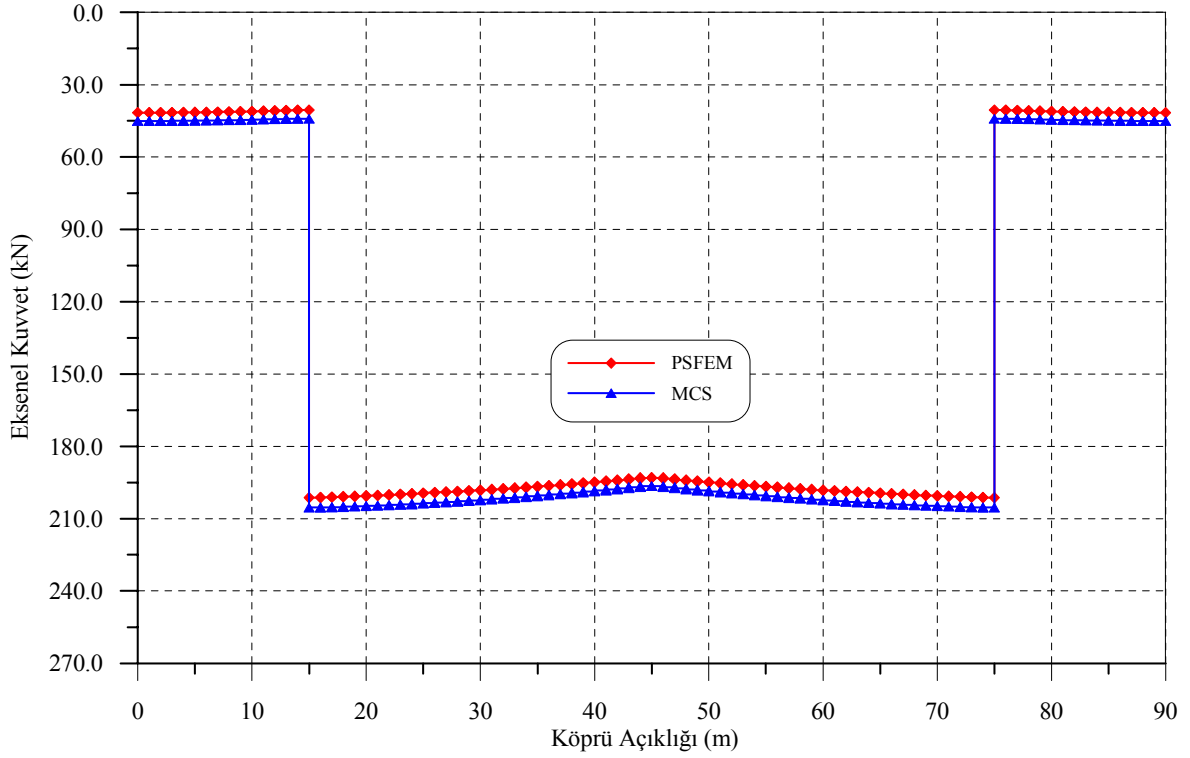
Şekil 42. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğistirmeleri

### 3.1.2.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

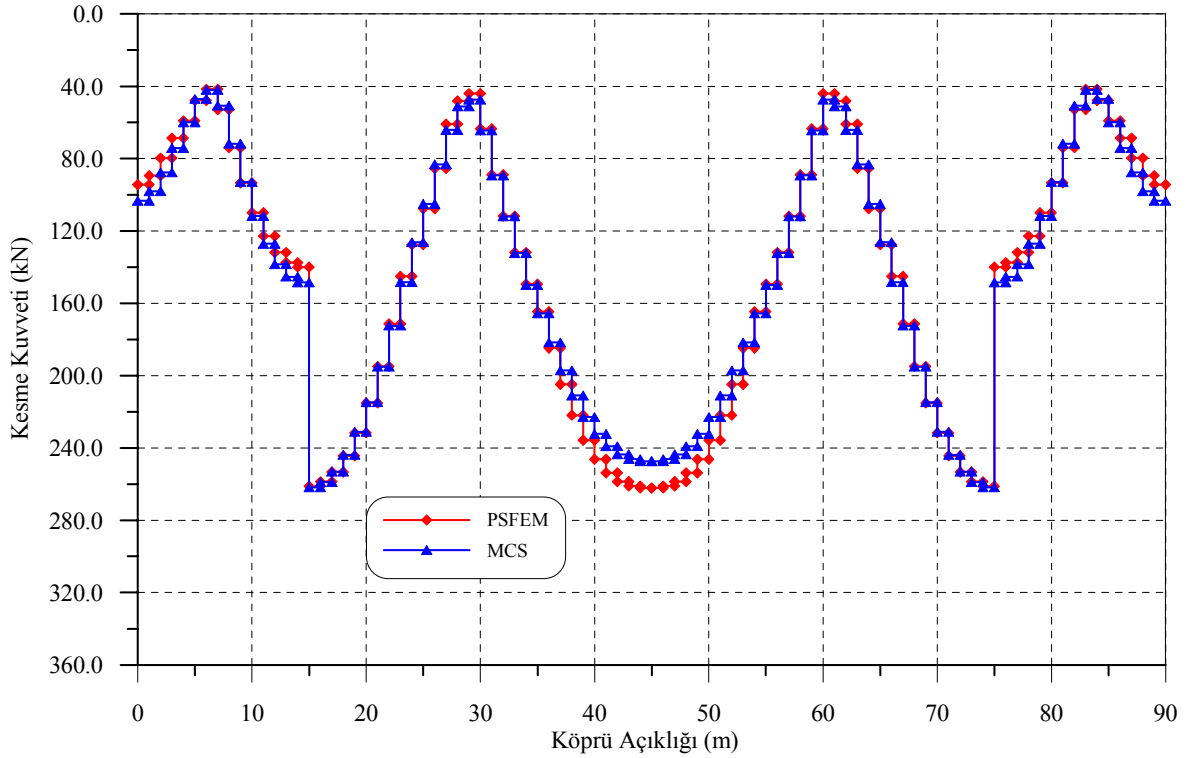
Bir önceki bölümde yerdeğiştirmeler için gerçekleştirilen işlemler, bu bölümde eleman kuvvetleri için yapılmaktadır. Malzeme özelliklerinden elastisite modülünün rastgele değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli köprü sisteminin (Şekil 25) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri her iki yöntem için karşılaştırılmaktadır.

Şekil 43'te seçilen köprü modelinin tabliyesi boyunca meydana gelen en büyük aksenal kuvvetler iki farklı stokastik yöntem için verilmektedir. Rastgele değişken olarak seçilen elastisite modülü için, PSFEM'den elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda bir miktar daha büyük aksenal kuvvet değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 43). Her iki yöntemin stokastik dinamik analizi sonucunda elde edilen aksenal kuvvetlerden ortalama %3.9'luk bir fark ortaya çıktığı gözlemlenmektedir.

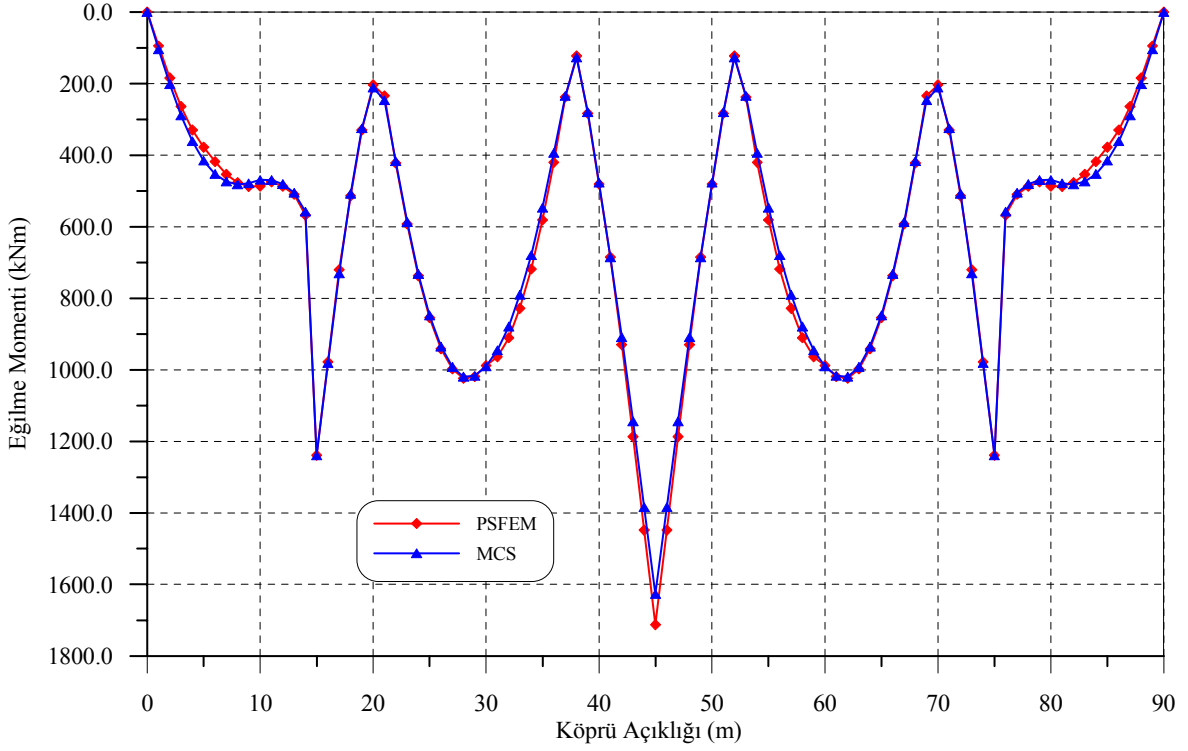
Şekil 44-45'te kompozit köprü modelinin tabliyesi boyunca meydana gelen stokastik dinamik kesme kuvvetleri ve eğilme momenti değerleri görülmektedir. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen en büyük kesme kuvveti değerleri arasındaki ortalama fark %3.22, en büyük eğilme momenti değerleri arasındaki ortalama fark ise %3.02 olmaktadır.



Şekil 43. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük eksenel kuvvetleri



Şekil 44. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 45. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliyesi boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri

### 3.1.2.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

Kompozit kesitlerden oluşan köprü sisteminin, enkesit alanının rastgele değişken olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Enkesit alanının ( $A_p$ ) rastgele değişken olması durumunda, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E [A_p] = 0.061 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(A_\rho, A_\sigma) = e^{\left( \frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda} \right)} \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.15$$

### 3.1.2.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli köprü sistem modelinin (Şekil 25) enkesit alanının belirsiz olması durumu için SFEDYN CPR programı kullanılarak PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilen frekans değerleri Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.498	0.504
2	1.198	1.249
3	1.425	1.499
4	1.785	2.492
5	2.691	2.742
6	3.524	3.628
7	4.228	4.454
8	4.874	4.914
9	5.892	5.919
10	6.658	6.702

Kompozit kesitli köprü sistem modelinin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analizleri sonucunda bulunan ilk on modunun frekans değerleri incelendiğinde, birbirine oldukça yakın değerler elde edildiği görülmektedir (Tablo 13). Köprü sistemi için, MCS yönteminden elde edilen frekans değerleri daha büyük çıkmaktadır. MCS yöntemine göre frekans değerleri arasındaki ortalama fark %5.03'tür. Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda PSFEM'den elde edilen değerler, elastisite modülünün belirsiz olması durumunda oluşan frekans değerlerine oranla ortalama %10.68'lik daha büyük bir fark oluşturmaktadır.

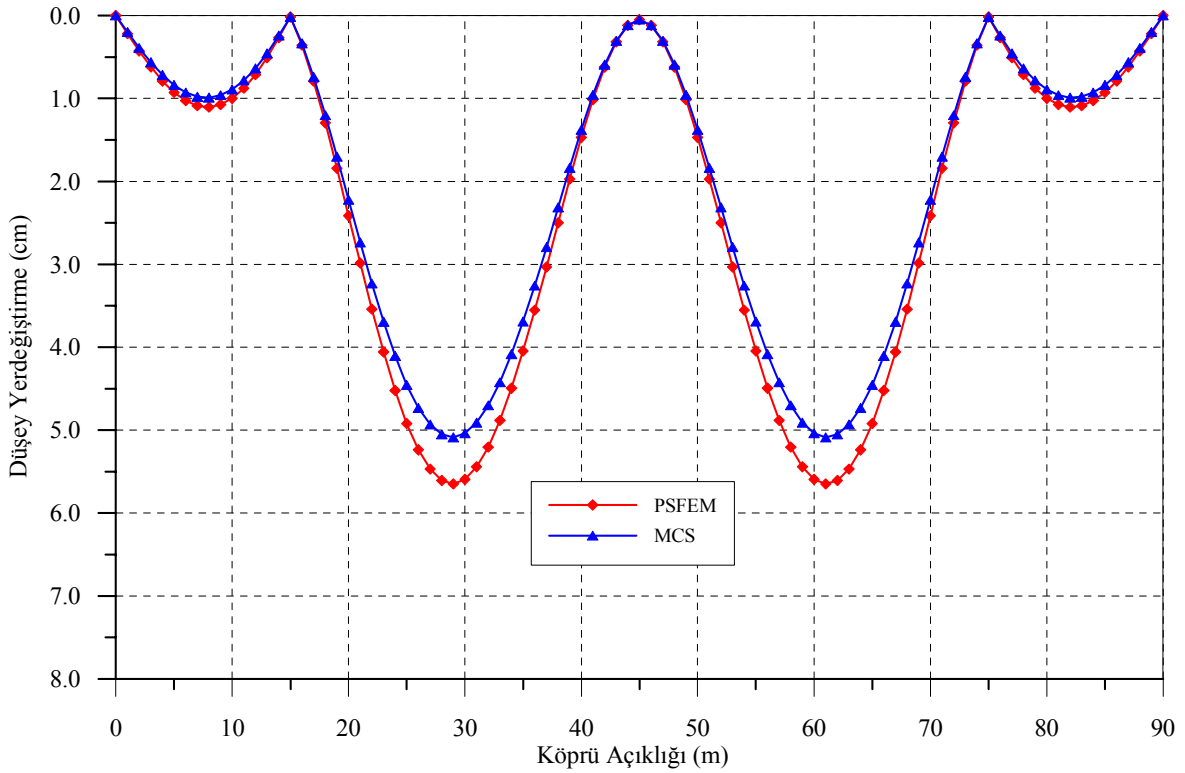
### 3.1.2.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Bölüm 2.3.2.'de verilen kompozit kesitli köprü sistem modelinin enkesit alanının belirsiz olması durumu için gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirme grafiği Şekil 46'da incelenmektedir. İki yöntem sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, PSFEM ile kompozit köprüden elde edilen düşey yerdeğiştirme



değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %8.80'lik bir farklılık göstermektedir. Diğer bir ifadeyle köprü tabliyesinin orta noktası için perturbasyon yönteminden elde edilen düşey yerdeğiştirme değeri yaklaşık 5.66 cm iken MCS yönteminde bu değer 5.09 cm'dir. PSFEM'den elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin MCS yönteminden elde edilen değerlerden biraz daha büyük olduğu grafikten görülmektedir.

Enkesit alanının stokastik değişken olması durumunda köprü tabliyesinin orta kısmında oluşan maksimum yerdeğiştirme değerleri dikkate alındığında diğer rastgele değişkenlerden elastisite modülünden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine oranla bu değer %3.24 daha büyük olduğu görülmektedir.

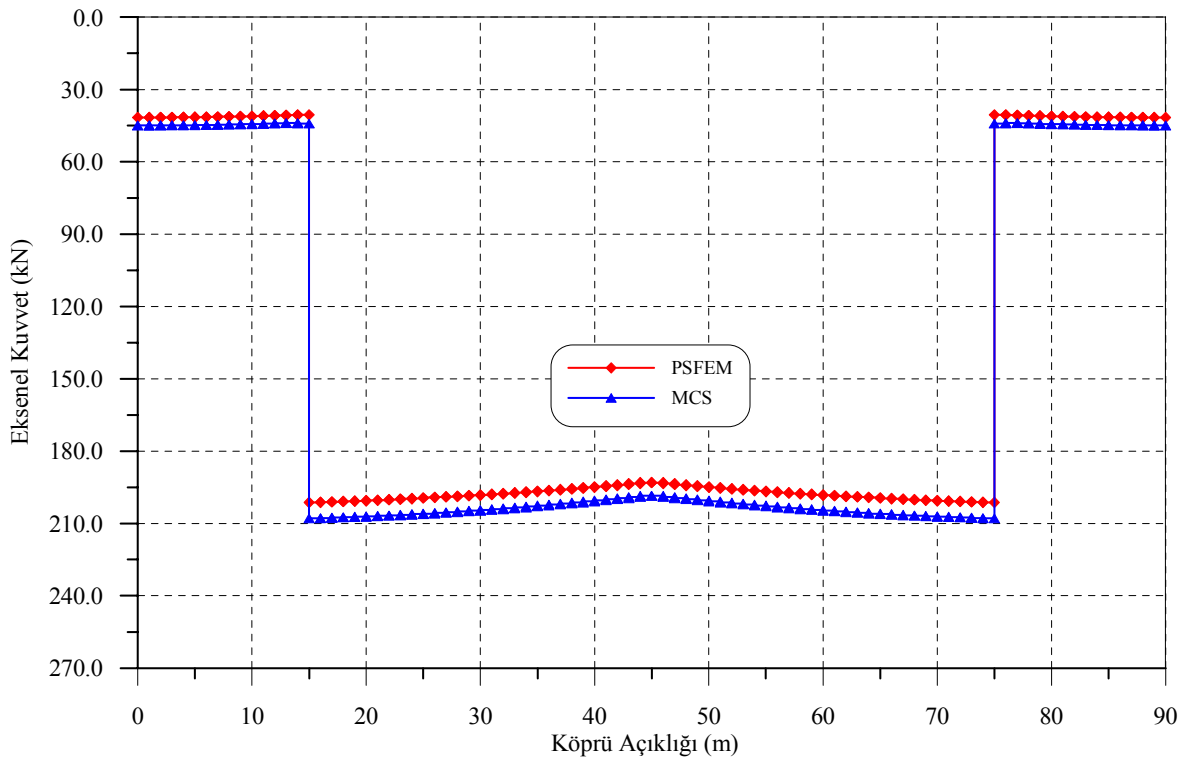


Şekil 46. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirmeleri

### 3.1.2.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

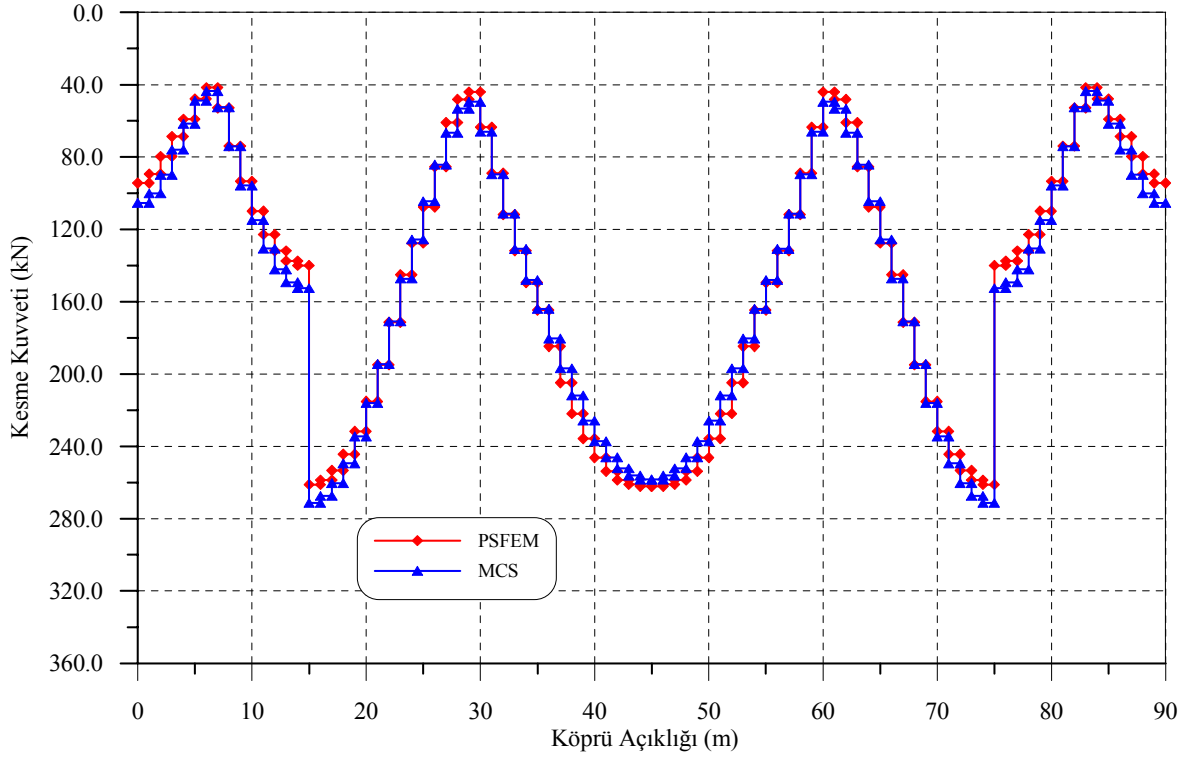
Şekil 47-49'da geometrik özelliklerden enkesit alanının rastgele değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli köprü modelinin (Şekil 25) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

Kompozit köprünün tabliyesi boyunca kiriş sol uçlarında meydana gelen en büyük aksenal kuvvetler iki farklı stokastik yöntem için Şekil 47’de verilmektedir. Enkesit alanının stokastik değişimi için PSFEM’den elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında bu yöntemin stokastik dinamik analizi sonucunda daha büyük aksenal kuvvet değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 47). Elde edilen verilere göre, %15 değişim katsayısı için her iki yöntem sonucunda bulunan aksenal kuvvet değerleri arasındaki ortalama fark ise %4.50’dir.

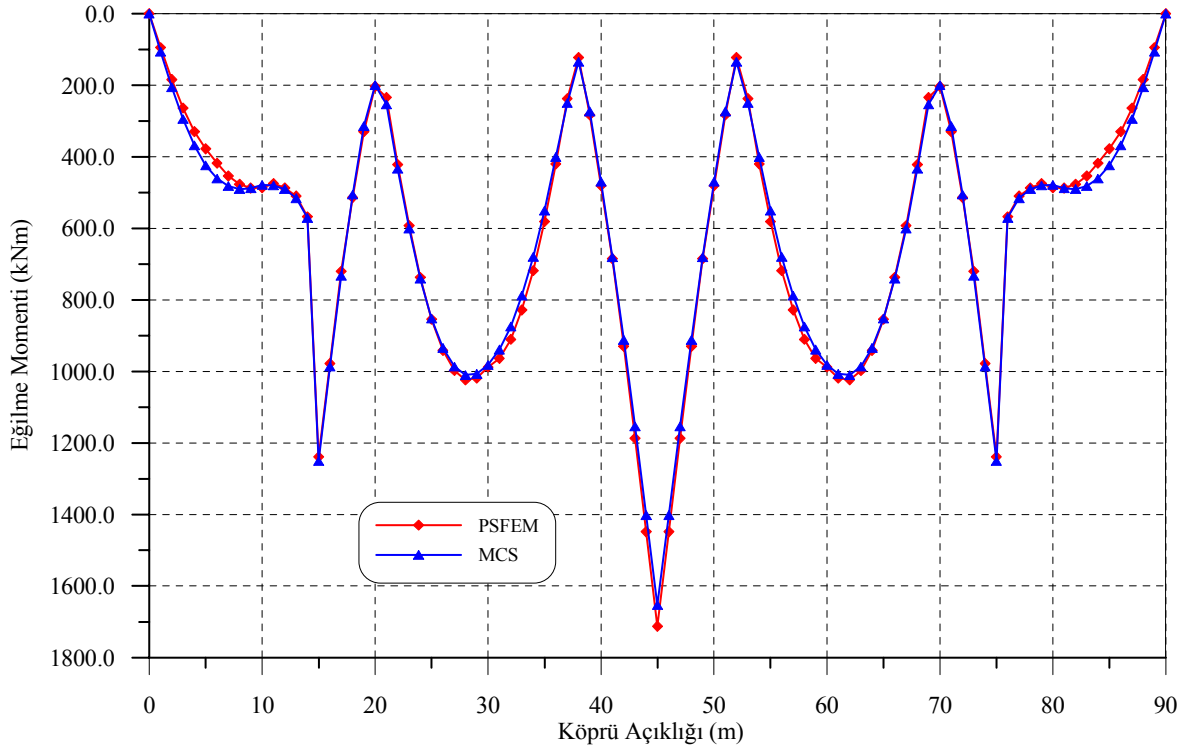


Şekil 47. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük aksenal kuvvetleri

Şekil 48-49’da kompozit kesitli köprü sisteminin tabliyesi boyunca meydana gelen en büyük kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri görülmektedir. Rastgele değişken enkesit alanı için elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçlarında hem kesme kuvveti hem de eğilme momenti değerlerinin birbirine yakın olduğu şekillerden görülmektedir. PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen ortalama fark, kesme kuvveti ve eğilme momenti için sırasıyla %3.91 ve %3.68 olmaktadır.



Şekil 48. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 49. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri

Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin en büyük olduğu elemandaki değerler dikkate alındığında, bu değerlerin elastisite modülünün rastgele seçilmesi halinde elde edilen değerlere oranla sırasıyla %1.63, %0.58 ve %0.31 daha büyük olduğu görülmektedir.

### 3.1.2.3. Kütle Yoğunluğunun Rastgele Değişken Olması Durumu

Kompozit kesitli kolon ve kirişten oluşan köprü modelinin malzeme özelliklerinden kütle yoğunluğunun belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kütle yoğunluğunun ( $\gamma_\rho$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[\gamma_\rho] = 7860$$

$$\mu(\gamma_\rho, \gamma_\sigma) = e^{\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \lambda = 10 \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.15$$

#### 3.1.2.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli köprü modeli (Şekil 25) için son karşılaştırma rastgele değişken kütle yoğunluğunun seçilmesiyle PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilmiş frekans değerleri için Tablo 14'te yer almaktadır.

PSFEM ve MCS yöntemlerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucunda, kompozit kesitli çerçeve sistem için ilk on modun frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Tablo 14). Kütle yoğunluğunun stokastik değişimi için MCS yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen frekans değerlerinin bir miktar daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Buna göre MCS yönteminden elde edilen frekans değerleri, PSFEM'den elde edilen değerlere göre ortalama %1.54 daha büyük olmaktadır. Malzeme özelliklerinden kütle yoğunluğunun rastgele değişken olması durumunda PSFEM'den elde edilen frekans değerleri, elastisite modülünün belirsiz olması durumunda oluşan frekans değerlerine

oranla ortalama %1.33 daha büyük, enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda hesaplanan değerlere oranla ise %21.06 daha küçük bir fark oluşturmaktadır.

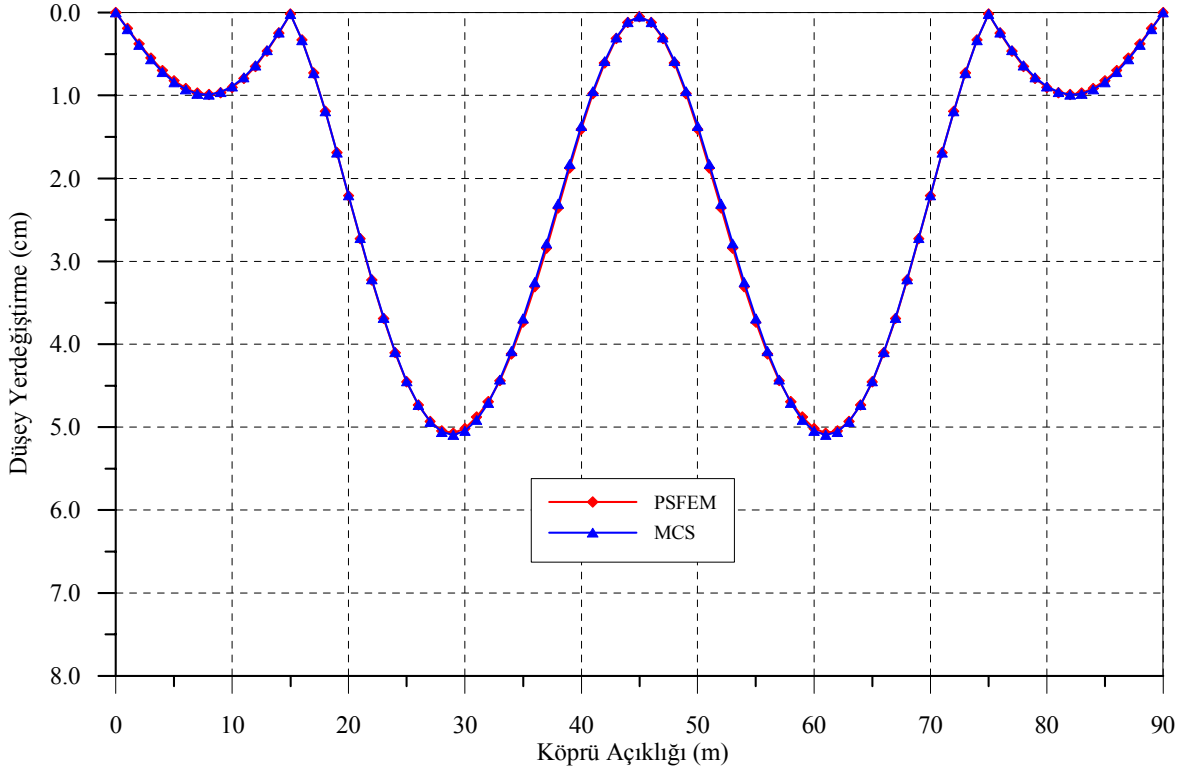
Tablo 14. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için doğal frekans değerleri

Mod numarası	Frekanslar (Hz)	
	PSFEM	MCS
1	0.494	0.501
2	1.147	1.197
3	1.342	1.357
4	1.775	1.794
5	1.927	1.950
6	2.931	2.926
7	3.894	3.949
8	4.311	4.245
9	4.439	4.470
10	4.987	5.126

### 3.1.2.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli köprü modelinin PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş köprü açıklığı boyunca en büyük düşey yerdeğiştirme grafikleri Şekil 50’de görülmektedir. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) köprü sistemine düşey doğrultuda uygulanmaktadır. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, tabliye boyunca yakın bir seyir izlemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle 90 m’lik kompozit köprüden elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre ortalama %1.41 oranında küçük bir farklılık arz etmektedir. Diğer bir ifadeyle köprü tabliyesinin orta noktasında perturbasyon yönteminden elde edilen düşey yerdeğiştirme değeri 5.07 cm, MCS yönteminde ise bu değeri 5.09 cm’dir.

Üç farklı stokastik özellik birlikte değerlendirildiğinde, enkesit alanının stokastik olması durumunda en büyük düşey yerdeğiştirmelerin oluştuğu noktada, elastisite modülüne göre %3.3, enkesit alanına göre ise %10.21 oranında bir fark elde edilmiş olmaktadır.

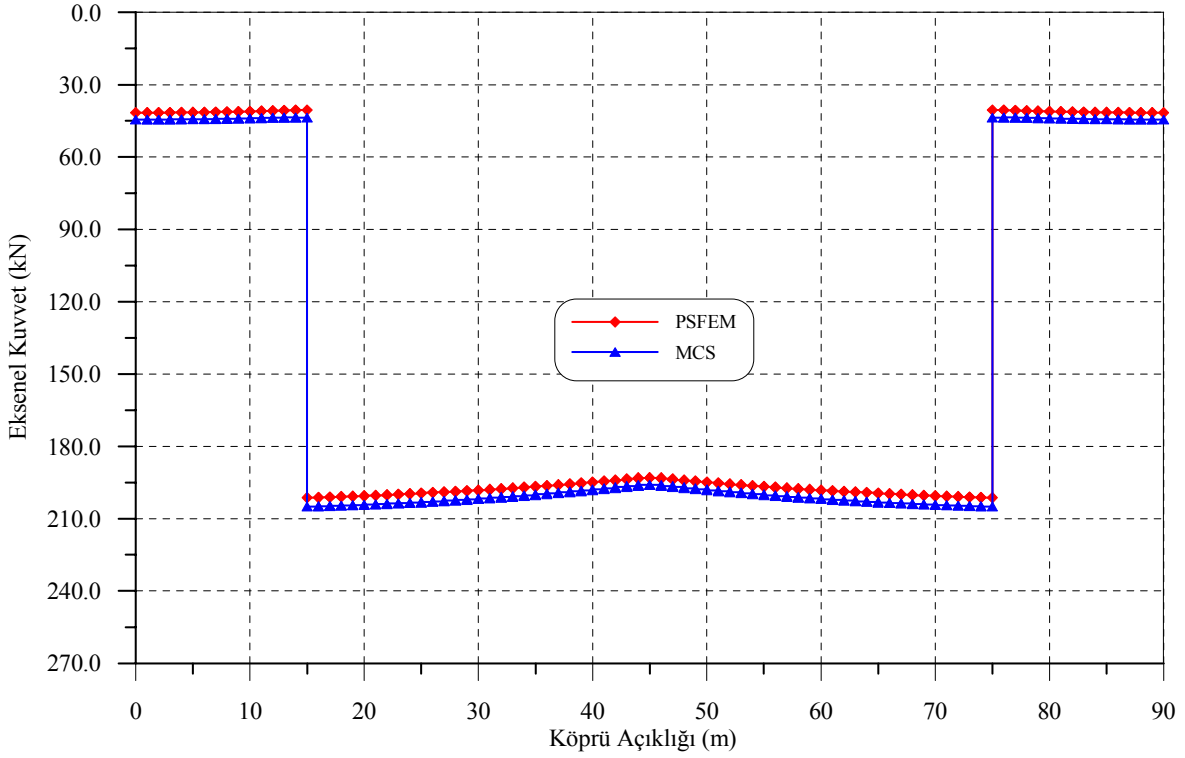


Şekil 50. Kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük düşey yerdeğiştirmeleri

### 3.1.2.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Kütle yoğunluğunun rastgele değiştiği kabulüyle, kompozit kesitli köprü modelinin (Şekil 25) PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik çözümlenmeleri sonucunda elde edilen aksenal kuvvet (Şekil 51), kesme kuvveti (Şekil 52) ve eğilme momenti (Şekil 53) değerleri birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

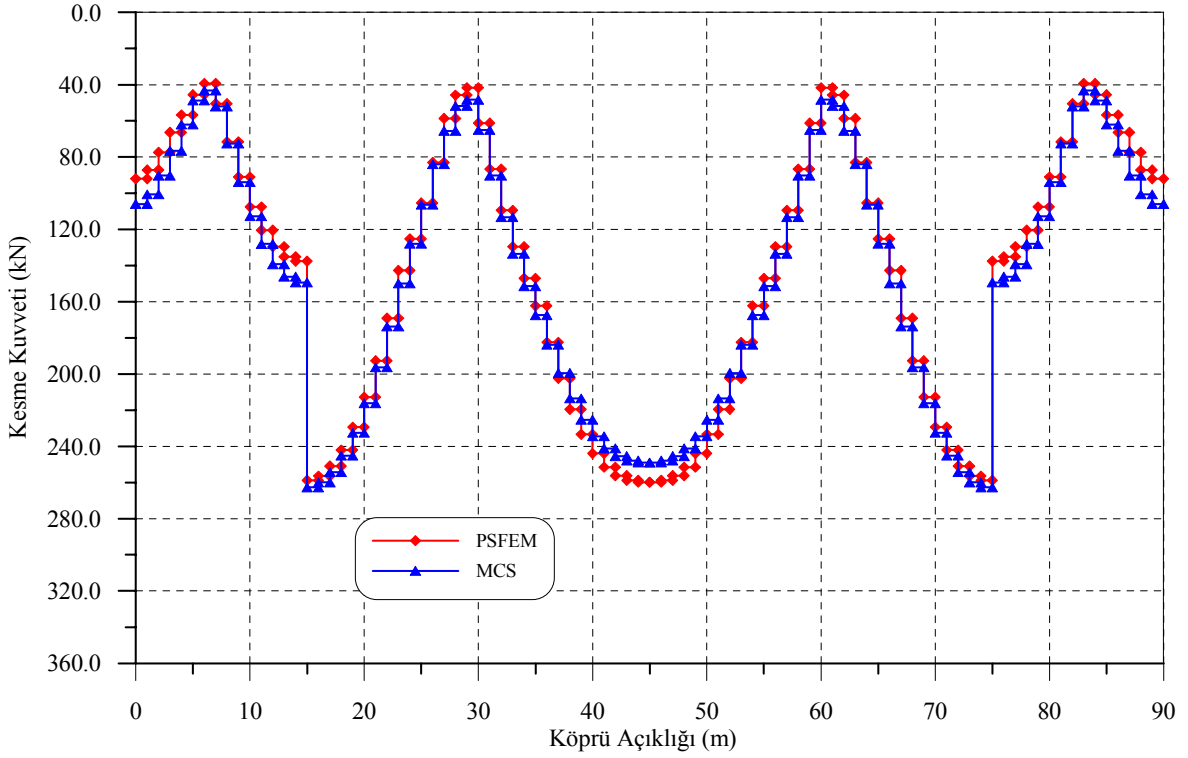
Şekil 51'de seçilen modelin tabliyesi boyunca meydana gelen en büyük aksenal kuvvetler iki farklı stokastik yöntem için verilmektedir. Aksenal kuvvet değerleri köprü açıklığının orta noktasında en büyük değere ulaşmışken, bu değer kenar açıklıklar boyunca en küçük değerleri aldığı görülmektedir. Rastgele değişken seçilen kütle yoğunluğu için, SFEDYNCPR programından elde edilen stokastik analiz sonuçları, MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında MCS yönteminin stokastik dinamik analizi sonucunda biraz daha büyük aksenal kuvvet değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 51). Her iki yöntem arasındaki ortalama fark (MCS yöntemine göre) %3.35'tir.



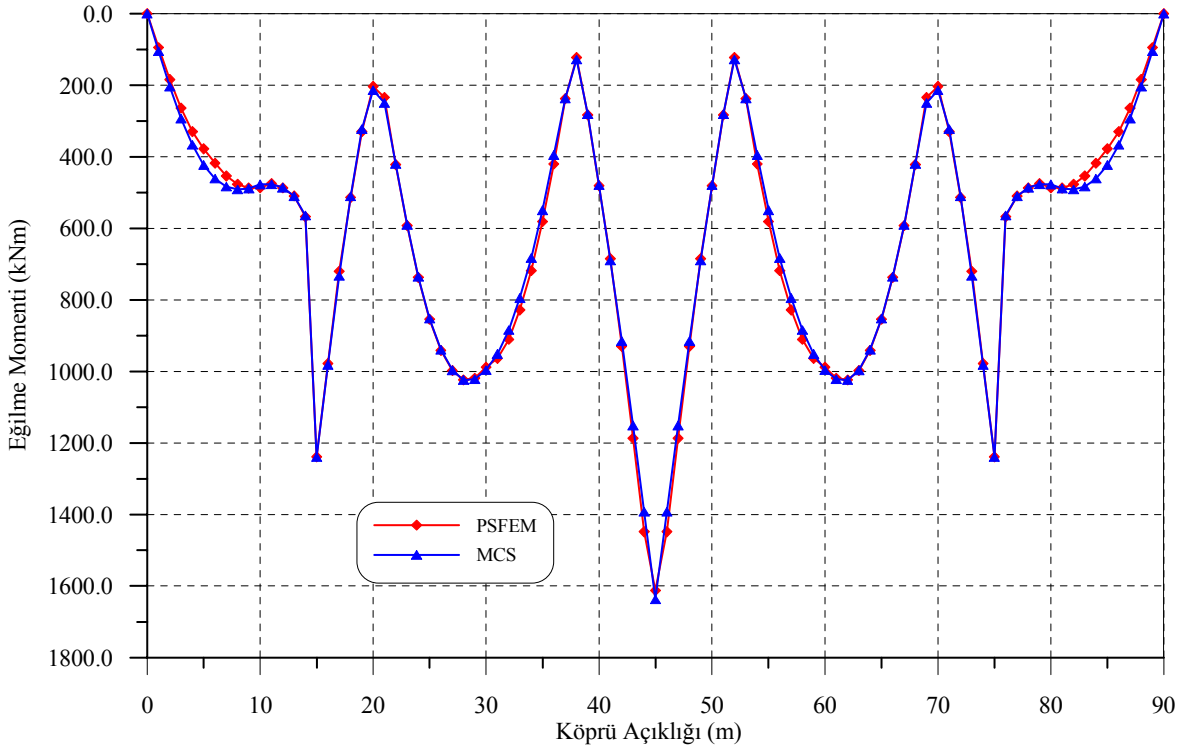
Şekil 51. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük eksenel kuvvetleri

Köprü modelinin tabliyesi boyunca meydana gelen en büyük kesme kuvveti (Şekil 52) ve eğilme momenti (Şekil 53) değerlerinin iki farklı stokastik yöntemden elde edilen sonuçları grafiklerle sunulmaktadır. Şekil 52-53'ten görülebileceği gibi iki yöntemden elde edilen en büyük kesme kuvvetleri ve moment değerleri için de benzer yakınsama oranları söz konusudur. Bölüm 2.3.2.'de verilen kompozit kesitli köprü modelinde, kesme kuvveti ve eğilme momentleri için bu iki stokastik yöntemden elde edilen ortalama fark sırasıyla %5.08 ve %2.97 olarak elde edilmektedir.

Bölüm 2.3.2.'de verilen kompozit kesitli köprü sistemin malzeme özelliklerinden elastisite modülü ile kütle yoğunluğu ve geometrik özelliklerden enkesit alanının belirsiz olması durumları için stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda PSFEM ve MCS yönteminin birbirine yakın sonuçlar verdiği ilgili şekillerden ve verilen yüzde oranlarından görülmektedir. Burada seçilen sistem için PSFEM iki dakika gibi çok kısa zamanda stokastik analizleri gerçekleştirirken, MCS yöntemi ise seçilen 10000 simülasyon sayısı için, yaklaşık 15 saat gibi uzun bir sürede çözüme ulaşmaktadır.



Şekil 52. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 53. Kompozit kesitli köprü modelinin rastgele değişken kütle yoğunluğu için tabliye boyunca elde edilen en büyük eğilme momentleri



Şekil 25'te kesit özellikleri ve boyutları verilen kompozit kesitli köprü modelinin, tüm rastgele değişkenler için elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda PSFEM'den en büyük yerdeğiştirme, aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin elde edildiği görülür. Kütle yoğunluğunun belirsiz olması durumunda ise en küçük stokastik dinamik tepkiler elde edilmiş bulunmaktadır.

### **3.2. Yarı Rijit Bağlı Yapı Sistemlerinin İncelenmesi**

Bu bölümde Şekil 26 ve Şekil 27'de boyutları ve kesit özellikleri verilen yarı rijit bağlı sistemlerin, malzeme özellikleri, geometrik özellikler ve başlangıç rijitliğinin (yay sabiti) rastgele değişken seçilmesi durumlarında gerçekleştirilen stokastik dinamik analizleri sonucunda elde edilen frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesirleri değerlendirmeleri yer almaktadır.

#### **3.2.1. Yarı Rijit Bağlı Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi**

2.3.3 bölümünde özellikleri verilen, yarı rijit bağlantılı çelik çerçeve sistemin (Şekil 26) stokastik dinamik analizleri perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Seçilen çerçeve sistemin kolon ve kirişlerinin rijit, mafsallı ve yarı rijit bağlı olduğu kabul edilerek analizler yapılmıştır. Kiriş-kolon bağlantılarında iki türlü yarı rijit bağlı olma durumu dikkate alınmıştır. Bu bağlantılardan ilkinin zayıf (%50) ikincisinin ise nispeten daha rijit (%75) bağlı olduğu dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Sekulovic v.d, 2002). Analizlerde yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depremi YPT330 bileşeni dikkate alınmaktadır. Bu depreme ait grafik Bölüm 2.2.1.1.'de verilmektedir.

##### **3.2.1.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu**

Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin elastisite modülünün belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistem için, değişim katsayısı %10 olduğu kabulü yapılarak çözümler elde edilmektedir (Melchers, 1999). Elastisite modülünün ( $E_p$ ) rastgele değişken

olması durumu için, ortalama değer ve korelasyon fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[E_\rho] = 2.1 \times 10^8 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(E_\rho, E_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 72$$

### 3.2.1.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağlantılara sahip çelik çerçeve sistemin tam rijit, mafsal ve yarı rijit bağlantılara sahip olması durumları için elde edilen doğal frekanslar Tablo 15'te sunulmaktadır. Bağlantı esneklikleri, düşük modlarda genellikle binaların sismik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan dolayı bu tür yapıların deprem analizi için çok büyük önem arz etmektedirler. Tablo 15'te PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin de birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. MCS yöntemine göre çerçeve sistemin rijit, yarı rijit ve mafsal bağlantılı olması durumlarında frekans değerleri arasındaki ortalama fark, %0.15-%0.21 oranında değişmektedir. İki yöntem birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği için stokastik dinamik analizde PSFEM'in MCS yerine kullanılabilir bir yöntem olduğunu öne çıkmaktadır. Bağlantı rijitliğindeki azalma ile frekans değerlerinin de azaldığı ilgili tablodan görülmektedir.

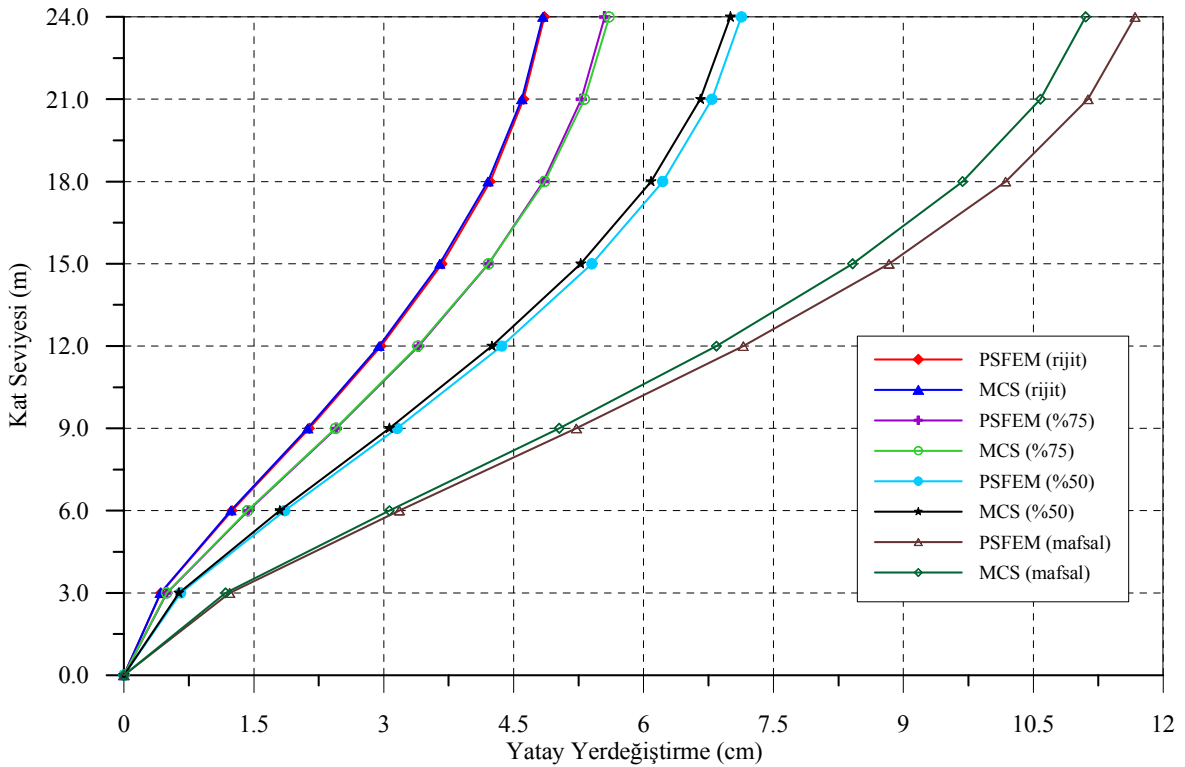
Tablo 15. Yarı rijit bağı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağı	%50 bağı	Mafsalsal	Rijit	%75 bağı	%50 bağı	Mafsalsal
1	1.863	1.791	1.668	1.040	1.859	1.787	1.664	1.038
2	6.075	5.819	5.392	3.294	6.062	5.807	5.380	3.290
3	11.536	10.984	10.081	5.954	11.515	10.962	10.061	5.947
4	18.564	17.527	15.886	9.006	18.532	17.495	15.856	8.996
5	27.165	25.367	22.634	12.253	27.119	25.321	22.592	12.241
6	36.847	33.952	29.754	15.371	36.784	33.888	29.698	15.358
7	41.473	41.455	36.252	17.978	41.401	41.368	36.182	17.965
8	42.317	42.090	40.859	19.715	42.245	41.941	40.650	19.702
9	43.316	42.253	41.423	41.275	43.246	42.262	41.463	41.203
10	46.283	43.202	42.143	41.609	46.201	43.132	42.089	41.538

### 3.2.1.1.2. Yerdeğıştirmelerin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için geleneksel (rijit ve mafsal bağı) ve yarı rijit bağlantılar (%75 ve %50 bağı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğıştirme değerleri Şekil 54'te karşılaştırılmaktadır. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) çerçeve sisteme yatay doğrultuda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin stokastik dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğıştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğıştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen yatay yerdeğıştirme değerleri, rijit bağı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.72, nispeten rijit ve zayıf bağı olması durumlarında ise sırasıyla, %0.49 ve %2.55 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsalsal sistem olması halinde ise ortalama fark %4.58'dir. Çerçeve sistemin rijit bağı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğıştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 4.86 cm iken MCS yönteminde bu değer 4.84 cm'dir. %75 ve %50 bağı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 5.55 cm ve 7.13 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 5.60 cm ve 7.01 cm yatay yerdeğıştirme değerleri elde edilmiş olmaktadır. Mafsalsal sistem

olması halinde bu değerler sırasıyla 11.68 cm ve 11.10 cm değerini almaktadır. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir (Şekil 54). Şekilden ve sayısal değerlerden görüldüğü gibi, çerçeve sistemin yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Bu farklar bağlantı rijitliğinde azalma (%50 bağlı) olması ile artmaktadır. Çerçeve sistemin en üst katında oluşan maksimum yerdeğiştirme değeri için rijit ve yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit (%75) ve zayıf bağlı (%50) olması durumları için sırasıyla, %12.53 ve %31.91'dir. Mafsal bağlı olduğu düşünülerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda ise en büyük yerdeğiştirme değerleri bulunmuştur.



Şekil 54. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yatay yerdeğiştirmeleri

Şekil 54'ten görüldüğü gibi rijit ve yarı rijit bağlı olması durumları arasında (özellikle zayıf bağlı olması halinde) çerçeve sistem için elde edilen yerdeğiştirmeler arasında önemli farklar bulunmaktadır. Yine şekilden görüldüğü gibi bütün bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerinden rastgele değişken elastisite modülü için elde edilen

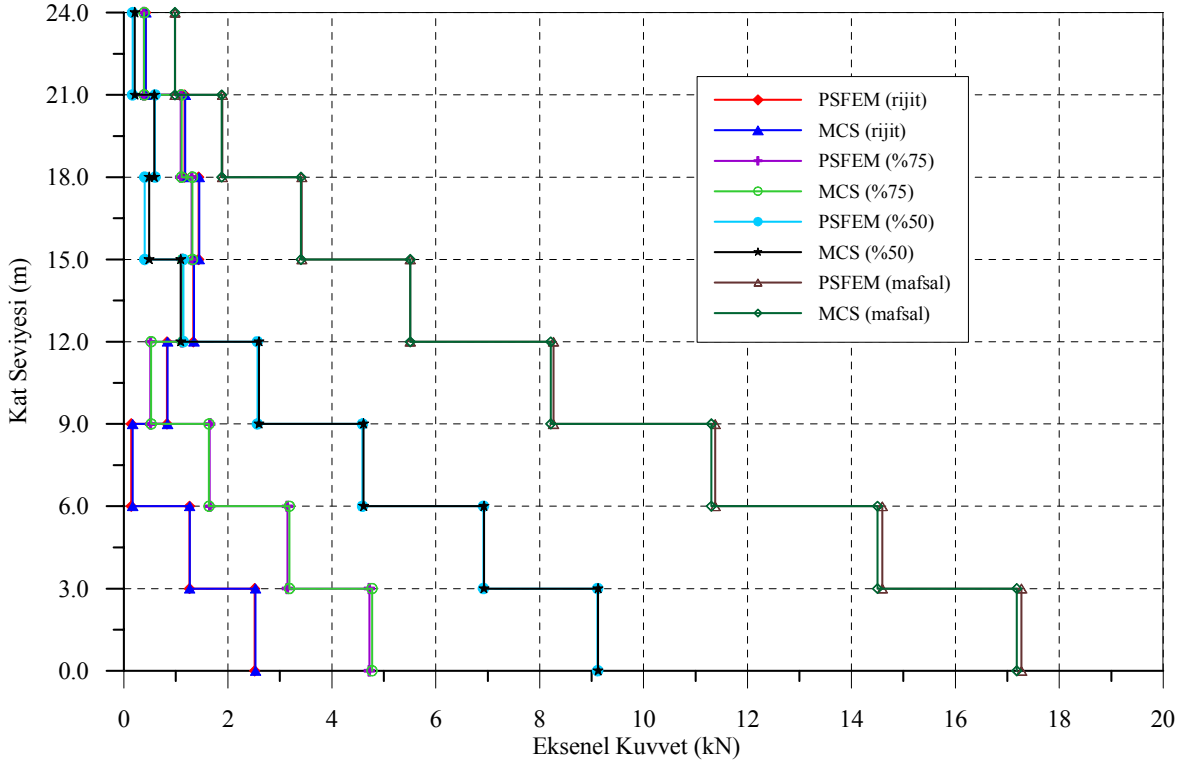
stokastik yerdeğiştirme değerleri birbirine oldukça yakındır. Ayrıca PSFEM'in çok kısa zamanda (beş saniye) sonuç verdiği göz önünde bulundurulursa MCS yöntemi yerine kullanılabilirliği daha büyük önem kazanmaktadır.

### 3.2.1.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Burada bir önceki bölümde yarı rijit bağlı çerçeve sistemin yerdeğiştirmeleri için yapılan karşılaştırmalar, eleman kesit tesirleri için gerçekleştirilmektedir.

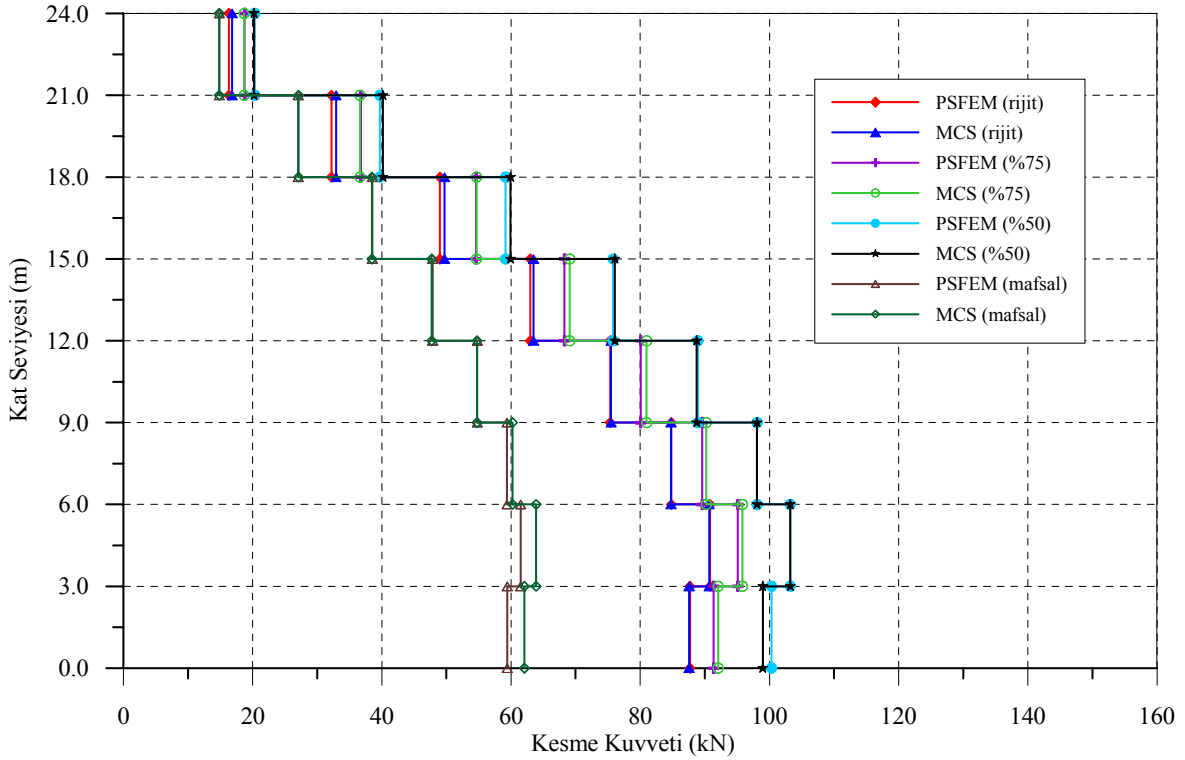
Şekil 55'te farklı bağlantı türleri için elastisite modülünün belirsiz olması durumunda maksimum aksenal kuvvetler karşılaştırılmaktadır. Aksenal kuvvetler için de yerdeğiştirme değerleri için elde edilen durumlar söz konusudur. Bağlantı rijitliği azaldıkça aksenal kuvvet değerinde bir artış görölmektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%75) ve zayıf (%50) bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %38.45 ve %105.40'dır. Mafsallı sistem olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortama fark ise sırasıyla %71.98 ve %68.46 oranındadır. En büyük aksenal kuvvet değerleri mafsallı bağlı (%0), en küçük aksenal kuvvetler ise rijit bağlı (%100) olması durumunda elde edilmektedir. Buna göre, bağlantı rijitliğindeki azalma ile aksenal kuvvet değerleri artmaktadır. Geleneksel ve yarı rijit bağlı olma durumları arasında önemli bir fark vardır ve bu fark çerçeve sistemlerin stokastik dinamik analizi için oldukça etkili olmaktadır.

Şekil 55'te ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmiştir. Şekilden, her iki yöntemden elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görölmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.83, nispeten rijit (%75) ve zayıf (%50) bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %1.53 ve %1.19 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.54' tür.



Şekil 55. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Şekil 56-57'de farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri için yerdeğiştirme ve aksenal kuvvet değerlerinde oluşan durumdan farklı bir durum söz konusudur. Şekillerden de görüleceği gibi en küçük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin mafsallı olması durumunda, en büyük değerler ise sistemin kısmi bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %7.92 ve %15.76'dır. Mafsallı sistem olması halinde %75 ve %50 bağıllık için oluşan ortama fark ise sırasıyla %44.03 ve %57.47 oranındadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%75 bağı) ve zayıf bağı (%50 bağı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %9.66 ve %18.05'tir. Sistemin mafsallı olması halinde %75 ve %50 bağıllık durumlarına göre oluşan ortama fark ise sırasıyla %39.94 ve %50.58 olmaktadır. Verilen oranlardan da anlaşılacağı üzere çerçeve yapılarında bağlantı esnekliğinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bağlantı esnekliğindeki artış çerçevenin rijitliğini azaltabilmekte ve böylece yapının stokastik dinamik tepkisi önemli derecede etkilenebilmektedir.

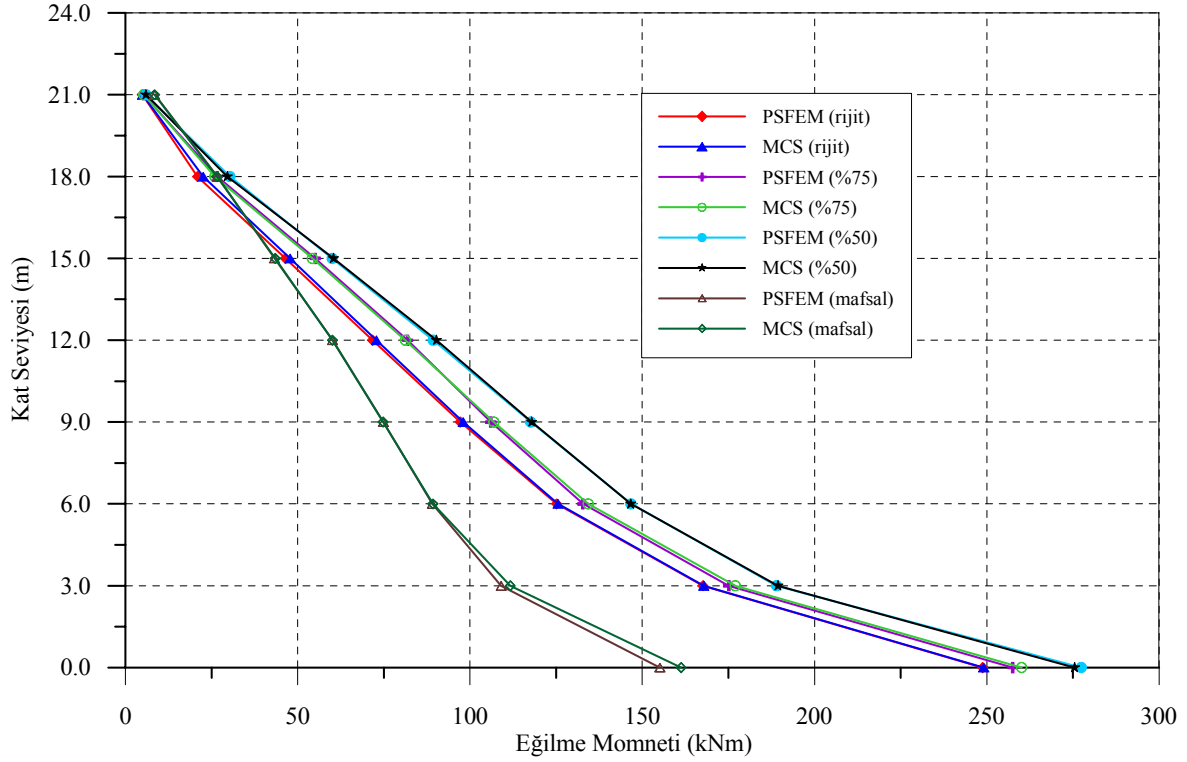


Şekil 56. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri

Şekil 56-57'de ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmektedir. Şekillerden, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, rijit olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %1.01, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.70 ve %0.61 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %1.28 olmaktadır. PSFEM ile kısmi bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, rijit olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %1.84, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.33 ve %0.70 düzeyine erişmektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.93 olmaktadır.

Böylece elastisite modülünün rastgele değişken olması durumunda PSFEM ve MCS yöntemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği ve stokastik dinamik analizlerde PSFEM'in MCS yönteminin yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca genellikle kısmi bağlantıların çelik çerçevelerin stokastik tepkilerini, özellikle güçlü yer hareketine

maruz kaldığında önemli derecede etkilediği ve performans esaslı yapısal tasarımlarda bu tür yeni yaklaşımların dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 57. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.2.1.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin, enkesit alanının belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Enkesit alanının ( $A_p$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer ve korelasyon fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E [A_p] = 0.0248 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(A_\rho, A_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 72$$



### 3.2.1.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda, çerçeve sistemin geleneksel (rijit ve mafsallı) ve yarı rijit bağlantılı olması halinde elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 16’da verilmektedir. Tablo 16’da PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olarak değişmekle birlikte, PSFEM’den elde edilen doğal frekans değerlerinin MCS yönteminden bulunan değerlerden bir miktar yüksek seyrettiği de görülmektedir. PSFEM’den elde edilen frekans değerlerinin, MCS yöntemine göre elde edilen frekans değerlerine oranla, çerçeve sistemin rijit, yarı rijit ve mafsallı bağlantılı olması durumları için sırasıyla ortalama %0.20, %0.65, %0.99 ve %0.40 oranlarında farklılık arz ettiği tespit edilmiştir. Çelik çerçeve sistemin rijit bağlı olması durumunda en büyük frekans değerleri elde edilirken, en küçük frekans değerleri ise sistemin mafsallı bağlı olması halinde tespit edilmektedir. Ayrıca Tablo 16’da bağlantı esnekliğindeki azalma ile frekans değerlerinde bir azalma olduğu da görülmektedir.

Tablo 16. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

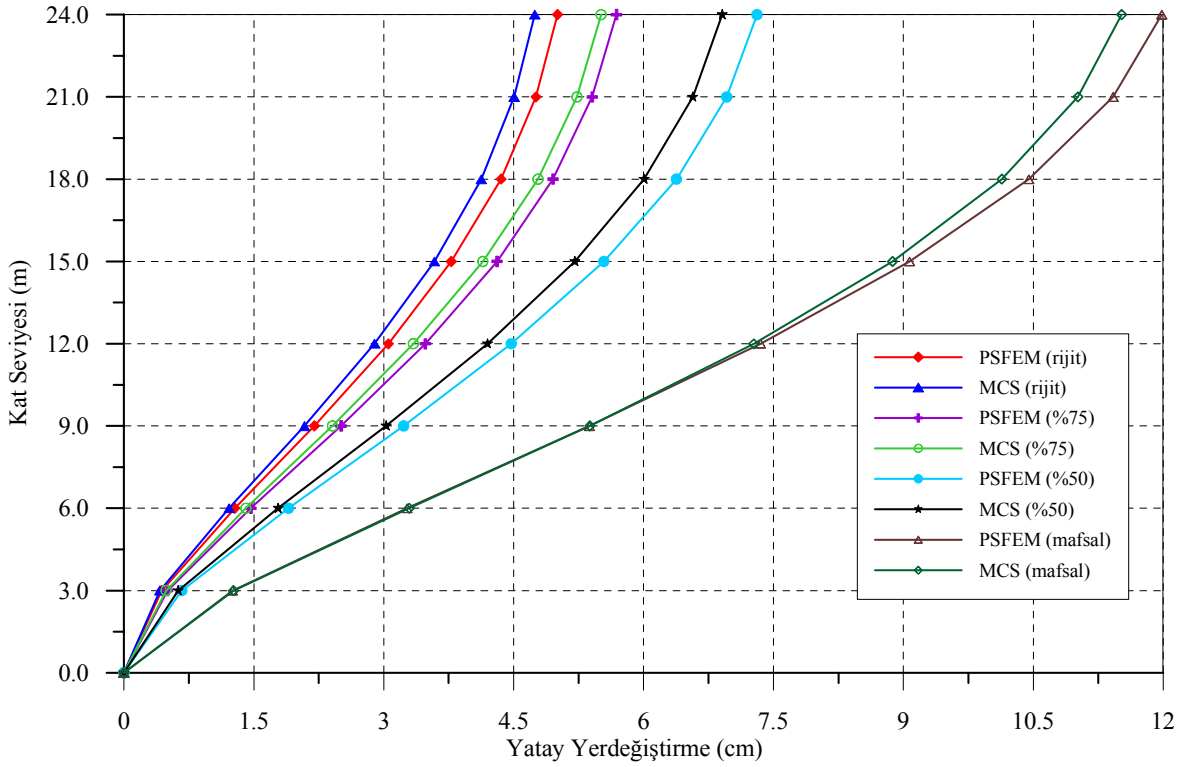
Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsallı	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsallı
1	1.865	1.798	1.698	1.047	1.867	1.795	1.672	1.043
2	6.086	5.868	5.481	3.334	6.090	5.834	5.405	3.303
3	11.636	11.132	10.432	5.984	11.565	11.011	10.106	5.969
4	18.665	17.727	15.986	9.106	18.611	17.572	15.927	9.028
5	27.265	25.467	22.754	12.297	27.234	25.432	22.692	12.284
6	36.947	34.101	29.893	15.471	36.915	34.039	29.831	15.410
7	41.479	41.465	36.421	18.088	41.446	40.883	36.331	18.024
8	42.358	42.312	40.878	19.815	42.286	41.874	40.279	19.766
9	43.374	42.753	41.704	41.275	43.256	42.621	41.660	41.240
10	46.303	43.703	42.357	41.657	45.814	43.619	42.330	41.576

Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda, elastisite modülünün rastgele değişken seçilme durumuna göre bir miktar daha küçük frekans değerleri elde edilmiştir. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi halinde frekans değerlerinin en büyük olduğu onuncu moddaki değerler dikkate alındığında, elastisite modülünün rastgele seçildiği

durum için elde edilen değerlere oranla rijit bağlıdan mafsalı sisteme doğru sırasıyla %6.80, %1.20, %1.03 ve %0.72 daha küçük değerler olduğu belirlenmiştir.

### 3.2.1.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Şekil 58’de yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin enkesit alanının belirsiz olması durumunda geleneksel (rijit ve mafsal bağlı) ve yarı rijit bağlı (%75 ve %50) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri görülmektedir. Genel itibariyle, PSFEM’den elde edilen yerdeğiştirmelerin MCS yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için yakın olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %5.40, nispeten rijit (%75) ve zayıf (%50) bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %3.75 ve %6.34 oranlarında farklar ortaya çıkarmaktadır. Sistemin mafsalı olması halinde ise ortalama fark %1.99’dur. Çerçeve sistemin rijit bağlı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 5.01 cm iken MCS yönteminde bu değer 4.74 cm’dir. %75 ve %50 bağlı olması durumunda PSFEM’den sırasıyla 5.69 cm ve 7.31 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 5.51 cm ve 6.91 cm yanal yer değiştirmeler ortaya çıkmaktadır. Sistemin mafsallardan oluşması halinde ise bu değerler sırasıyla 12 cm ve 11.52 cm değerini almaktadır. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda, MCS yöntemine oranla daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 58). Yine benzer olarak, enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda elastisite modülüne göre daha büyük yerdeğiştirme değerleri ortaya çıkmaktadır. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi halinde, yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu en üst kattaki değerler dikkate alındığında, geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar (%75 ve %50) için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %0.31, %2.59, %7.5 ve %2.5 daha büyük olduğu gözlenmektedir.



Şekil 58. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değışken enkesit alanı için yatay yerdeğıştirmeleri

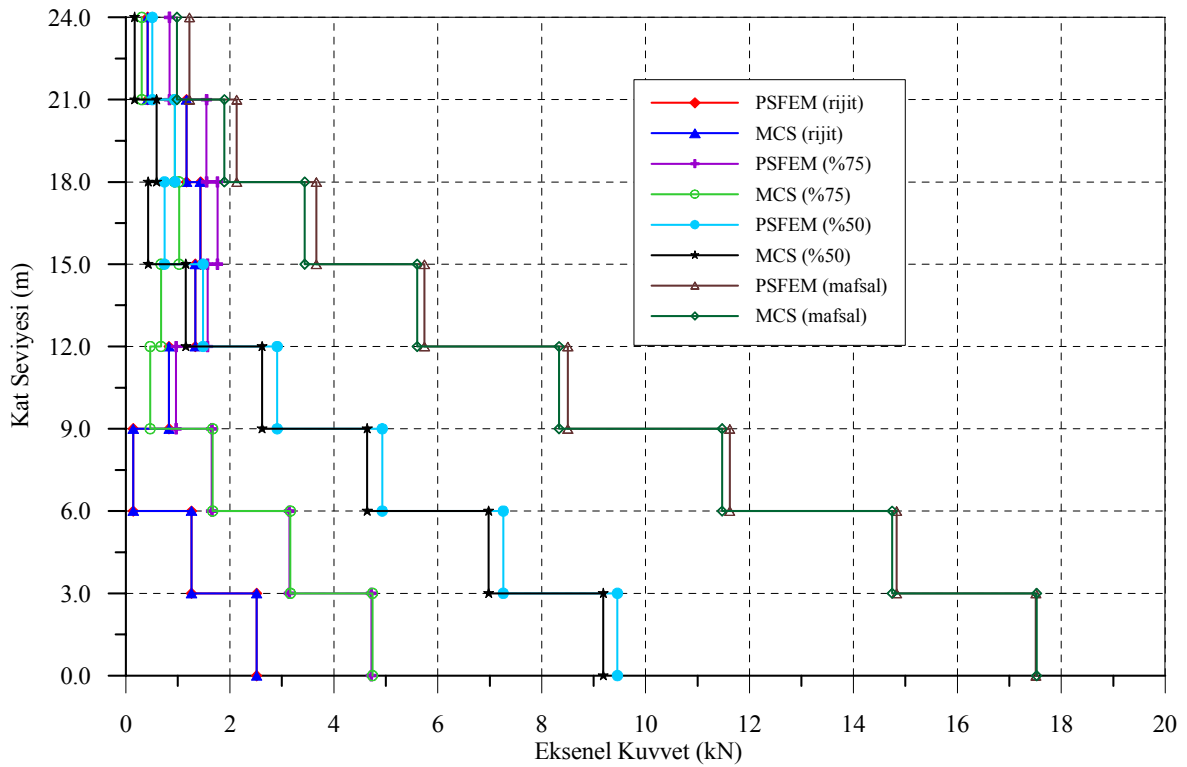
Çerçeve sistemin yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen yatay yerdeğıştirme değeri tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük değeri elde edilmiştir (Şekil 58). Bu farklar bağlantı rijitliğindeki azalmayla (%50 bağlı) artmaktadır. Çerçeve sistemin en üst katında oluşan maksimum yerdeğıştirme değeri için rijit ve yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit (%75) ve zayıf bağlı (%50) olması durumları için sırasıyla, %12.42 ve %32.22 olmaktadır. Mafsal bağlı olduğu düşünülerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda ise en büyük yerdeğıştirme değeri bulunmuştur. Sistemin mafsalı olması durumunda rijit bağlı olmasına göre ortalama %59.61'lik bir fark elde edilmiştir.

### 3.2.1.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Yarı rijit ve geleneksel bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvet değeri Şekil 59'da görülmektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %38.45 ve %103.40'tır. Mafsallı sistem

olması halinde %75 ve %50 bağıllık için oluşan ortalama fark ise sırasıyla %71.98 ve %68.46 oranındadır. En büyük aksenal kuvvet değerleri mafsallı, en küçük aksenal kuvvetler ise rijit bağlı olması durumunda elde edilmektedir. Ayrıca bağlantı rijitliğindeki azalmanın aksenal kuvvet değerinde bir artışa sebep olduğu da görülmektedir.

Enkesit alanının rastgele değişken olduğu kabulüyle iki farklı yöntemle göre gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin mukayesesi Şekil 59'da yer almaktadır. Buna göre, stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin her iki yöntem için de birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %1.40, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.41 ve %5.2 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %1.60 olmaktadır.

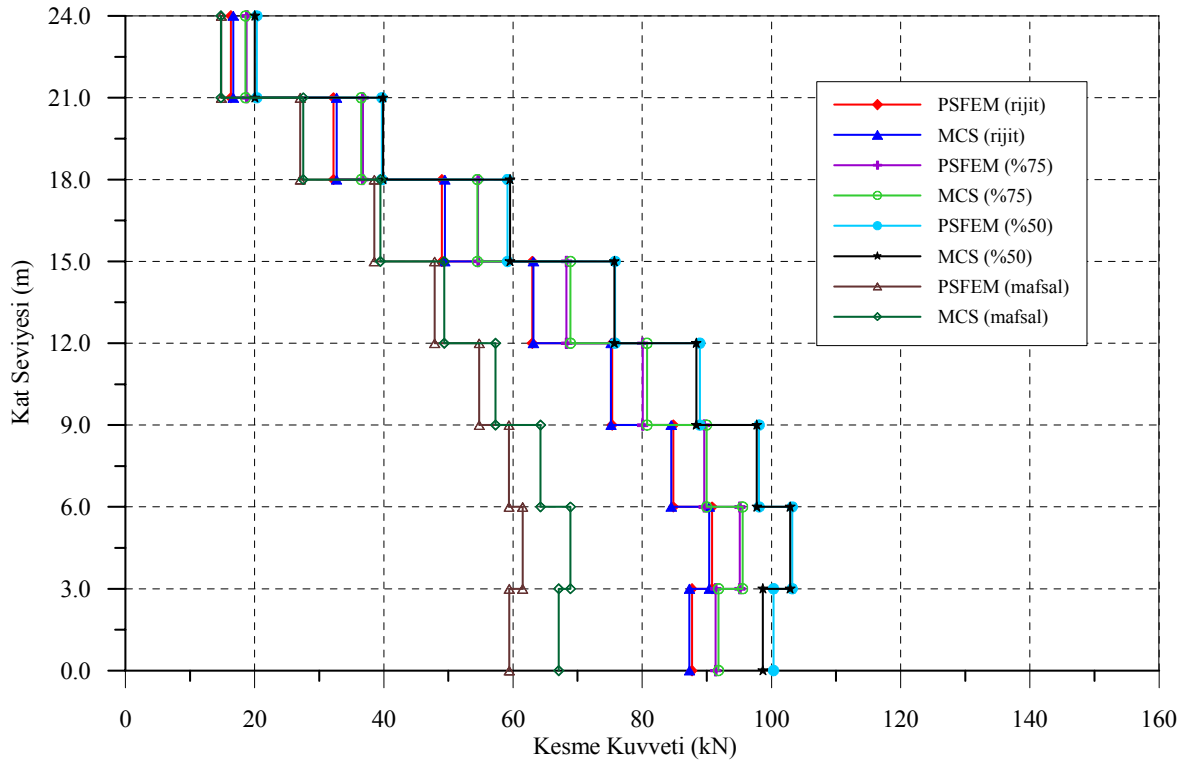


Şekil 59. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Enkesit alanının belirsiz olması durumunda, aksenal kuvvet değerinin en büyük olduğu en alt kattaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit

bağlantılar için elde edilen aksel kuvvet değerinin elastisite modülü için elde edilen aksel kuvvet değerine oranla sırasıyla %1.2, %3.42, %0.70 ve %5.12 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).

Şekil 60'ta kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi en küçük kesme kuvveti değerleri sistemin mafsalı olması durumunda, en büyük değerler ise sistemin zayıf bağlı (%50) olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %6.72 ve %16.28'dir. Mafsallı sistem olması halinde %75 ve %50 bağluluk için oluşan ortama fark ise sırasıyla %48.20 ve %63.17 oranındadır. Şekil 60'ta ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmektedir. Burada, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.79, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.63 ve %0.72 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %5.24 olmaktadır.

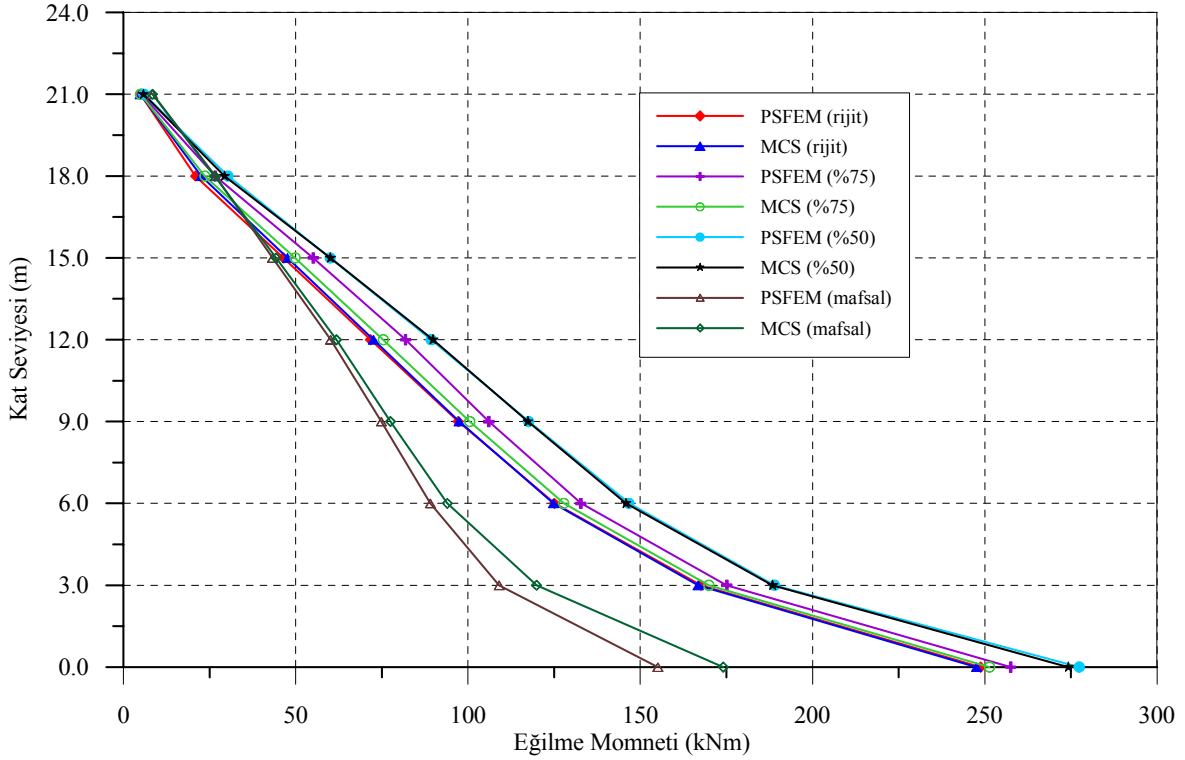


Şekil 60. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri

Enkesit alanının belirsiz olması durumunda, kesme kuvveti değerinin en büyük olduğu ikinci kattaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar (%75 ve %50 bağlı) için elde edilen kesme kuvveti değerinin elastisite modülünün rastgele seçilmesi için elde edilen kesme kuvveti değerine oranla sırasıyla %0.3, %7.45, %0.97 ve %1.31 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).

Çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri ise Şekil 61'de verilmektedir. Kat seviyesi boyunca elde edilen stokastik dinamik eğilme momenti değerleri sistemin %50 bağlı olması durumunda en büyük olurken, bunları sırasıyla %75 bağlı, rijit bağlı ve mafsalı olması durumlarında elde edilen eğilme momentleri izlemektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre eğilme momentleri, nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen eğilme momentlerine göre sırasıyla ortalama %2.96 ve %16.41 oranlarında farklılık arz etmektedir. Sistemin mafsalı olması durumuna göre, %75 ve %50 bağlılık durumu için oluşan ortama fark ise sırasıyla %29.71 ve %43.04 olmaktadır. PSFEM'den elde edilen eğilme momentlerinin MCS yönteminden bulunan değerlerden bir miktar daha büyük olduğu şekilden görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %1.68, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %5.40 ve %1.12 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsalı sistem olması halinde ise ortalama fark %4.36 olmaktadır.

Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, eğilme momenti değerinin en büyük olduğu en alt kattaki değerler dikkate alındığında, geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen eğilme momenti değerlerinin elastisite modülü için elde edilen eğilme momenti değerlerine oranla sırasıyla %0.6, %7.36, %3.40 ve %2.63 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).



Şekil 61. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.2.1.3. Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu

Bu bölümde yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin (Şekil 26) başlangıç rijitliğinin (yay sabitinin) belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilerek yerdeğiştirme ve kesit tesiri sonuçları birbirleriyle mukayese edilmektedir.

Bağlantı rijitliğindeki değişim ( $k$ ) çelik çerçeve sistem için rastgele değişken olarak seçilmiştir. Literatürde kolon kiriş bağlantılarını modellemek için farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, bağlanan elemanların her bir ucunda dönel yaylar olduğu kabul edilerek bağlantılar temsil edilmiştir. “1. Genel Bilgiler” bölümünde verilen (65)-(66) nolu denklemlerdeki gibi bir boyutsuz düzeltme faktörü bağlantı davranışını göstermek için kullanılmıştır.

Kiriş-kolon bağlantıları için iki çeşit yarı rijitlik burada dikkate alınmaktadır. Bu bağlantıların birisi nispeten rijit  $k_1$  ( $v_i=v_j=0.75$ ) ve diğeri ise zayıf bağlantı  $k_2$  ( $v_i=v_j=0.50$ )’dir. Sonuçları karşılaştırmak için aynı çerçeve sistem, geleneksel bağlılık (rijit ve mafsallı) durumları için de incelenmektedir. Başlangıç rijitliğinin ( $k_p$ ) rastgele değişken

olması durumu için, ortalama değer (%75 ve %50 bağıllık durumları için), korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır (Sakuari, vd., 2001).

$$E[k_1] = 7.90 \times 10^5 \quad \lambda = 10$$

$$E[k_2] = 2.63 \times 10^5 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(k_\rho, k_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 72$$

$$\alpha = 0.10$$

### 3.2.1.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Çelik çerçeveye ait ilk on modun doğal frekansları, geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılı olması durumları için Tablo 17’de gösterilmektedir. Bu tabloda PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olarak değiştiği görülmektedir.

Tablo 17. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal
1	1.863	1.792	1.668	1.040	1.863	1.790	1.667	1.038
2	6.075	5.825	5.395	3.297	6.075	5.817	5.386	3.286
3	11.536	10.984	10.091	5.958	11.536	10.978	10.070	5.940
4	18.563	17.537	15.897	9.010	18.563	17.517	15.867	8.986
5	27.164	25.369	22.636	12.263	27.164	25.351	22.604	12.227
6	36.846	33.960	29.757	15.361	36.846	33.926	29.710	15.339
7	41.473	41.457	36.261	17.981	41.473	41.441	36.195	17.942
8	42.317	42.095	40.860	19.717	42.317	42.007	40.693	19.677
9	43.316	42.353	41.533	41.275	43.316	42.314	41.511	41.275
10	46.282	43.224	42.251	41.613	46.282	43.201	42.152	41.607

Tablo 17’den görüldüğü gibi PSFEM’den elde edilen doğal frekans değerleri çerçeve sistem tamamen rijit bağlı iken MCS yöntemiyle eşit düzeyde, nispeten rijit, zayıf



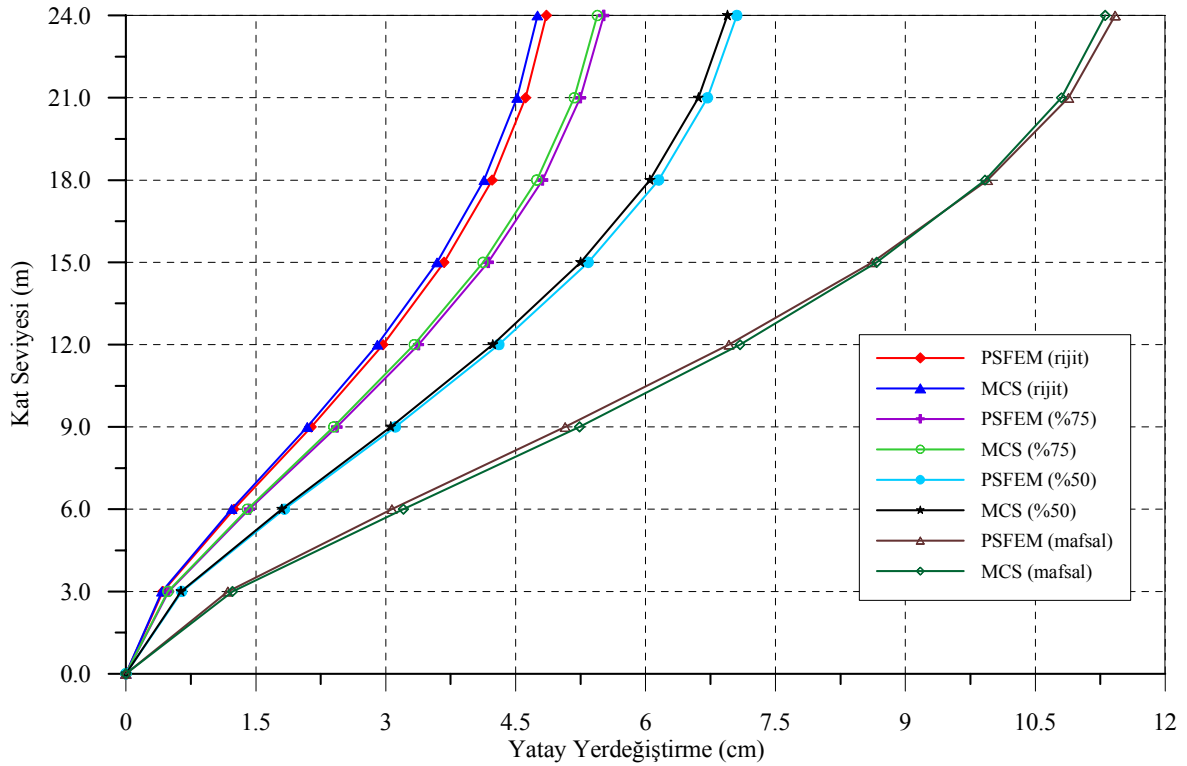
bağlı ve mafsallı olması durumlarında ise MCS yönteminden elde edilen değerlerden bir miktar daha büyük sonuçlar vermektedir. PSFEM'den elde edilen frekans değerleri, MCS yöntemine göre %0.08 oranında değişmektedir. Çelik çerçeve sistemin rijit bağlı olması durumunda en büyük frekans değerleri, sistemin mafsallı olması halinde ise en küçük frekans değerleri elde edilmiştir. Bağlantı esnekliğindeki azalma ile frekans değerlerinde bir azalma olduğu tablodan görülmektedir. Başlangıç rijitliğinin rastgele değişken olması durumunda, elastisite modülüne göre biraz daha büyük frekans değerleri, enkesit alanına göre ise daha küçük frekans değerleri elde edilmektedir.

### 3.2.1.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Rastgele değişken olarak seçilen başlangıç rijitliği için, geleneksel ve yarı rijit bağlı olması durumlarında çelik çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri Şekil 62'de karşılaştırılmaktadır. Kat seviyesi boyunca elde edilen stokastik dinamik yerdeğiştirme değerleri sistemin mafsallı olması durumunda en büyük olurken, bunları sırasıyla %50 bağlı, %75 bağlı ve tamamen rijit olması durumlarında elde edilen yerdeğiştirme değerleri izlemektedir. Ayrıca şekilden perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmelerin genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilediği de görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.17, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %1.47 ve %1.63 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %2.01'dir. Çerçeve sistemin rijit bağlı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 4.86 cm iken MCS yönteminde bu değer 4.75 cm'dir. %75 ve %50 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 5.52 cm ve 7.10 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 5.44 cm ve 6.95 cm yatay yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Mafsallı sistem olması halinde bu değerler sırasıyla 11.42 cm ve 11.31 cm olarak belirlenmektedir. Görüldüğü gibi, PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 62). Çerçeve sistemin en üst katında oluşan maksimum yerdeğiştirme değeri için rijit ve yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten

rijit ve zayıf bağlı olması durumları için sırasıyla %12.33 ve %31.62'dir. Sistemin mafsallı olduğu kabul edilerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda yerdeğiştirme değeri tamamen rijit bağlı olması durumuna göre %58.56 oranında büyük çıkmaktadır.

Başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda, yatay yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu en üst kattaki değerler dikkate alınarak yapılan değerlendirmede geleneksel ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde yerdeğiştirme değerine göre sırasıyla %0.41, %2.1, %0.54 ve %1.12 oranlarında ve enkesit alanına göre ise sırasıyla %3, %4.83, %2.98 ve %3.56 oranlarında daha küçük olduğu gözlemlenmektedir.

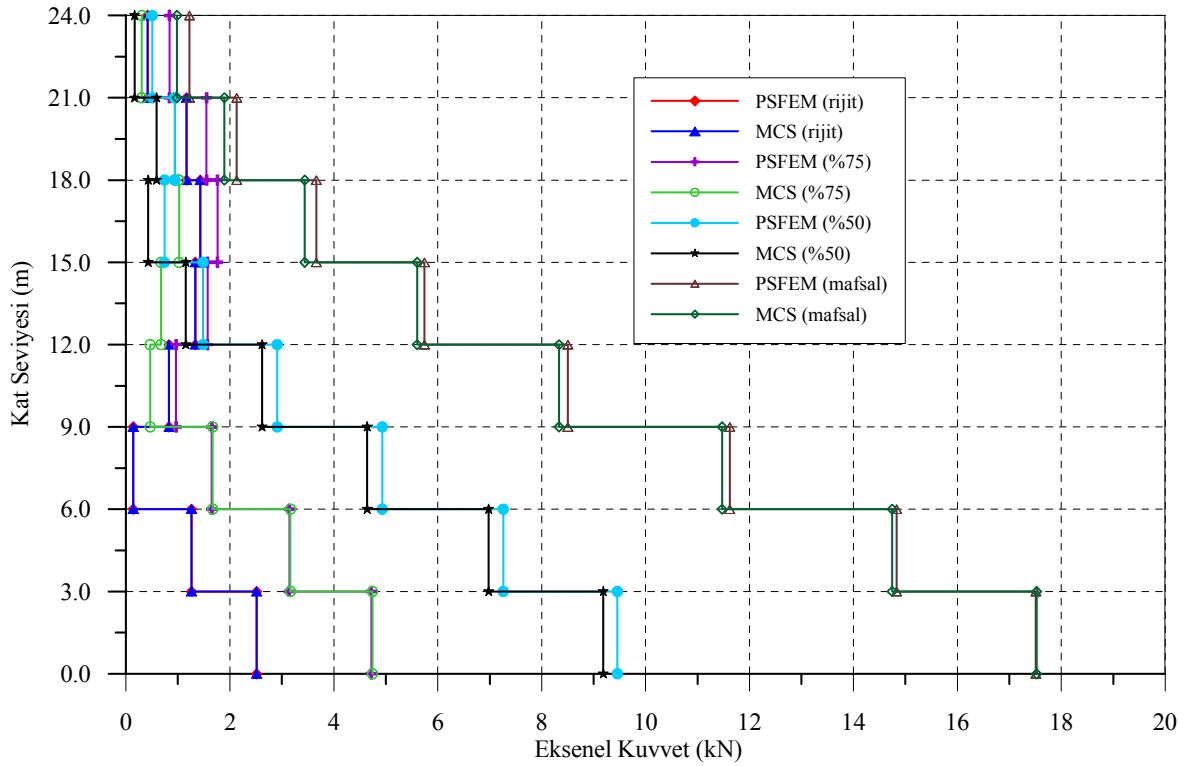


Şekil 62. Yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yatay yerdeğiştirmeleri

### 3.2.1.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Bu kısımda bir önceki bölümde yarı rijitlikleri rastgele değişken kabul edilerek stokastik dinamik analizlerle yerdeğiştirmeleri elde edilen yarı rijit bağlı çelik çerçeve sistem için gerçekleştirilen mukayeselere benzer olarak kesit tesirleri değerlendirilmektedir.

Şekil 63'te çerçeve sistemin farklı bağlantı türleri için başlangıç rijitliğinin belirsiz olması durumunda elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri karşılaştırılmaktadır. Aksenal kuvvetler için de yerdeğiştirme değerleri için elde edilen durum söz konusu olmaktadır. Buna göre bağlantı rijitliği azaldıkça aksenal kuvvet değerinde bir artış görülmektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %40.15 ve %58.75'tir. Mafsallı sisteme göre ise %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortalama fark sırasıyla %63.71 ve %61.08 oranlarındadır. Geleneksel ve yarı rijit bağlı olma durumları arasında önemli bir fark vardır ve bu fark çerçeve sistemlerin stokastik dinamik analizi için oldukça etkili olmaktadır.



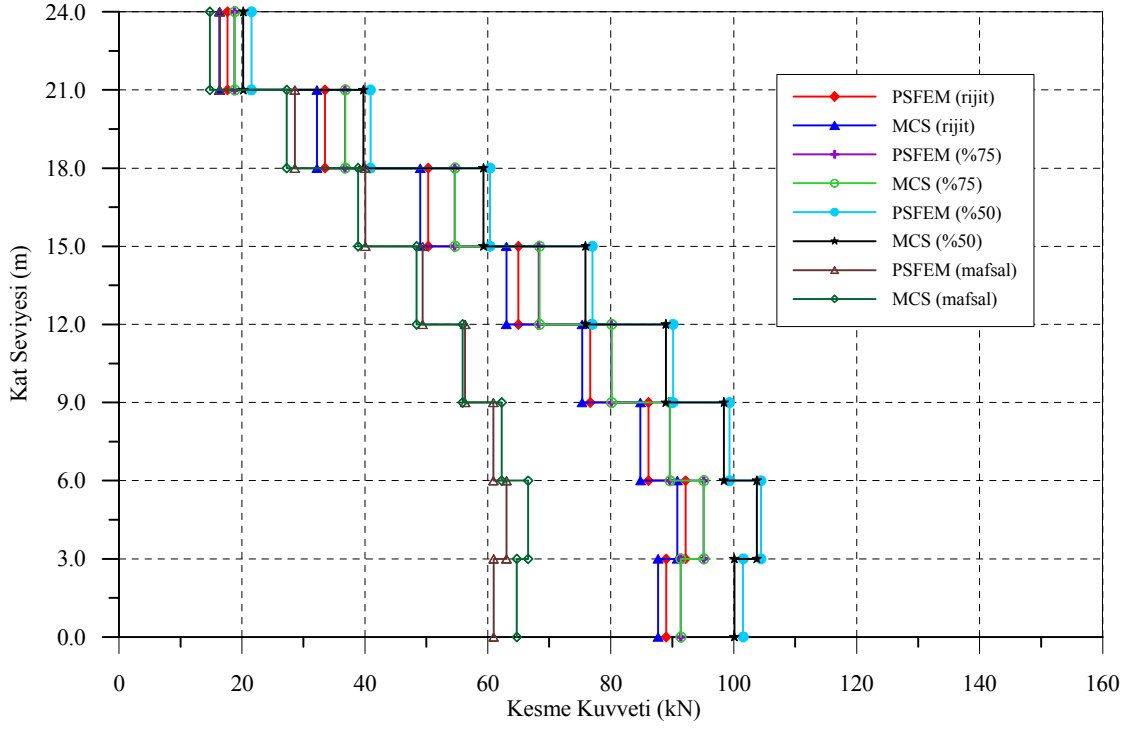
Şekil 63. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Özellikle rijit bağlı durumda bu iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasında bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında

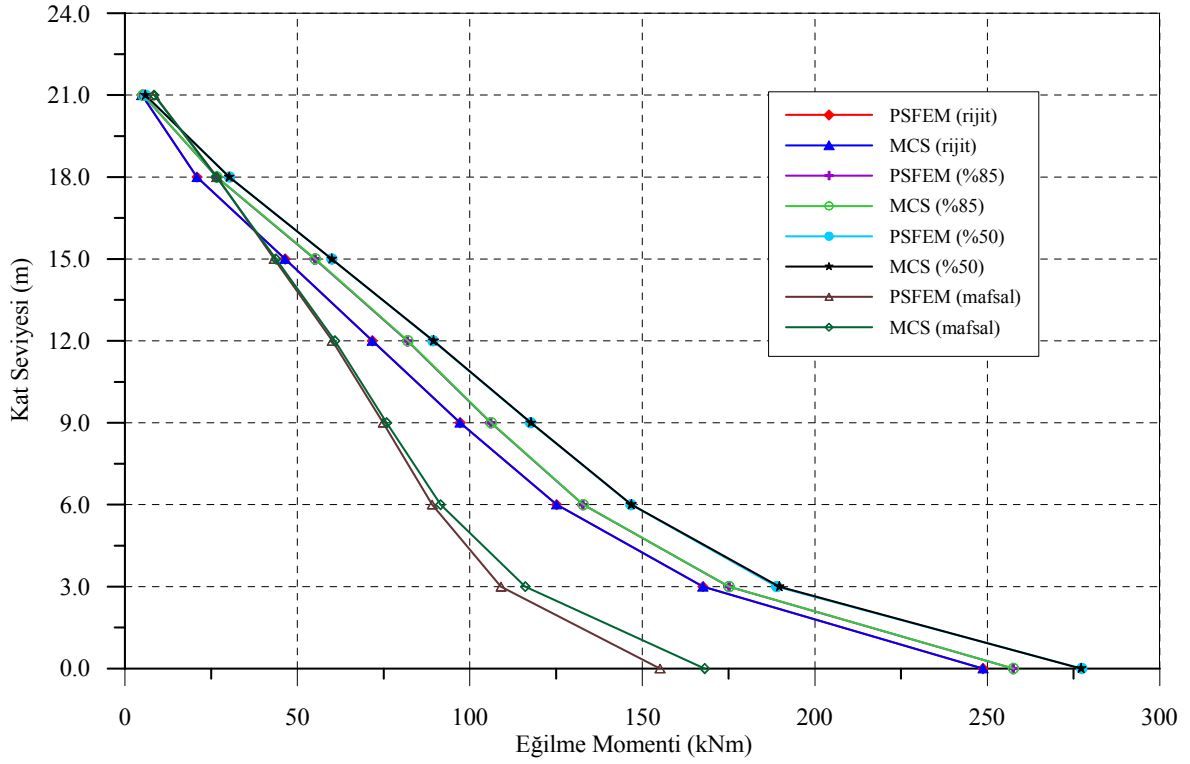
sırasıyla, %4.90 ve %3.71 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %6.24' tür.

Şekil 64-65'te farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri için yerdeğiştirme ve eksenel kuvvet değerlerinde oluşan durumdan farklı bir durum söz konusudur. Şekillerden de görüleceği gibi, en küçük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin mafsallı olması durumunda, en büyük değerler ise sistemin kısmi bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %5.18 ve %15.09 olmaktadır. Mafsallı sistem olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortama fark ise sırasıyla %38.52 ve %54.61 oranındadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%75 bağlı) ve zayıf bağlı (%50 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %8.65 ve %17.01 olmaktadır. Sistemin mafsallı olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortalama fark ise sırasıyla %36.11 ve %46.43 olmaktadır. Verilen oranlardan da anlaşılacağı üzere çerçeve yapılarında bağlantı esnekliğinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bağlantı esnekliğindeki bir artış çerçevenin rijitliğini azaltabilmektedir ve bu durum yapının stokastik dinamik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Şekil 64-65'te ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %3.04, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.11 ve %2.13 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %1.28 olmaktadır. PSFEM ile kısmi bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %1.84, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.33 ve %0.70 oranlarında farklılıklar arz etmektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.93 olmaktadır.



Şekil 64. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 65. Yarı rijit bağlı çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.2.2. Yarı Rijit Bağlı Köprü Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi

Bölüm 2.3.4'te özellikleri verilen yarı rijit bağlantılı çelik köprü modelinin perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre ayrı ayrı stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen köprü sisteminin kirişlerinin rijit, mafsal ve yarı rijit bağlı olduğu kabul edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Kiriş-kolon bağlantılarında iki türlü yarı rijit bağlı olma durumu dikkate alınmıştır. Bu bağlantılardan ilkinin zayıf (%50 bağlı) ikincisinin ise nispeten daha rijit (%75 bağlı) bağlı olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizlerde yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depremi YPT330 bileşeni dikkate alınmaktadır. Bu depreme ait grafik Bölüm 2.2.1.1.'de verilmektedir.

#### 3.2.2.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu

Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin elastisite modülünün belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Elastisite modülünün ( $E_\rho$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[E_\rho] = 2.1 \times 10^8 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(E_\rho, E_\sigma) = e^{\left( \frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda} \right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.10$$

##### 3.2.2.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Seçilen çelik köprü modelinin ilk on modu için elde edilen doğal frekanslar tam rijit, mafsal ve yarı rijit bağlantılar olması durumlarında Tablo 18'de sunulmaktadır. Tablo 18'den görüleceği üzere, PSFEM'den elde edilen doğal frekans değerleri köprü sisteminin tamamen rijit, nispeten rijit, zayıf bağlı ve mafsal olması durumlarında MCS yönteminden bulunan değerlerden biraz daha büyük sonuçlar vermektedir. PSFEM'den elde edilen frekans değerleri, MCS yöntemine göre yaklaşık %0.23 oranında

değişmektedir. İki yöntem birbirine yakın sonuçlar verdiği için stokastik dinamik analizde PSFEM'in MCS yerine kullanılabilir bir yöntem olduğunu öne çıkmaktadır. Çelik köprü sistemin rijit bağlı olması durumunda en büyük frekans değerleri, sistemin mafsalı olması halinde ise en küçük frekans değerleri elde edilmektedir. Çelik köprü modeli için de bağlantı esnekliğindeki azalma ile frekans değerlerinde bir azalma olduğu tablodan görülmektedir.

Tablo 18. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

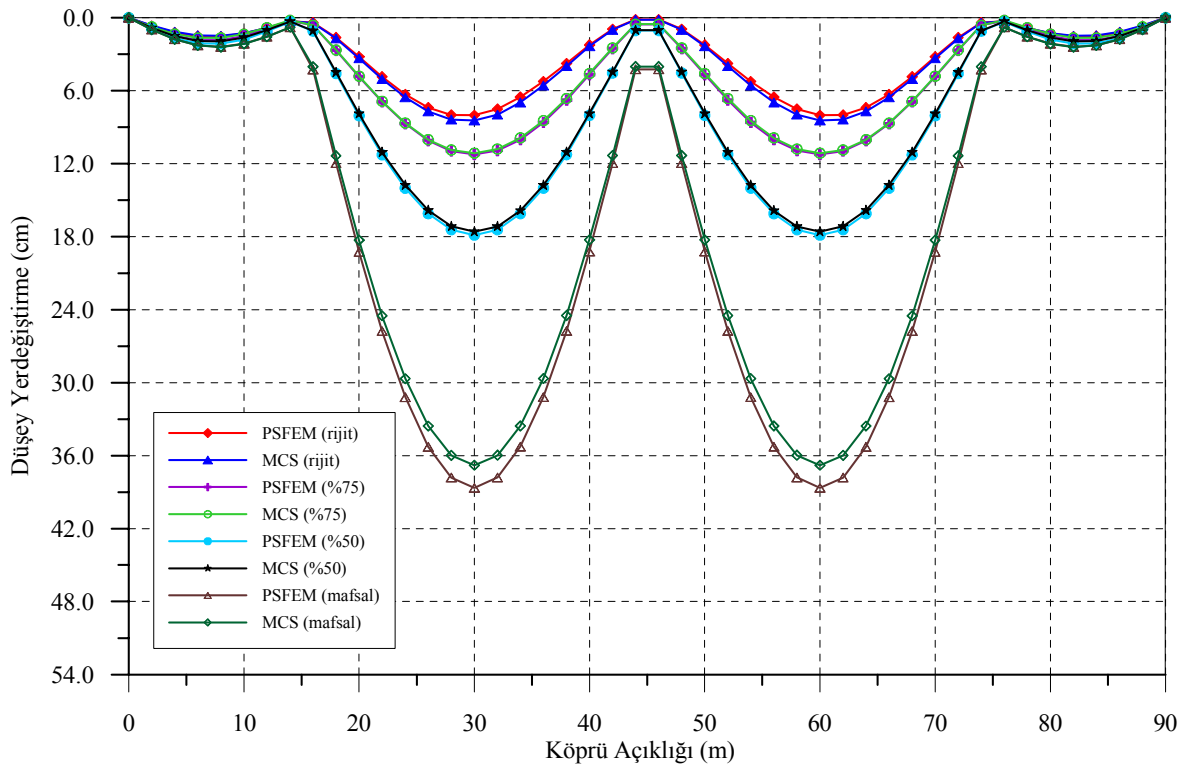
Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal
1	1.177	0.980	0.866	0.730	1.174	0.978	0.865	0.728
2	1.447	1.059	0.891	0.732	1.443	1.057	0.889	0.730
3	3.315	3.132	2.996	2.545	3.307	3.125	2.989	2.538
4	3.616	3.253	3.044	2.552	3.608	3.246	3.038	2.545
5	4.004	3.429	3.169	2.760	3.995	3.422	3.163	2.754
6	4.287	3.454	3.173	2.761	4.277	3.446	3.167	2.755
7	7.120	6.661	6.384	4.721	7.104	6.646	6.368	4.711
8	7.735	6.877	6.475	4.736	7.718	6.862	6.459	4.727
9	7.999	7.699	7.664	7.082	7.981	7.682	7.647	7.071
10	11.670	11.303	10.714	7.105	11.644	11.273	10.684	7.096

### 3.2.2.1.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Şekil 66'da çelik köprü sisteminin elastisite modülünün belirsiz olması durumunda geleneksel (rijit ve mafsal bağlı) ve yarı rijit bağlı (%75 ve %50 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş köprü açıklığı boyunca en büyük düşey yerdeğiştirme değerleri görülmektedir. Buna göre, PSFEM'den elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için yakın bulunmaktadır. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %4.32, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %4.24 ve %4.51 oranında fark göstermektedir. Sistemin mafsalı olması halinde ise ortalama fark %1.80'dir. Köprü sistemin rijit bağlı olması durumunda tabliyenin orta kısmında oluşan en

büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 8.01 cm iken MCS yönteminde bu değer 8.50 cm olmaktadır. %75 ve %50 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 11.24 cm ve 17.87 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 11.13 cm ve 17.59 cm düşey yer değiştirme değerleri elde edilmiş olmaktadır. Mafsallı sistem olması halinde bu değerler sırasıyla 38.65 cm ve 36.79 cm düzeyinde olmaktadır.

Köprü sisteminin yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 66). Bu farklar bağlantı rijitliğinde azalma olması ile artmaktadır. Köprü sisteminin tabliyesi boyunca oluşan maksimum yerdeğiştirme değerinin rijit bağlı olması durumunda oluşan farkı, nispeten rijit (%75) ve zayıf bağlı (%50) olması durumlarında oluşana göre sırasıyla, %30.42 ve %49.24 olmaktadır. Mafsal bağlı olduğu düşünülerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda ise en büyük yerdeğiştirme değerleri bulunmaktadır. Seçilen köprü sisteminin kiriş-kolon bağlantılarının mafsallı olması durumunda rijit bağlı olmasına göre ortalama %67.33'lük bir fark elde edilmiştir.



Şekil 66. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri

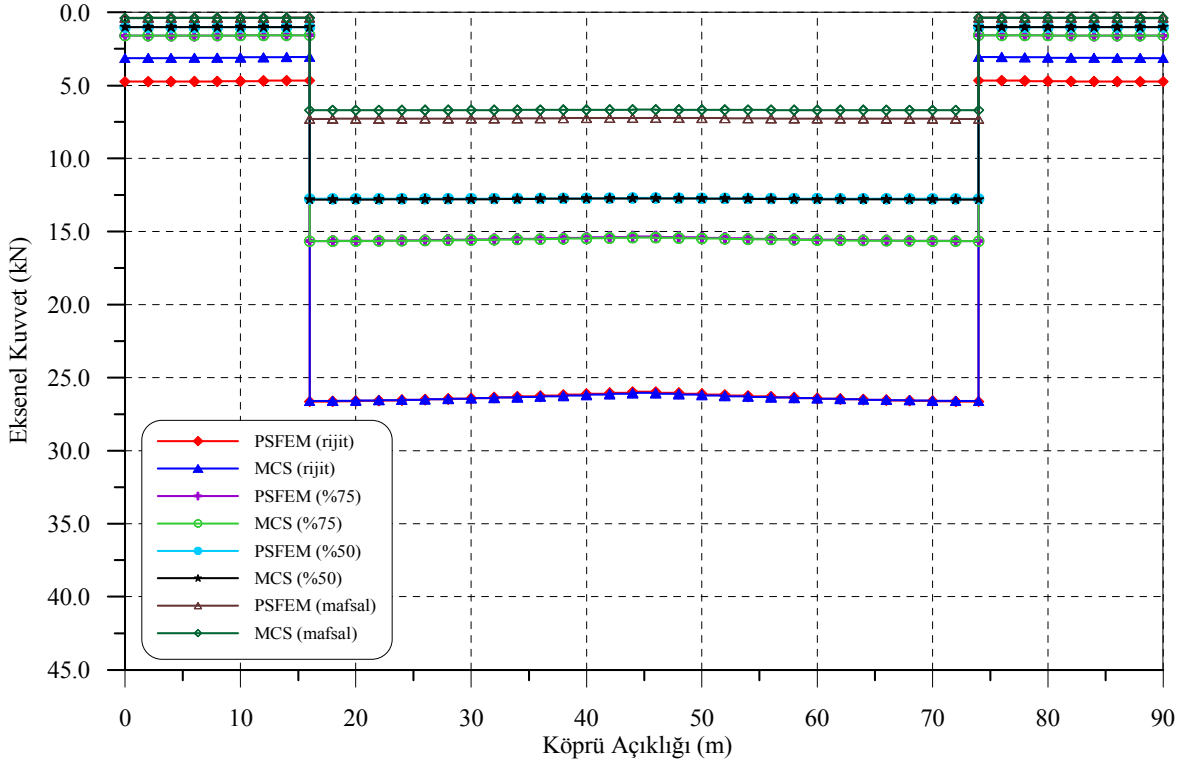


### 3.2.2.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Bu kısımda bir önceki bölümde elastisite modülleri rastgele değişken kabul edilerek stokastik dinamik analizlerle yerdeğiştirmeleri elde edilen yarı rijit bağlı elik köprü modeli için gerçekleştirilen mukayeselere benzer olarak kesit tesirleri değerlendirilmektedir.

şekil 67’de farklı bağlantı türleri için elastisite modülünün belirsiz olması durumunda maksimum aksenal kuvvetler karşılaştırılmaktadır. Bağlantı rijitliği azaldıkça aksenal kuvvet değerinde de bir azalış görölmektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %38.45 ve %105.40’tır. Mafsallı sistem olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortalama fark ise sırasıyla %71.98 ve %68.46 oranındadır. En büyük aksenal kuvvet değerleri köprü tamamen rijit bağlıyken, en küçük aksenal kuvvet değerleri ise kolon kiriş bağlantılarının mafsallı olması durumunda elde edilmektedir. Seçilen köprü modeli için bağlantı rijitliğindeki azalma ile aksenal kuvvet değerleri de azalmaktadır. Geleneksel ve yarı rijit bağlı olma durumları arasında önemli bir fark vardır ve bu fark köprü tipi sistemlerin stokastik dinamik analizi için oldukça etkili olmaktadır.

şekil 67’de ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmektedir. şekilden, her iki yöntemden elde edilen stokastik aksenal kuvvet değerlerinin birbirine yakın olduğu görölmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı ereve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %5.27, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %0.19 ve %0.36 oranında bir farklılık göstermektedir. Kiriş-kolon bağlantılarının mafsallı olması halinde ise ortalama fark %5.79’dur.



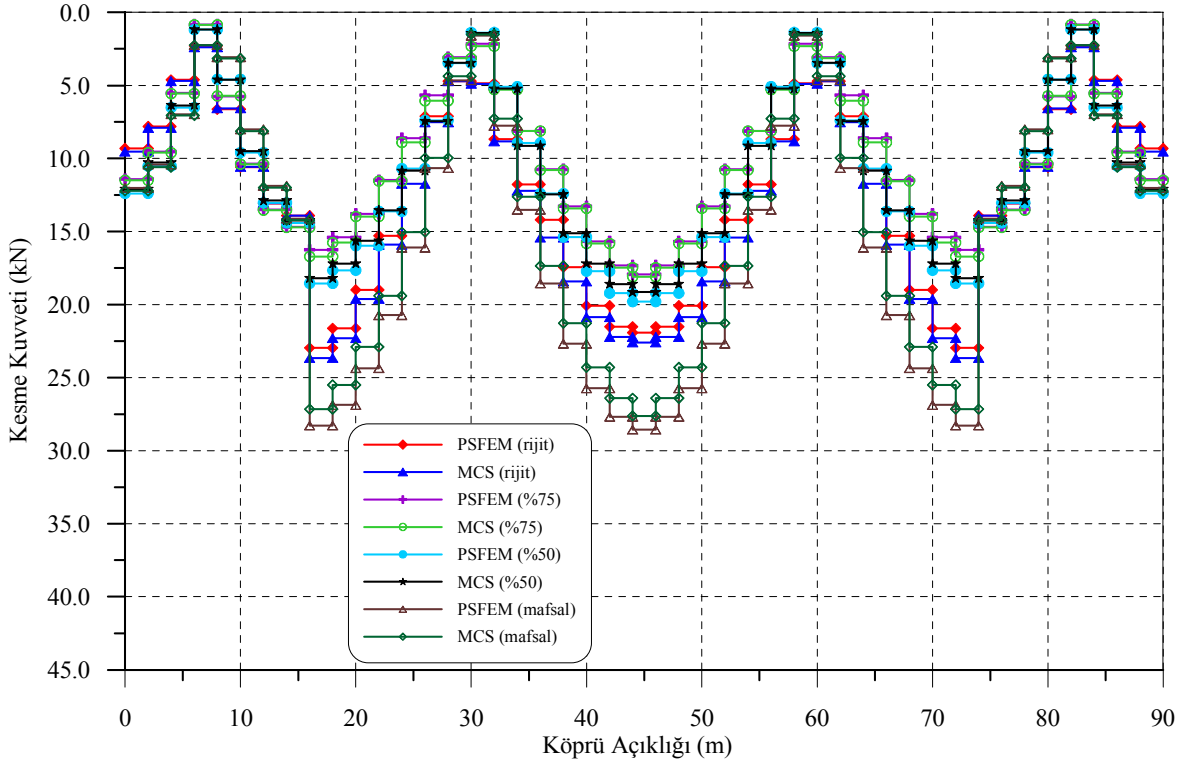
Şekil 67. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Şekil 68-69'da farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre köprü tabliyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri için yerdeğiştirme ve aksenal kuvvet değerlerinde oluşan durumdan farklı bir durum söz konusu olmaktadır. Şekillerden de görüleceği üzere en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin mafsalı olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin rijit bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %38.76 ve %33.89 olmaktadır. Mafsalı sistem olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortama fark ise sırasıyla %36.32 ve %26.21 oranlarındadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%75 bağlı) ve zayıf bağlı (%50 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %39.32 ve %85.17'dir. Sistemin mafsalı olması halinde %75 ve %50 bağlılık için oluşan ortama fark ise sırasıyla %203.13 ve %165.02 olmaktadır. Yapılan değerlendirmelerden de anlaşılacağı üzere köprü türü yapılar da kolon-kiriş bağlantı esnekliğinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bağlantı

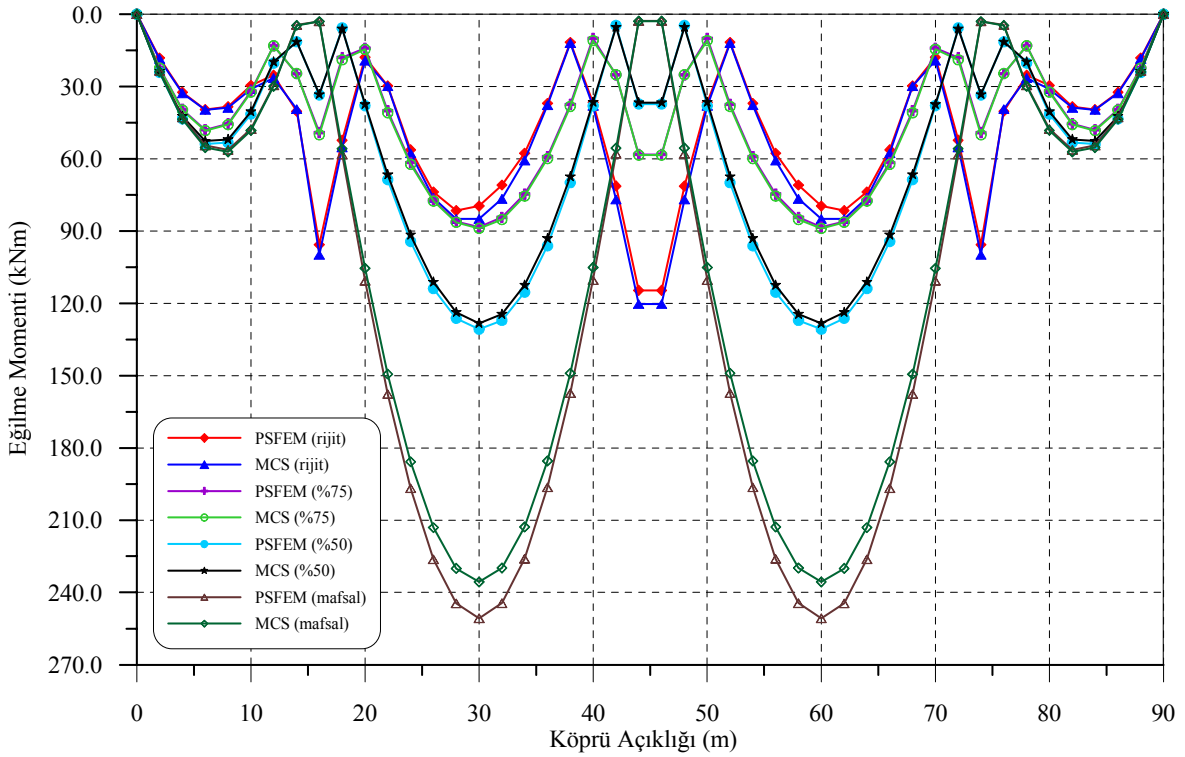
esnekliğindeki bir artış köprünün rijitliğini azaltabilmektedir ve bu durum yapının stokastik dinamik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Şekil 68-69'da ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmektedir. Grafiklerden, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sistemin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.88, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.68 ve %1.78 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %4.44 olmaktadır. PSFEM ile kolon-kiriş bağlantılarının yarı rijit olması durumunda sistemden açıklık boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre tamamen rijitken ortalama %3.66, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.59 ve %2.98 oranlarındadır. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %3.91 olmaktadır.

Böylece elastisite modülünün rastgele değişken olması durumunda PSFEM ve MCS yöntemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği ve stokastik dinamik analizlerde PSFEM'in MCS yönteminin yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca genellikle kısmi bağlantıların çelik köprülerin stokastik tepkilerini, özellikle güçlü yer hareketine maruz kaldığında önemli derecede etkilediği ve performans esaslı yapısal tasarımlarda bu tür yeni yaklaşımların dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 68. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 69. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.2.2.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin, enkesit alanının belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Enkesit alanının ( $A_p$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E [A_p] = 0.0133 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(A_p, A_\sigma) = e^{\left( \frac{|x_p - x_\sigma|}{\lambda} \right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.10$$

#### 3.2.2.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Enkesit alanları rastgele değişken olarak seçilen çelik köprü modelinin, ilk on modunun doğal frekansları geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için Tablo 19'da gösterilmektedir. Bu tabloda PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir.

Tablo 19. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal
1	1.185	0.986	0.872	0.735	1.183	0.983	0.869	0.733
2	1.457	1.067	0.898	0.737	1.454	1.062	0.894	0.734
3	3.338	3.147	3.010	2.558	3.331	3.143	3.006	2.553
4	3.640	3.268	3.060	2.600	3.634	3.264	3.054	2.559
5	4.032	3.447	3.186	2.771	4.023	3.441	3.180	2.769
6	4.311	3.469	3.188	2.773	4.308	3.465	3.184	2.770
7	7.139	6.684	6.409	4.739	7.132	6.681	6.404	4.734
8	7.714	6.901	6.500	4.753	7.704	6.897	6.496	4.749
9	8.100	7.705	7.664	7.090	8.095	7.700	7.660	7.087
10	11.735	11.337	10.747	7.121	11.724	11.334	10.743	7.119

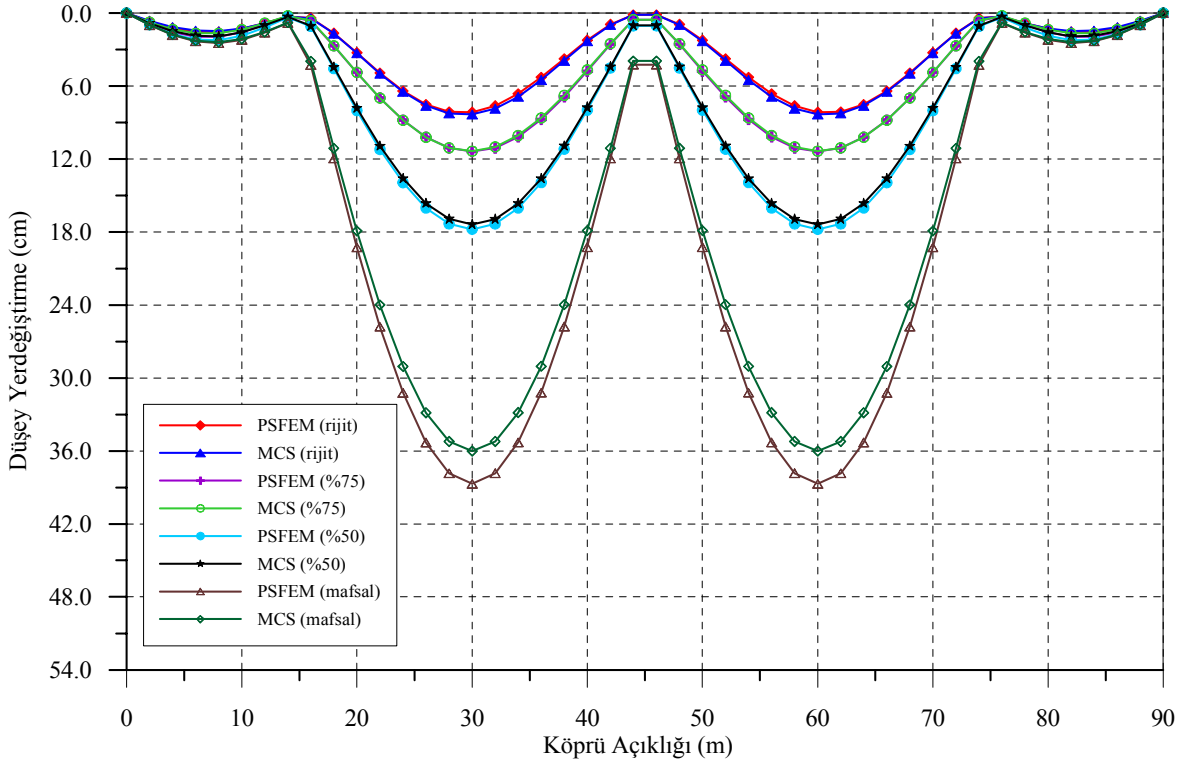
PSFEM'den elde edilen doğal frekans değerleri köprü sistemin tamamen rijit, nispeten rijit, zayıf bağlı ve mafsallı olması durumlarında MCS yönteminden bulunan değerlerden biraz daha büyük sonuçlar vermekte olduğu görülmektedir. PSFEM'den elde edilen frekans değerleri, MCS yöntemine göre %0.15-%0.20 oranında değişmektedir. Çelik köprü sisteminin rijit bağlı olması durumunda en büyük frekans değerleri, sistemin mafsallı olması halinde ise en küçük frekans değerleri elde edilmiştir. Bağlantı esnekliğindeki azalma ile frekans değerlerinde bir azalma olduğu tablodan görülmektedir. Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda elde edilen frekans değerleri, elastisite modülüne göre elde edilen değerlere oranla %0.70 daha büyük olduğu belirlenmiştir.

### 3.2.2.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağlı çelik köprü sistemin tabliyesi boyunca, rastgele değişken enkesit alanı için geleneksel bağlı (rijit ve mafsallı) ve yarı rijit bağlı (%75 ve %50 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş en büyük düşey yerdeğiştirme değerleri Şekil 70'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Köprü tabliyesi boyunca elde edilen stokastik dinamik yerdeğiştirme değerleri sistemin mafsallı olması durumunda en büyük olurken, bunları sırasıyla %50 bağlı, %75 bağlı ve tamamen rijit olması durumlarında elde edilen yerdeğiştirme değerleri izlemektedir. Ayrıca perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilemekte olduğu da açıkça görülmektedir (Şekil 70). Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliye boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %3.18, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %5.61 ve %6.71 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %5.86'dır. Bölüm 2.3.4'te şekli verilen köprü sisteminin rijit bağlı olması durumunda tabliyesinin orta kısmında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 8.15 cm iken MCS yönteminde bu değer 8.34 cm'dir. %75 ve %50 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 11.38 cm ve 17.78 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 11.35 cm ve 17.37 cm değerleri elde edilmektedir. Kolon-kiriş bağlantılarının mafsallı olması halinde bu değerler sırasıyla 38.68 cm ve 36.01 cm değerlerini almaktadır. PSFEM

yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 70). Köprü sistemin tabliye orta kısmında oluşan maksimum düşey yerdeğiştirme değeri için rijit ve yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumları için sırasıyla %31.08 ve %49.29 olarak hesaplanmaktadır. Sistemin mafsalı olduğu kabul edilerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda ise yerdeğiştirme değeri tamamen rijit bağlı olması durumuna oranla %67.43 büyük çıkmaktadır.

Ayrıca enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, düşey yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu köprü tabliyesinin orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %2, %0.08, %1.30 ve %0.50 daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 70. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri

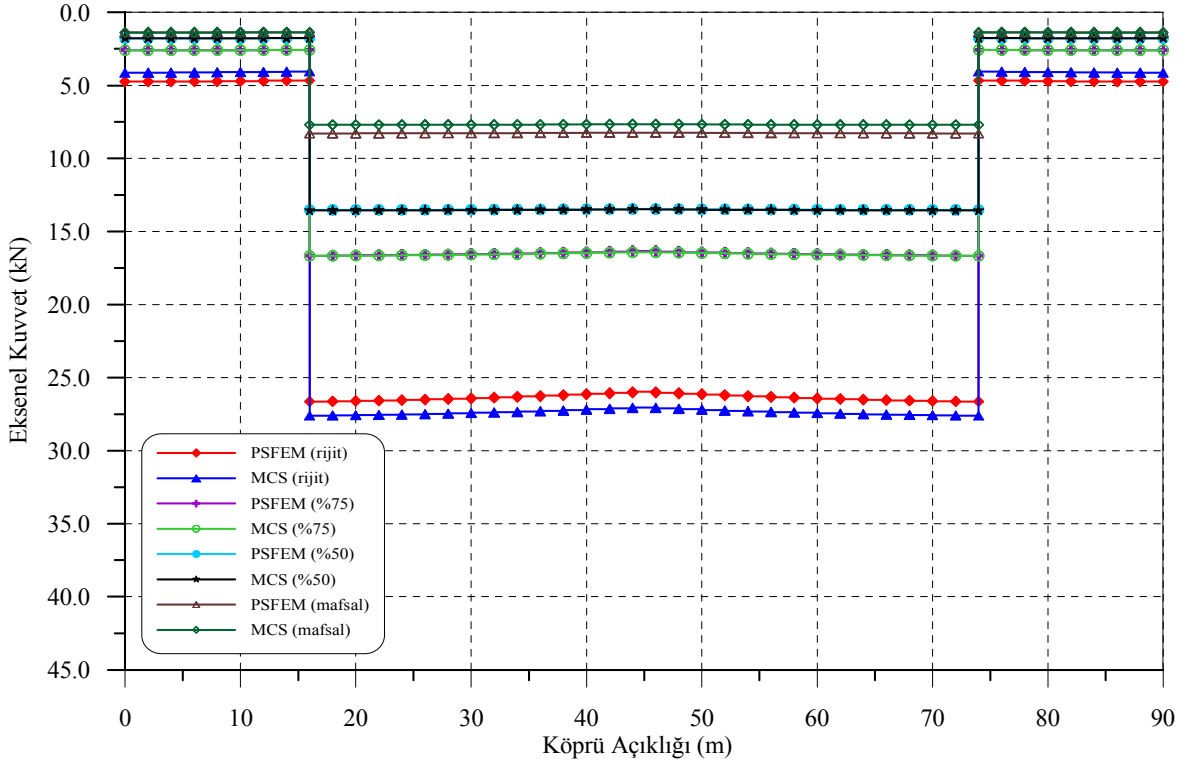
### 3.2.2.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Yarı rijit ve geleneksel bağlantı türleri için, enkesit alanının rastgele değişken olduğu kabul edilerek gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonuçlarından elde edilen köprü açıklığı boyunca maksimum eksenel kuvvet değerleri Şekil 71’de sunulmaktadır. Köprü tabliyesi boyunca en büyük eksenel kuvvet değerleri kolon-kiriş bağlantılarının tamamen rijit olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin mafsallardan oluşması durumunda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Yerdeğiştirmelerin aksine bağlantı rijitliğindeki azalma ile eksenel kuvvet değerleri de azalmaktadır. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %40.11 ve %53.67 düzeyindedir. Sistemin mafsallı olması halinde ise bu fark %69.47 olmaktadır.

PSFEM ve MCS yöntemlerinin enkesit alanının rastgele değişmesi durumunda elde edilen eksenel kuvvet değerleri üzerinden mukayesesi Şekil 71’de gerçekleştirilmektedir. Stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin her iki yöntem için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen eksenel kuvvet değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %6.50, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.16 ve %0.28 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %5.01 olmaktadır.

Enkesit alanının belirsiz olması durumunda, eksenel kuvvet değerinin en büyük olduğu tabliyenin orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen eksenel kuvvet değerlerinin elastisite modülü için elde edilen eksenel kuvvet değerine oranla sırasıyla %2.21, %3.42, %0.60 ve %4.14 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).





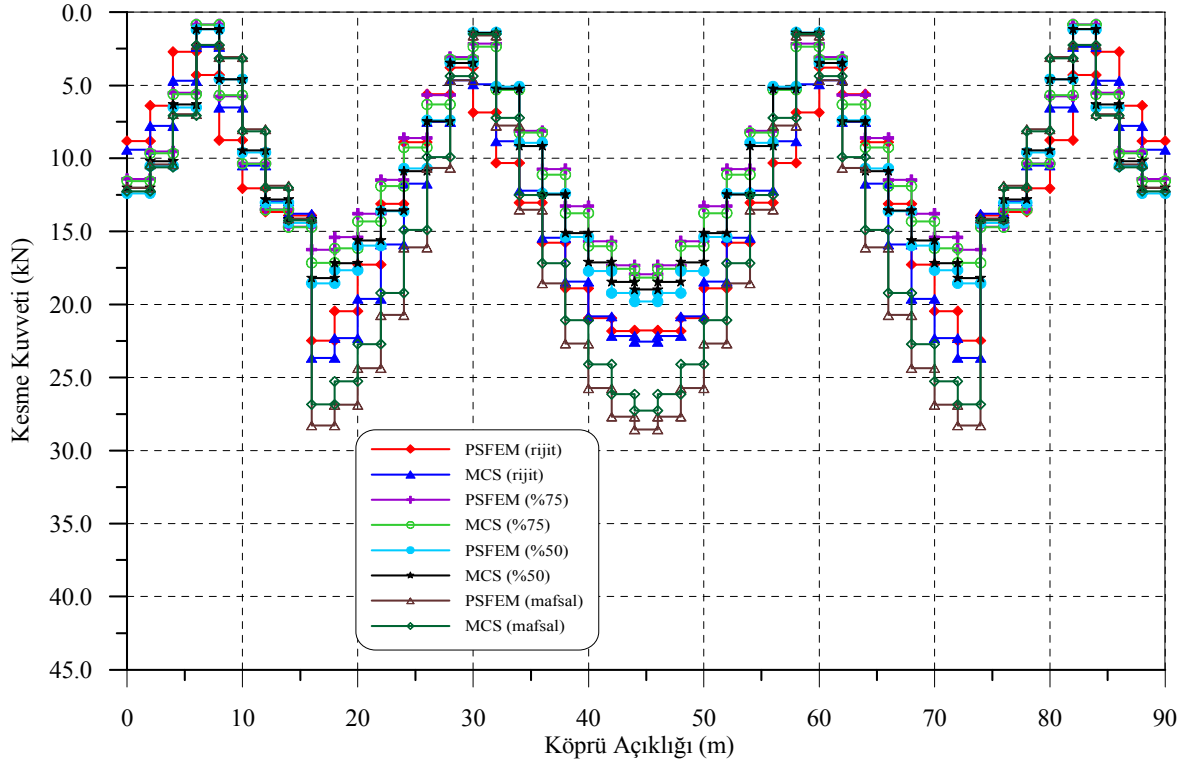
Şekil 71. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Şekil 72'de köprü açıklığı boyunca elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi en küçük kesme kuvveti değerleri sistemin %75 bağlı olması durumunda, en büyük kesme kuvveti değerleri ise kiriş bağlantılarının mafsalı olması durumunda olduğu görülmektedir. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarından elde edilen ortalama fark ise sırasıyla %56.14 ve %55.03'tür. Mafsalı sistem olması halinde ise bu fark %56.32 olmaktadır.

PSFEM ve MCS yöntemleri Şekil 72'de ayrıca mukayese edilmektedir. Burada, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %7.2, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.12 ve %2.07 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsalı sistem olması halinde ise ortalama fark %4.03 olmaktadır.

Enkesit alanının belirsiz olması durumunda, kesme kuvveti değerinin en büyük olduğu tabliye orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve

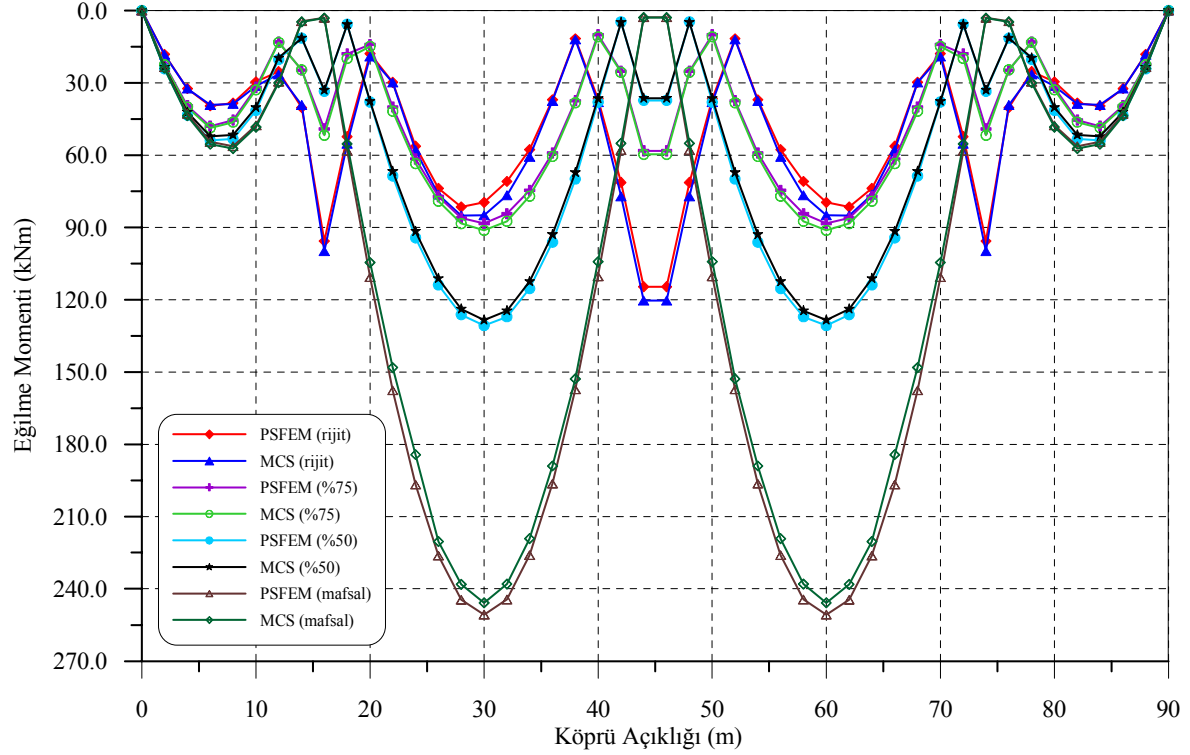
yarı rijit bağlantılar (%75 ve %50 bağlı) için elde edilen kesme kuvveti değerinin elastisite modülü için elde edilen kesme kuvveti değerine oranla sırasıyla %0.45, %1.40, %0.57 ve %1.51 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).



Şekil 72. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri

Bölüm 2.3.4'te şekli verilen yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 73'te verilmektedir. Köprü tabliyesi boyunca elde edilen stokastik dinamik eğilme momenti değerleri sistemin mafsallı olması durumunda en büyük olurken, bunları sırasıyla %50 bağlı, %75 bağlı ve tamamen rijit olması durumlarında elde edilen eğilme momentleri izlemektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre elde edilen eğilme momenti değerlerinin, nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarından elde edilen eğilme momentlerine göre ortalama farkları sırasıyla %56.27 ve %155.10'dur. Sistemin mafsallı olması durumunda ise ortama fark %394.30 olmaktadır. PSFEM'den elde edilen stokastik dinamik eğilme momentlerinin MCS yönteminden elde edilen değerlere oranla bir miktar daha büyük olduğu şekilden görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %3.54, nispeten rijit

ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.11 ve %2.56 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %4.71 olmaktadır.



Şekil 73. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, eğilme momenti değerinin en büyük olduğu köprü açıklığı orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen eğilme momenti değerinin elastisite modülü için elde edilen eğilme momenti değerine oranla sırasıyla %0.52, %6.16, %2.41 ve %3.63 daha büyük olduğu gözlenmektedir (PSFEM için).

### 3.2.2.3. Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu

Bu bölümde yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin (Şekil 27) başlangıç rijitliğinin belirsiz olması durumu için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Seçilen köprü modelinde sadece kirişlerin kolonlara bağlantı yerlerinin kısmi bağlı olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Sistem modelinin nispeten rijit (%75 bağlı) ve zayıf bağlı (%50) ve sonuçları mukayese edebilmek

için de geleneksel bağlı (tam rijit ve mafsallı) olduğu varsayılarak çözüme gidilmektedir. Başlangıç rijitliğinin ( $k_\rho$ ) rastgele değişken olması durumu için, ortalama değer (%75 ve %50 bağıllık durumları için), korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi dikkate alınmıştır.

$$E[k_1] = 1.74 \times 10^4 \quad \lambda = 10$$

$$E[k_2] = 1.16 \times 10^4 \quad \lambda = 10$$

$$\mu(k_\rho, k_\sigma) = e^{-\left(\frac{|x_\rho - x_\sigma|}{\lambda}\right)}, \quad \rho, \sigma = 1, 2, \dots, 114$$

$$\alpha = 0.10$$

### 3.2.2.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

İlk on moda ait doğal frekans değerleri geleneksel bağlantılar (rijit ve mafsallı) ve yarı rijit bağlantılar için Tablo 20'de gösterilmektedir. Buna göre PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbiriyle eşit düzeyde olduğu görülmektedir. İki yöntemden elde edilen sonuçların özdeş düzeyde olması stokastik dinamik analizde PSFEM'in MCS yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu düşüncesini öne çıkarmaktadır. Başlangıç rijitliğinin rastgele değişken olması durumunda, elastisite modülü ve enkesit alanına göre daha küçük frekans değerleri elde edilmektedir.

Tablo 20. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri

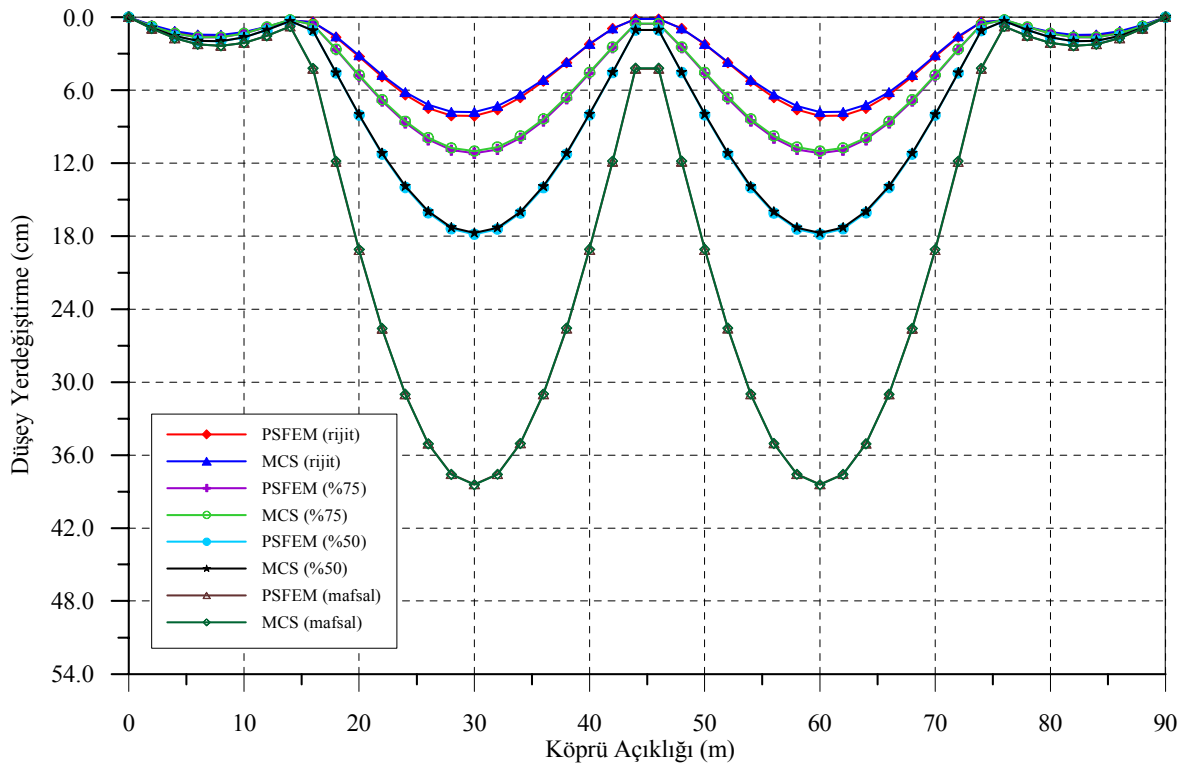
Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)							
	PSFEM				MCS			
	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal	Rijit	%75 bağlı	%50 bağlı	Mafsal
1	1.177	0.980	0.866	0.730	1.177	0.980	0.866	0.730
2	1.447	1.059	0.891	0.732	1.447	1.059	0.891	0.732
3	3.315	3.132	2.996	2.545	3.315	3.132	2.996	2.545
4	3.616	3.253	3.044	2.552	3.616	3.253	3.044	2.552
5	4.004	3.429	3.169	2.760	4.004	3.429	3.169	2.760
6	4.287	3.454	3.173	2.761	4.287	3.454	3.173	2.761
7	7.120	6.661	6.384	4.721	7.120	6.661	6.384	4.721
8	7.735	6.877	6.475	4.736	7.735	6.877	6.475	4.736
9	7.999	7.699	7.664	7.082	7.999	7.699	7.664	7.082
10	11.670	11.303	10.714	7.105	11.670	11.303	10.714	7.105

### 3.2.2.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin tabliyesi boyunca, rastgele değişken seçilen yay sabiti için geleneksel (rijit ve mafsal bağlı) ve yarı rijit bağlantıların (%75 ve %50 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş en büyük düşey yerdeğiştirme değerleri Şekil 74'te karşılaştırılmaktadır. Köprü açıklığı boyunca elde edilen stokastik dinamik yerdeğiştirme değerleri sistemin mafsallı olması durumunda en büyük olurken, bunları sırasıyla %50 bağlı, %75 bağlı ve tamamen rijit olması durumlarında elde edilen yerdeğiştirme değerleri izlemektedir. Ayrıca şekilden perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmelerin genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilemekte olduğu da açıkça görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sistemin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.55, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %0.17 ve %0.23 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.11 düzeyinde ortaya çıkmaktadır. Seçilen köprü modelinin tabliyesi boyunca oluşan maksimum yerdeğiştirme değerleri rijit sisteme göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında sırasıyla %27.88 ve %47.21 oranlarında bir farklılık arz etmektedir. Sistemin mafsallı olduğu kabul edilerek yapılan stokastik dinamik analizler sonucunda,

yerdeğiştirme değerinin tamamen rijit bağlı olmasına oranla %66.87 daha büyük çıktığı görülmektedir.

Başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda, düşey yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu tabliye orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %0.21, %1.1, %0.44 ve %1.22 daha küçük, enkesit alanına göre ise sırasıyla %3.40, %3.83, %1.68 ve %2.56 küçük olduğu gözlenmektedir.

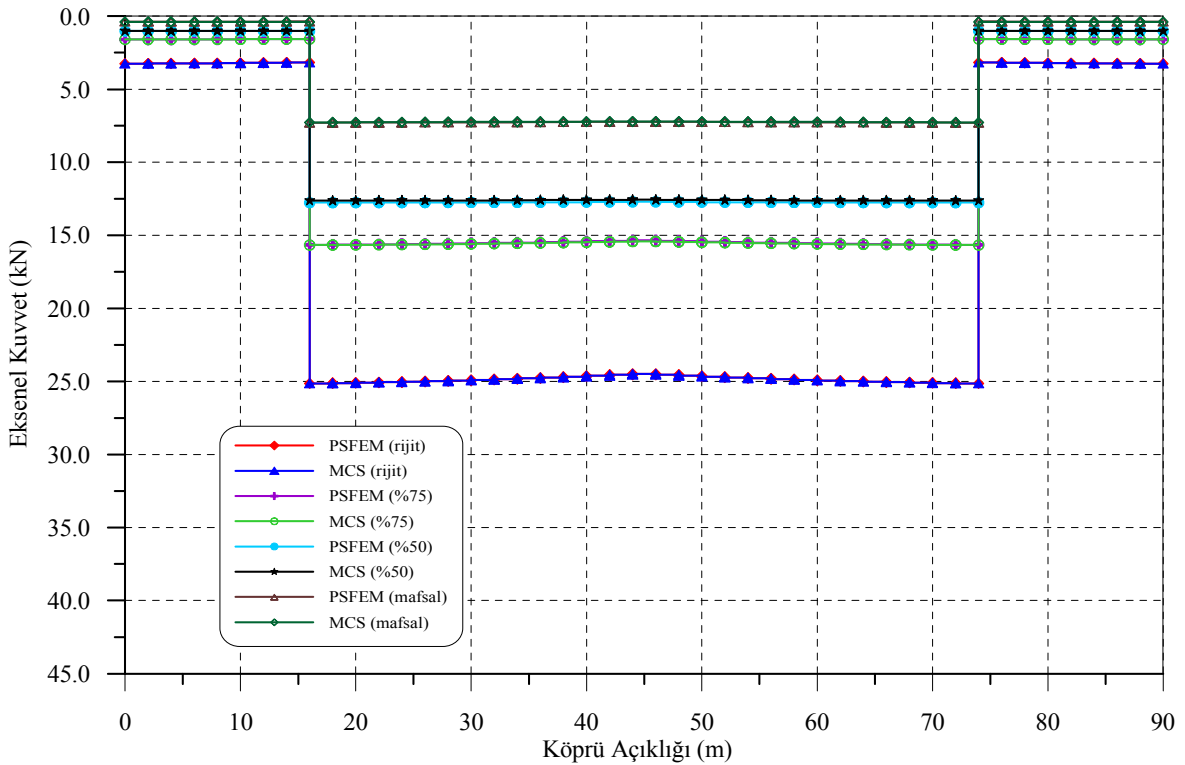


Şekil 74. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri

### 3.2.2.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Şekil 75'te yarı rijit ve geleneksel bağlantı türleri için başlangıç rijitliğinin belirsiz olması durumunda PSFEM ve MCS yöntemlerine göre köprü açıklığı boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvet değerleri görülmektedir. Köprü tabliyesi boyunca en büyük eksenel kuvvet değerleri kolon-kiriş bağlantılarının tamamen rijit olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin mafsalı olması durumunda ortaya çıktığı görülmektedir. Rijit

bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarından elde edilen ortalama fark sırasıyla %42.23 ve %55.69'dur. Sistemin mafsallı olması halinde ise bu fark %77.08 olmaktadır. PSFEM ve MCS yöntemlerinin aksenal kuvvet değerleri üzerinden birbirleriyle mukayesesi Şekil 75'te gerçekleştirilmiştir. Stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin her iki yöntem için birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.30, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.06 ve %0.10 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.07 olmaktadır. Buradan çok kısa bir süreçte sonuca oluşan PSFEM'in stokastik dinamik analizlerde MCS yönteminin yerine rahatlıkla kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 75. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

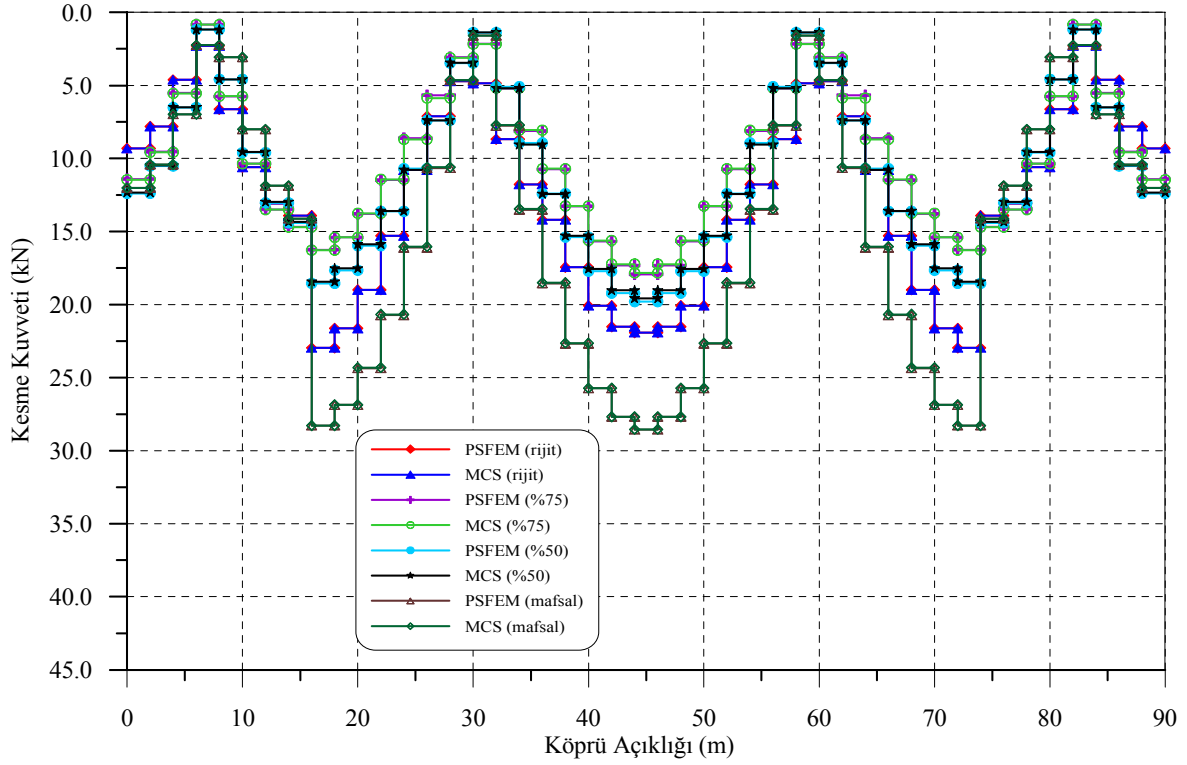
Başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda, aksenal kuvvet değerinin en büyük olduğu tabliye orta kısmındaki değerler dikkate alındığında geleneksel (rijit ve mafsal) ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin

elastisite modülünün rastgele seçilmesiyle elde edilen değerlere göre sırasıyla %0.23, %1.12, %0.32 ve %0.12 oranlarında, enkesit alanının rastgele seçilmesiyle elde edilen değerlere göre ise sırasıyla %3.14, %2.86, %1.95 ve %2.21 oranlarında daha küçük olduğu gözlenmektedir.

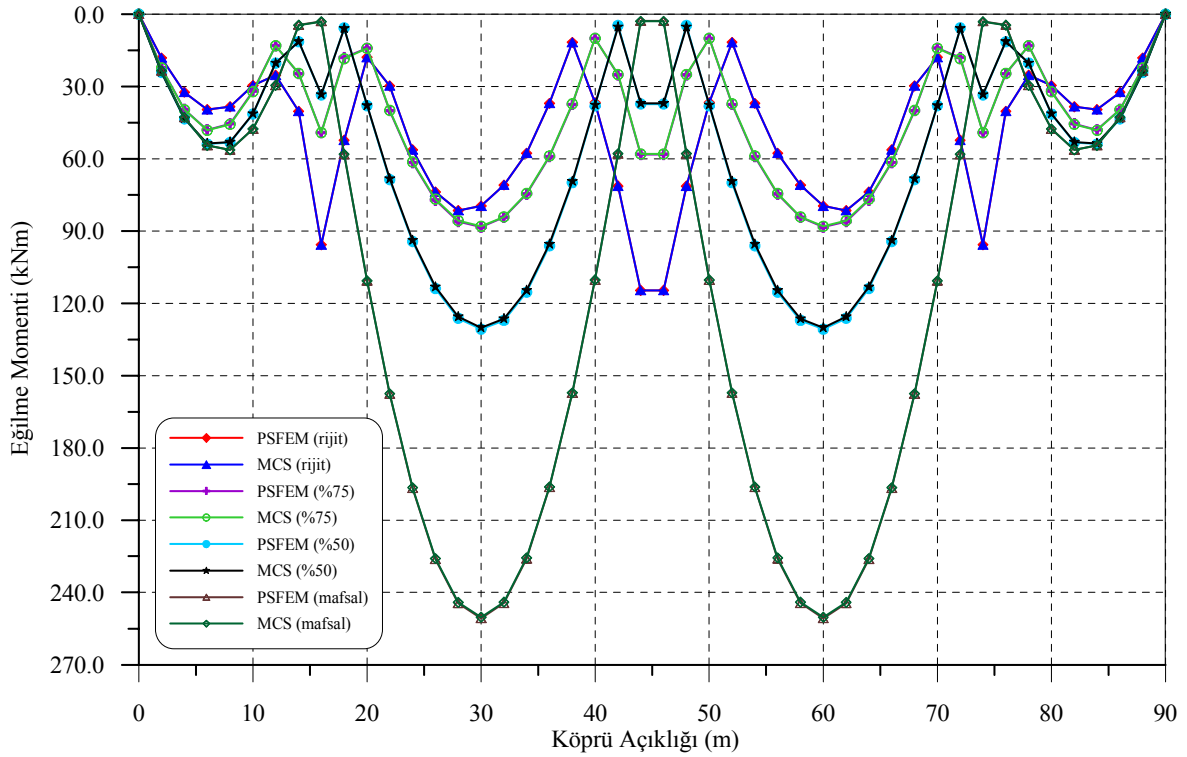
Şekil 76-77'de farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre köprü tabliyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin mafsallı olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin rijit bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerleri için rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarından elde edilen ortalama fark sırasıyla %38.55 ve %32.59 olmaktadır. Mafsallı sistem olması halinde oluşan ortama fark %28.45 oranındadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%75 bağlı) ve zayıf bağlı (%50 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark %38.95 ve %83.32 düzeyindedir. Sistemin mafsallı olması halinde oluşan ortama fark ise sırasıyla %207.70 olmaktadır. Verilen oranlardan da anlaşılacağı üzere köprü tipi yapılarda kolon-kiriş bağlantı esnekliğinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Ayrıca PSFEM ve MCS yöntemlerinin mukayesesi de Şekil 76-77'de verilmektedir. Şekillerden, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sistemin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %0.01, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.57 ve %0.53 oranında bir farklılık göstermektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.23 olmaktadır. Kolon-kiriş bağlantılarının yarı rijit olması durumunda PSFEM ile sistemin açıklık boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre tamamen rijit olması halinde ortalama %0.02, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.54 ve %1.15 düzeyinde hesaplanmaktadır. Mafsallı sistem olması halinde ise ortalama fark %0.56 olmaktadır. PSFEM ile bu örneğin çözümü bir dakika gibi kısa bir zaman alırken MCS yöntemiyle ise yaklaşık on altı saatlik bir zaman gerekmektedir. Sonuçların birbirine yakınlığı göz önünde bulundurulursa PSFEM'in MCS yöntemi yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu ortaya çıkmaktadır.





Şekil 76. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 77. Yarı rijit bağlı çelik köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### **3.3. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Yapı Sistemlerinin İncelenmesi**

Bu bölümde yarı rijit bağlı kompozit kesitli yapı sistemlerinin malzeme ile geometrik özelliklerinin ve yay sabitinin rastgele değişken olması durumları için stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Analizleri yapılan yarı rijit bağlı, kompozit kesitli çerçeve ve köprü örneklerinin stokastik analizleri sırasında kullanılan ortalama değer, korelasyon fonksiyonu ve değişim katsayısı değerleri 3.1. bölümünde yer alan kompozit kesitli çerçeve ve köprü modelleri ile aynıdır.

#### **3.3.1. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Çerçeve Sistemin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi**

Bu kısımda Bölüm 2.3.5'te kesit ve malzeme özellikleri verilen yarı rijit bağlantılı kompozit kesitli çerçeve sistemin perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlara göre bu iki yöntemin mukayesesi ve birbirinin yerine kullanılabilirliği değerlendirilmektedir. Bu analizler seçilen çerçeve sistemin kolon ve kirişlerinin rijit ve yarı rijit bağlı olduğu kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Kiriş-kolon bağlantılarında iki türlü yarı rijit bağlı olma durumu dikkate alınmıştır. Bu bağlantılardan ilkinin nispeten rijit (%90 bağlı) ikincisinin ise daha zayıf (%75 bağlı) bağlı olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizlerde yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depremi YPT330 bileşeni dikkate alınmaktadır. Bu depreme ait grafik Bölüm 2.2.1.1.'de verilmektedir.

##### **3.3.1.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu**

###### **3.3.1.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması**

İlk on mod için doğal frekanslar tam rijit ve yarı rijit bağlantılar olması durumları için Tablo 21'de yer almaktadır. Bağlantı esnekliği doğal frekanslar üzerinde özellikle düşük modlarda önemli bir etkiye sahiptir. Buna göre rijit bağlı sistemde frekans değerleri en yüksek olurken, bağlantılardaki rijitliğin azalmasıyla doğal frekanslar da azalmaktadır. Kompozit kesitli çerçeve sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılıkta oluşan ortalama fark sırasıyla %6.74 ve %16.22 oranında azalmaktadır. Tablo

21’de PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. Rastgele değişken elastisite modülü için PSFEM’den elde edilen frekans değerlerinin MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama olarak %2.28, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %1.72 ve %0.92 oranında bir farklılık arz ettiği tespit edilmiştir. İki yöntem birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği için stokastik dinamik analizde PSFEM’in MCS yöntemi yerine kullanılabilir olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

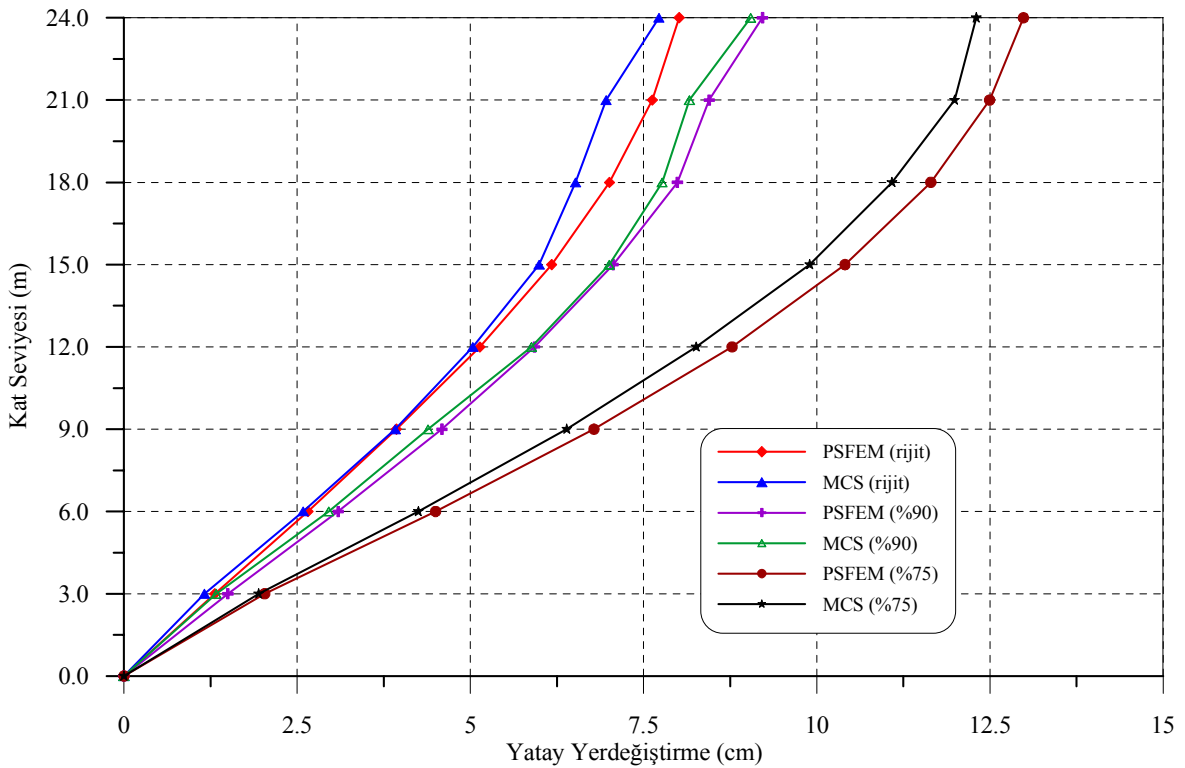
Tablo 21. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	1.582	1.442	1.247	1.726	1.659	1.289
2	4.793	4.367	3.772	5.248	4.686	3.803
3	8.241	7.482	6.433	8.665	7.774	6.450
4	11.589	10.528	9.054	11.526	10.586	9.052
5	11.786	11.719	11.610	12.068	11.875	11.415
6	13.964	13.475	11.617	14.037	13.420	11.748
7	14.923	13.759	13.335	15.177	13.988	13.288
8	17.259	16.227	13.933	17.251	16.206	13.909
9	17.890	16.740	15.818	18.135	16.839	15.722
10	20.292	18.442	16.023	20.199	18.495	15.993

### 3.3.1.1.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için rijit ve yarı rijit bağlı (%90 ve %75 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri Şekil 78’de görülmektedir. Seçilen deprem ivme kaydı (Şekil 14) çerçeve sisteme yatay doğrultuda uygulanmış ve 0.005 s zaman aralığında çerçeve sistemin stokastik dinamik tepkileri elde edilmiştir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %3.72, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %2.72 ve %4.53

oranında bir farklılık göstermektedir. Bağlantı esnekliğindeki azalma ile beraber sistemdeki yerdeğiştirme değerleri artmaktadır. Kompozit çerçeve sistemin kolon-kirişlerinin rijit bağlı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 8.01 cm iken MCS yönteminde bu değer 7.75 cm düzeyinde olmaktadır. %90 ve %75 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 9.22 cm ve 12.98 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 9.05 cm ve 12.30 cm değerleri elde edilmektedir. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 78). Şekilden ve sayısal değerlerden görüldüğü gibi, çerçeve sistemin nispeten yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri bile tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük olmaktadır. Bu farklar bağlantı rijitliğindeki azalma (%75 bağlı) olması ile artmaktadır. Çerçeve sistemin en üst katında oluşan maksimum yerdeğiştirme değeri için rijit ve yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit (%90) ve zayıf bağlı (%75) olması durumları için sırasıyla, %14.64 ve %66.06 düzeyindedir.



Şekil 78. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmeleri

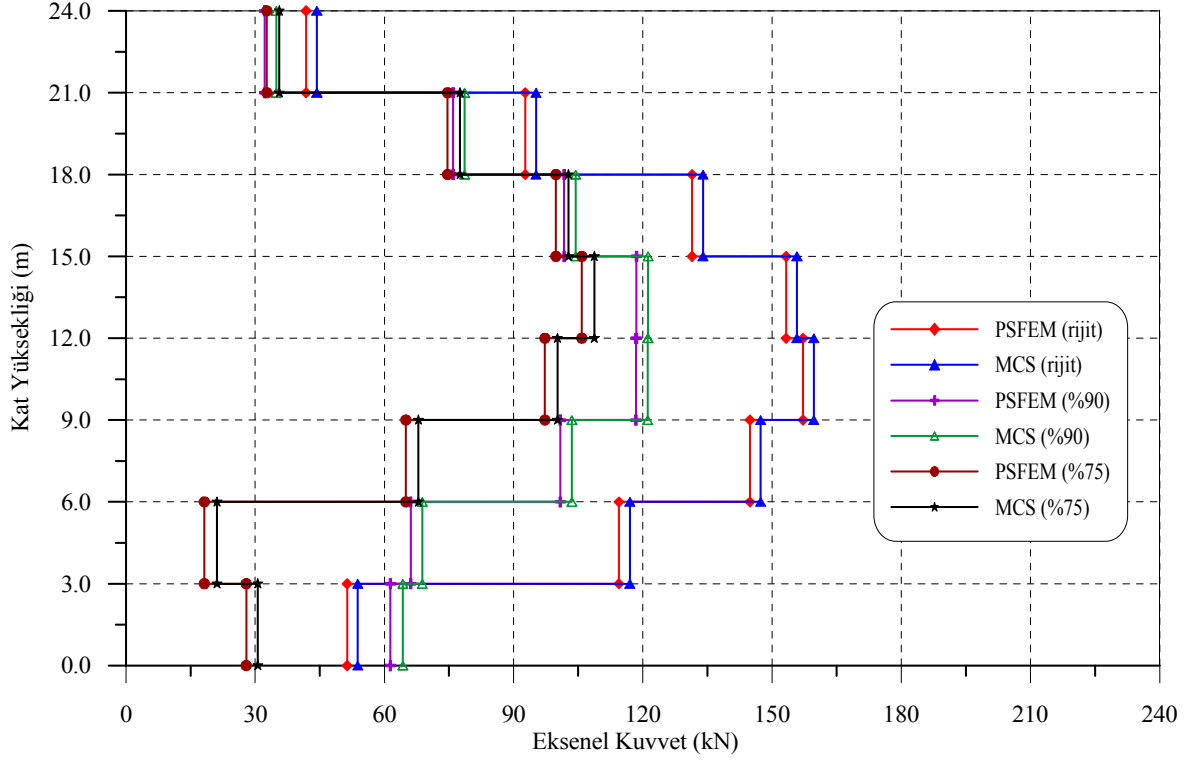
Şekil 78'den görüldüğü gibi rijit ve yarı rijit bağlı olması durumları arasında (özellikle zayıf bağlı olması halinde) kompozit kesitli çerçeve sistem için elde edilen stokastik sonuçlar arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bu örnekle birlikte bağlantı rijitliğindeki küçük bir azalışın bile (%90 bağlı) yerdeğiştirme değerlerini önemli düzeyde değiştirebildiği ortaya çıkmaktadır. Buna göre bağlantı rijitliğindeki azalmayla yerdeğiştirme değerleri arasında önemli bir artış olduğu görülmektedir. Sonuçlar arasında oluşan bu fark çerçevelerin tasarım ve analizinde kısmi bağlantıların varlığını göz önünde bulundurmanın gerekli olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

### 3.3.1.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Elastisite modülünün belirsiz olması durumunda, yarı rijit ve tamamen rijit bağlantı türleri için kompozit kesitli çerçeve sistemin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilmiş kat seviyesi boyunca maksimum aksenal kuvvet değerleri Şekil 79'da yer almaktadır. Kat seviyesi boyunca aksenal kuvvet değerleri kolon-kiriş bağlantılarının tamamen rijit olması durumunda en büyük değerlerini alırken, en küçük değerleri ise sistem %75 bağlı iken oluşmaktadır. Rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %25.41 ve %40 olmaktadır. PSFEM ve MCS yöntemlerinin aksenal kuvvet değeri için birbirleriyle mukayesesi de Şekil 79'da verilmektedir. Stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen aksenal kuvvet değerlerinin her iki yöntem için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.72, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.66 ve %4.91 oranında bir farklılık göstermektedir.

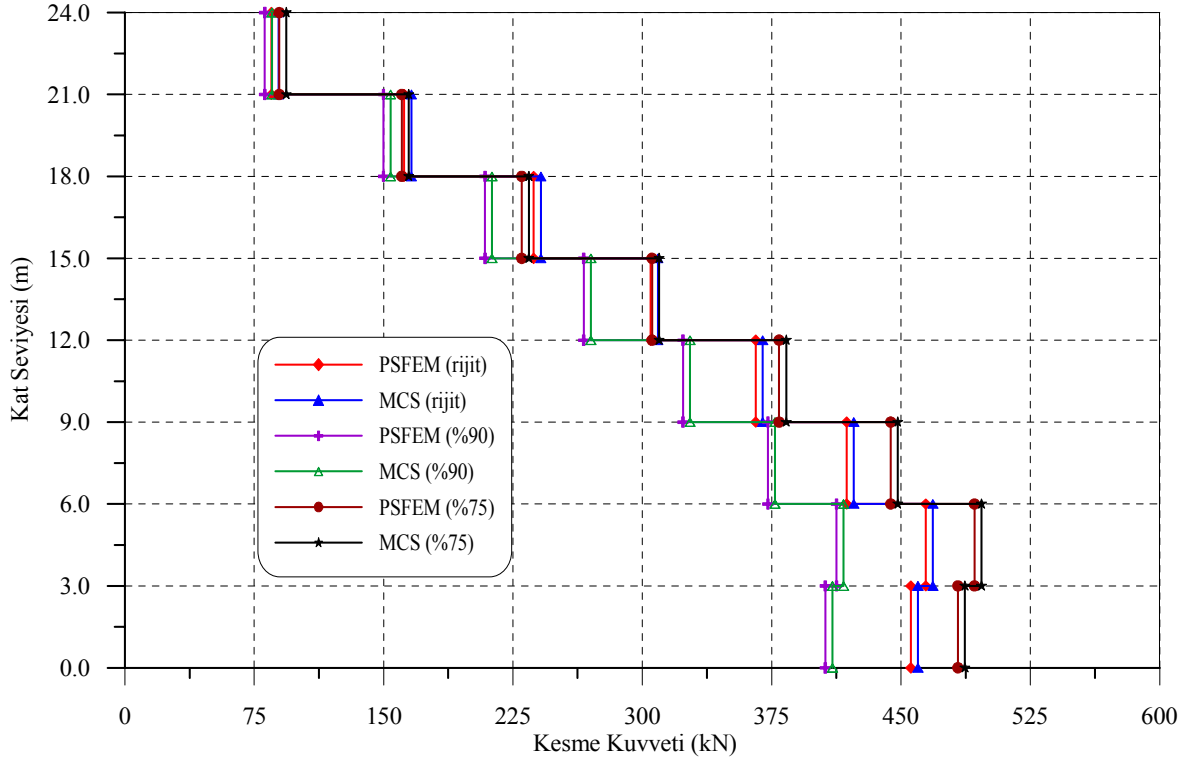
Farklı bağlantı türleri için 8 katlı ve 4 açıklıklı kompozit kesitli çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri PSFEM ve MCS yöntemlerine göre elde edilerek Şekil 80-81'de karşılaştırılmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin %75 bağlı olması durumunda, en küçük değerler ise %90 bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %12.91 ve %6.41 olmaktadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%90 bağlı) ve daha zayıf

bağlı (%75 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark da %12.27 ve %7.10 düzeyindedir.

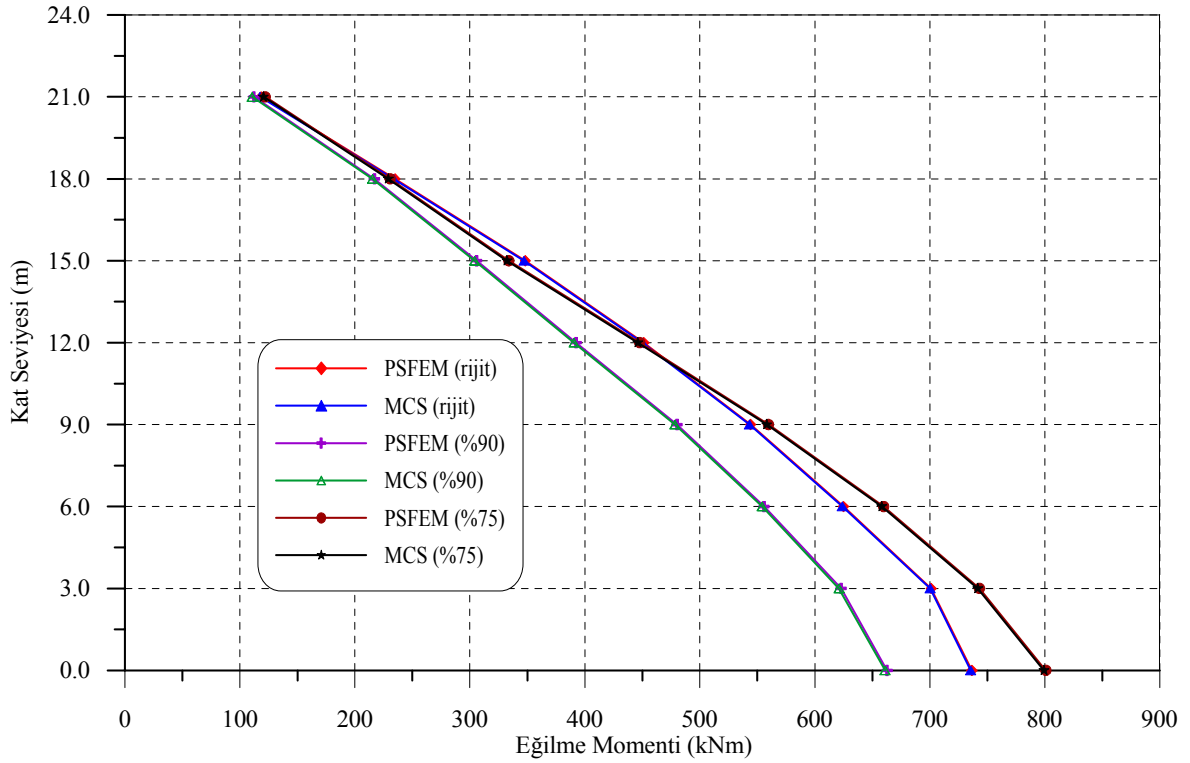


Şekil 79. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

PSFEM ve MCS yöntemlerinin mukayesesi ise Şekil 80-81'de ayrıca değerlendirilmektedir. Şekillerden, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sistemin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %1.71, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.91 ve %1.70 oranında bir yakınsama göstermektedir. Kolon-kiriş bağlantılarının yarı rijit olması durumunda sistemin kat seviyesi boyunca PSFEM'den elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre tamamen rijit iken ortalama %0.30, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.57 ve %0.46 oranlarında bir fark oluşturmaktadır. Her iki yöntemin stokastik dinamik sonuçlarının birbirine yakın olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 80. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 81. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken elastisite modülü için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.3.1.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

#### 3.3.1.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Enkesit alanlarının rastgele değişken olarak seçildiği yarı rijit bağlantılı kompozit kesitli çerçeve sistemin PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilmiş ilk on modlarına ait frekans değerleri Tablo 22’de yer almaktadır. Kompozit kesitli bu çerçeve sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılıkta oluşan ortalama fark sırasıyla %8.01 ve %18.87 oranında azalmaktadır. PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu da açıkça görülmektedir (Tablo 22). PSFEM’den bulunan frekans değerlerinin MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %1.67, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %0.89 ve %0.66 oranlarında bir fark oluşmaktadır. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, doğal frekans değerinin en büyük olduğu onuncu moddaki değerler dikkate alındığında ise rijit ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen frekans değerinin elastisite modülü için elde edilen değerlere oranla sırasıyla %0.90, %0.71 ve %2.24 büyük olduğu görülmektedir.

Tablo 22. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

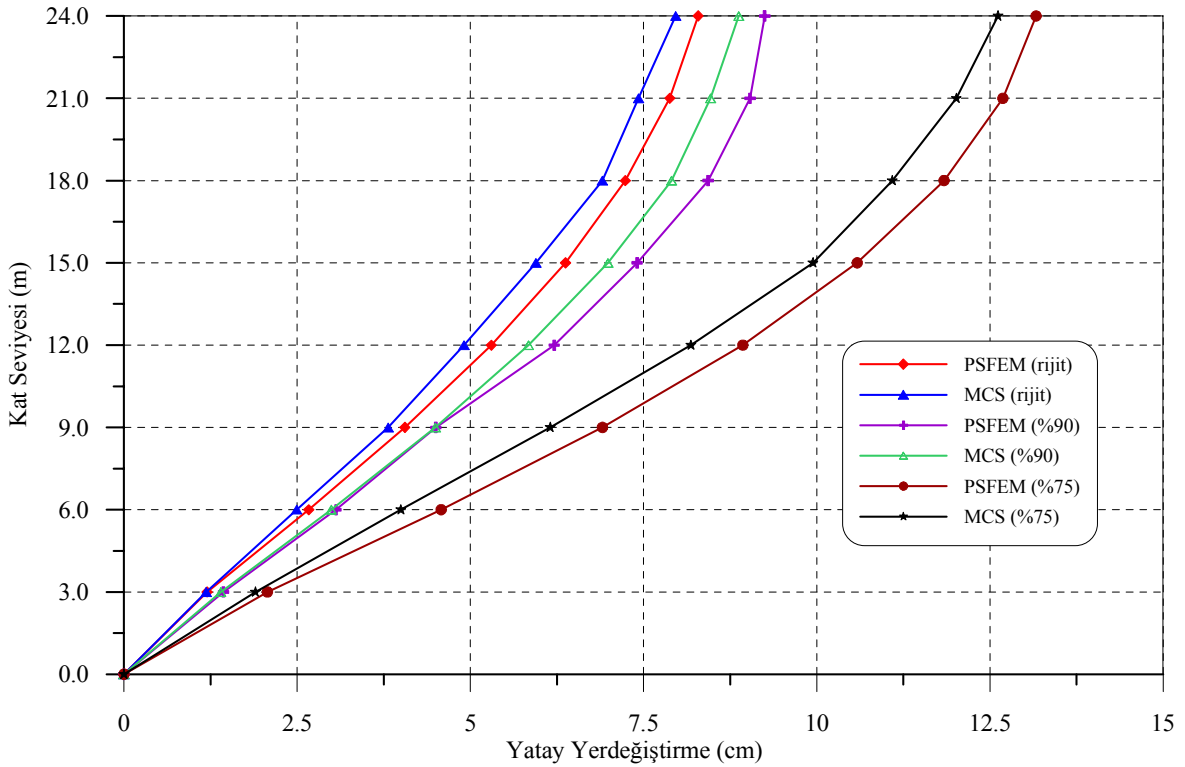
Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	1.772	1.597	1.267	1.889	1.618	1.293
2	4.997	4.423	3.802	5.148	4.577	3.840
3	8.441	7.698	6.498	8.598	7.711	6.525
4	11.397	10.597	9.103	11.482	10.629	9.155
5	12.086	11.887	11.295	12.272	11.906	11.376
6	13.987	13.321	11.993	14.095	13.385	12.022
7	15.220	14.107	13.335	15.307	14.205	13.341
8	17.275	16.196	14.052	17.342	16.235	14.159
9	18.090	17.086	15.694	18.340	17.101	15.701
10	20.307	18.229	16.228	20.381	18.627	16.359

#### 3.3.1.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistemin enkesit alanının belirsiz olması durumunda rijit ve yarı rijit bağlıyken (%90 ve %75 bağlı), PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat



seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri Şekil 82’de görülmektedir. Bu çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca perturbasyon yöntemiyle elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %5.56, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %4.41 ve %6.53 oranlarında büyük çıkmaktadır. Çerçeve sistemin rijit bağlı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 8.30 cm iken MCS yönteminde bu değer 7.96 cm’dir. %90 ve %75 bağlı olması durumunda PSFEM’den sırasıyla 9.25 cm ve 13.20 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 8.87 cm ve 6.91 cm yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Mafsallı sistem olması halinde ise bu değerler sırasıyla 12 cm ve 12.61 cm değerini almaktadır. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 82). Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda elastisite modülüne göre daha büyük yerdeğiştirme değerleri tespit edilmiştir. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi halinde, yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu en üst kattaki değerler dikkate alındığında rijit ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %3.50, %0.55 ve %1.67 daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.



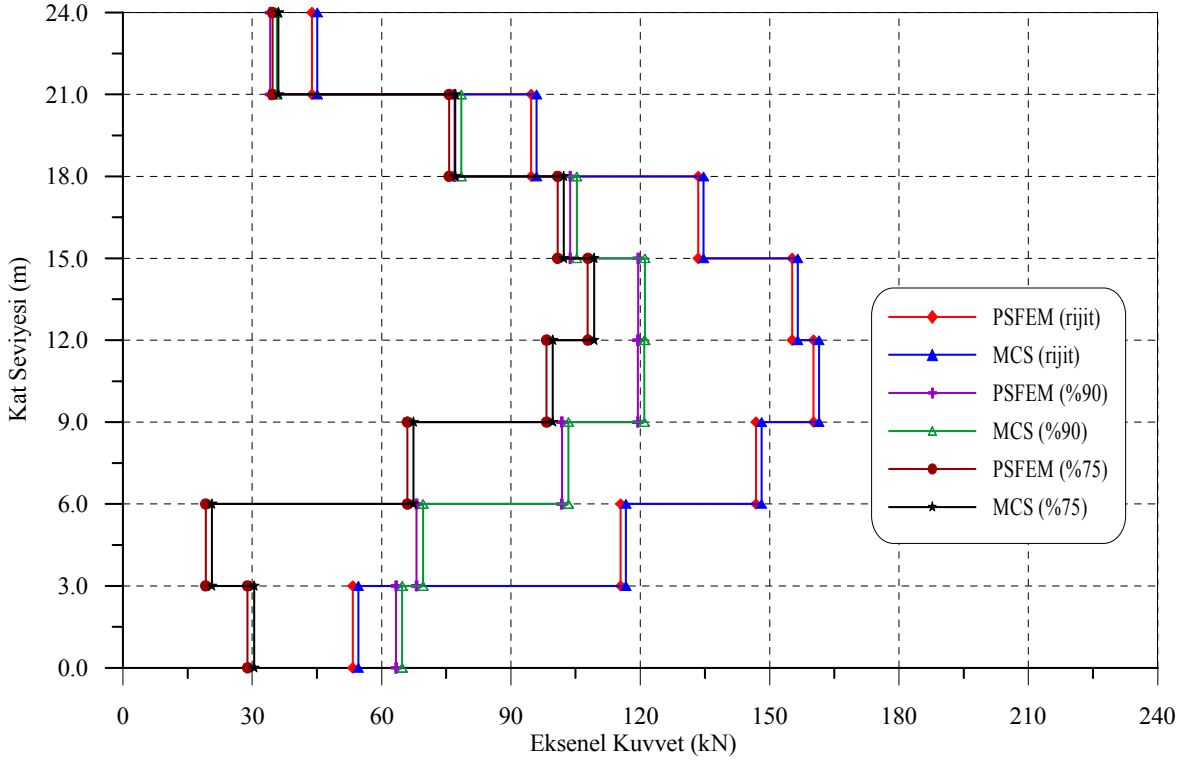
Şekil 82. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmeleri

Çerçeve sistemin yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 82). Bu farklar bağlantı rijitliğindeki azalma (%75 bağlı) olması ile artmaktadır. Çerçeve sistem tamamen rijit bağlı iken, nispeten rijit (%90) ve daha zayıf bağlı (%75) olması durumları için oluşan yerdeğiştirme değeri farkı sırasıyla %15.19 ve %66.53 olmaktadır.

### **3.3.1.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması**

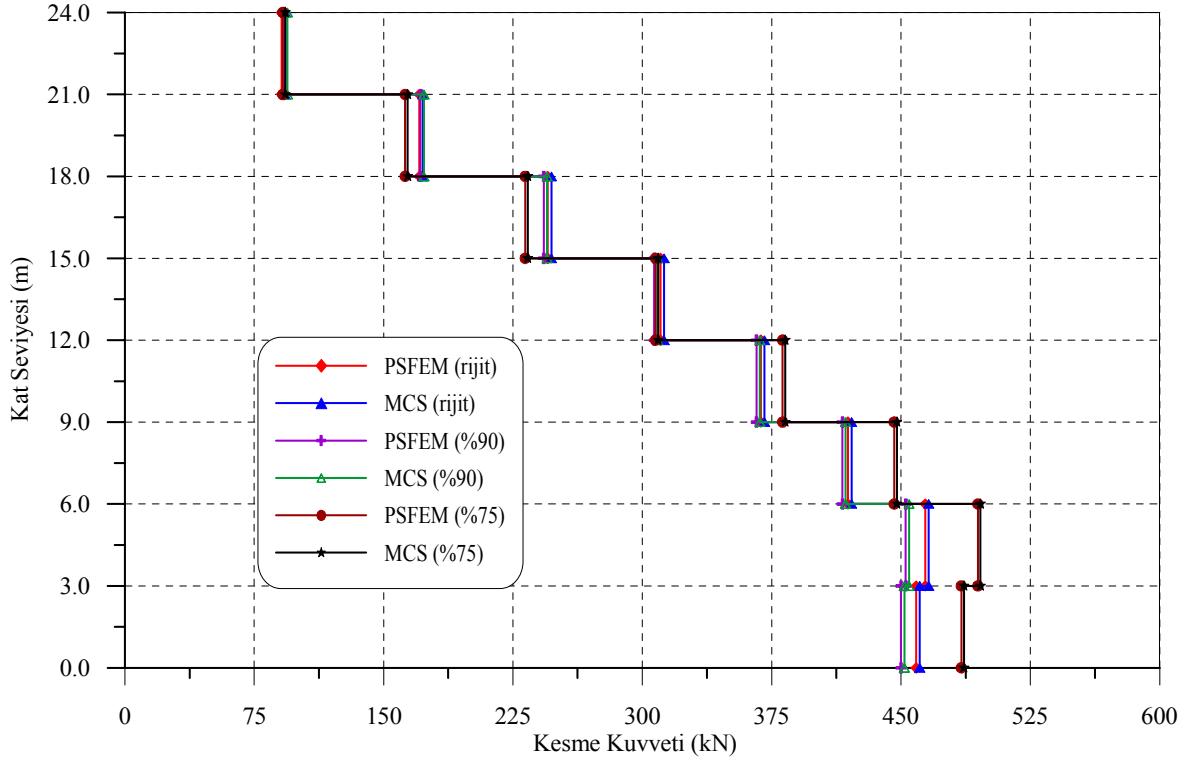
Burada bir önceki bölümde yerdeğiştirmeler için gerçekleştirilen mukayeseler, eleman kuvvetleri için yapılmaktadır. Buna göre, geleneksel (rijit) ve yarı rijit bağlı olma durumlarında PSFEM ve MCS yöntemleriyle yapılan stokastik dinamik analiz sonucunda elde edilen kesit tesirleri karşılaştırılmaktadır.

Şekil 83'te farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum eksenel kuvvetler karşılaştırılmaktadır. Bağlantı rijitliği azaldıkça eksenel kuvvet değerinde de bir azalışın olduğu görülmektedir. Rijit bağlı olma durumuna göre %90 ve %75 bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %25.25 ve %39.85 oranında küçük olmaktadır. Şekil 83'te ayrıca PSFEM ve MCS yöntemleri de karşılaştırılmaktadır. Şekilden, her iki yöntemden elde edilen stokastik eksenel kuvvet değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eksenel kuvvet değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %1.34, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %2.01 ve %2.97 oranında bir farklılık göstermektedir. Enkesit alanının belirsiz olması durumunda elastisite modülüne göre rijit bağlı durum için yaklaşık %2.30, yarı rijit bağlantılar için ise sırasıyla %0.84 ve %1.86 oranında daha büyük eksenel kuvvet değerleri elde edilmiştir.

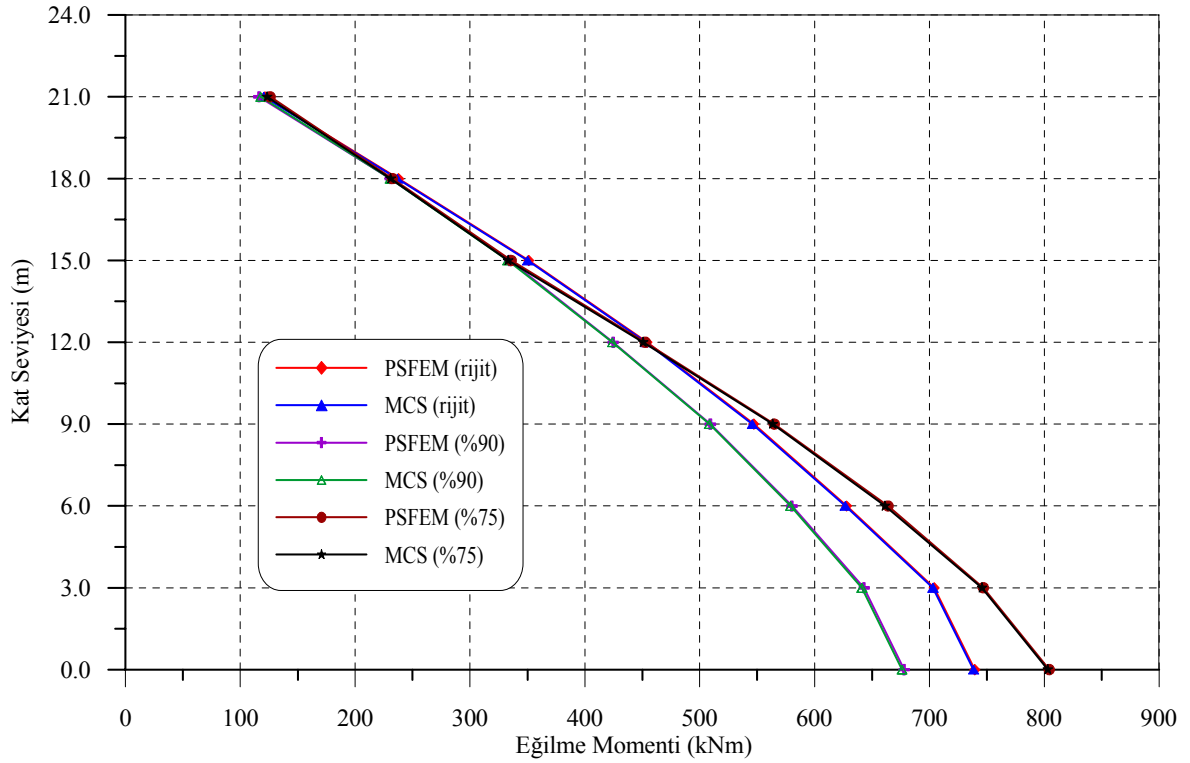


Şekil 83. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Farklı bağlantı türleri için 8 katlı – 4 açıklıklı kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemin (Şekil 28) kat seviyesi boyunca PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri Şekil 84-85'te verilmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin %75 bağlı olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin nispeten rijit bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerleri için rijit bağlı olma durumuna göre %90 ve %75 bağlı olma durumlarından elde edilen ortalama fark sırasıyla %1.26 ve %4.24'tür. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark %8.83 ve %4.32 olmaktadır. Verilen oranlardan da görüleceği üzere kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri, aksenal kuvvet ve yerdeğiştirme değerleriyle mukayese edildiğinde bağlantı rijitliğindeki azalma bu iki değeri daha düşük düzeyde etkilemektedir.



Şekil 84. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 85. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken enkesit alanı için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

Şekil 84-85'te çerçeve sistem için PSFEM ve MCS yöntemleri de mukayese edilmiştir. Şekillerden, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %0.87, nispeten rijit ve daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.79 ve %0.62 oranında bir farklılık göstermektedir. PSFEM ile kolon-kiriş bağlantılarının yarı rijit olması durumunda sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri, MCS yöntemine göre tamamen rijit iken ortalama %0.30, %90 ve %75 bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.36 ve %0.62 oranında bir fark sergilemektedir. Sonuçların birbirine yakınlığı göz önünde bulundurulursa PSFEM'in özellikle yer hareketine maruz kalan yapılarda çok kısa sürede sonuç vermesi sebebiyle stokastik dinamik analizlerde MCS yerine kullanılabilirliği açıkça görülmektedir.

### **3.3.1.3. Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu**

#### **3.3.1.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması**

Tablo 23'te kompozit kesitli çerçeve sistemin başlangıç rijitliğinin stokastik olması durumu için tamamen rijit ve yarı rijit bağlantı durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen stokastik doğal frekans değerleri gösterilmektedir. Kompozit kesitli çerçeve sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılıkta oluşan ortalama fark sırasıyla %10.99 ve %22.85 oranında azalmaktadır. PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir (Tablo 23). PSFEM'den bulunan frekans değerlerinin MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama farkı %1.67, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %0.40 ve %0.63 olmaktadır. Başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda, doğal frekans değerinin en büyük olduğu onuncu moddaki değerler dikkate alındığında rijit ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen frekans değerlerinin elastisite modülü için elde edilen frekans değerlerine oranla sırasıyla %0.90, %0.71 ve %2.24, enkesit alanından bulunan değerler için ise sırasıyla %0.20, %0.31 ve %0.43 oranında daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

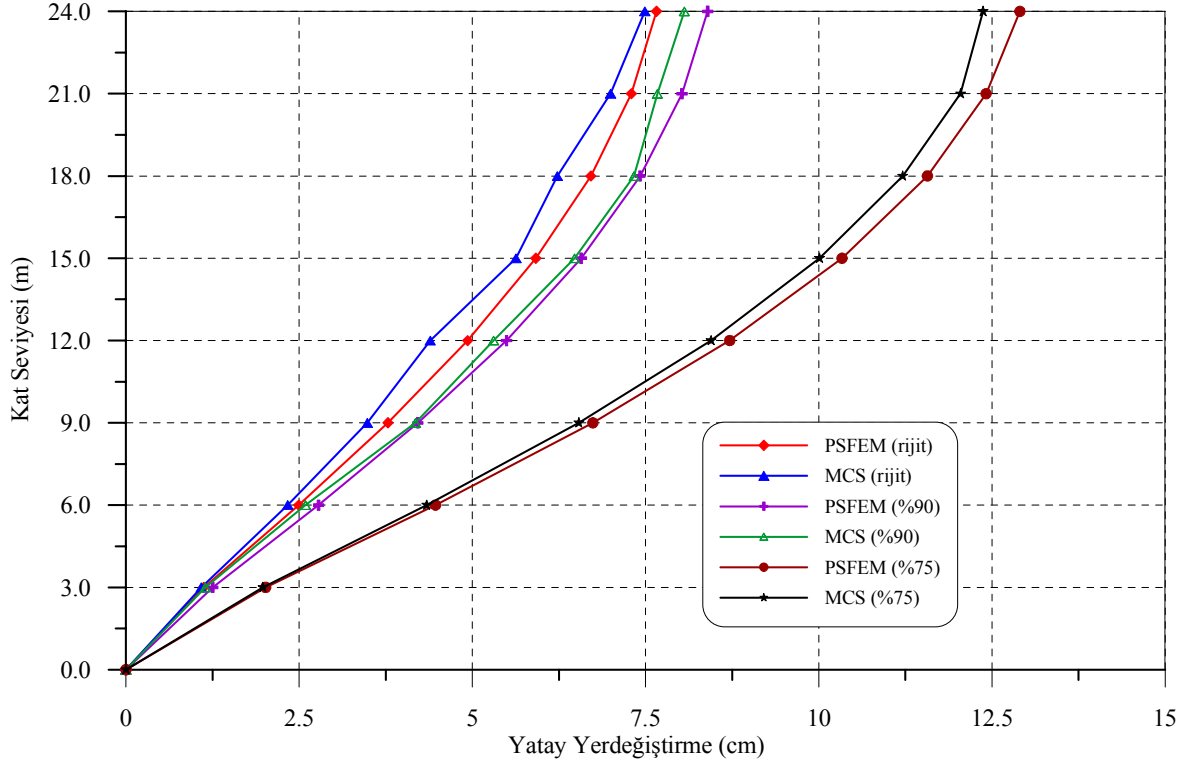
Tablo 23. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	2.122	1.754	1.287	2.433	1.782	1.275
2	5.686	4.738	3.806	5.706	4.722	3.792
3	8.997	7.851	6.492	9.128	7.821	6.441
4	11.497	10.663	9.107	11.642	10.639	9.051
5	12.403	11.955	11.493	12.363	11.926	11.477
6	14.229	13.483	11.991	14.218	13.469	11.728
7	15.552	14.111	13.339	15.542	14.051	13.309
8	17.437	16.257	14.055	17.426	16.240	13.927
9	18.542	16.994	15.701	18.526	16.936	15.697
10	20.479	18.584	16.128	20.418	18.535	16.070

### 3.3.1.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rijit ve yarı rijit bağlı (%90 ve %75 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş kat seviyeleri boyunca en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri Şekil 86'da görülmektedir. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için nispeten paralel bir durum sergilemektedir. Sayısal verilerle ifade edilecek olunursa, perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %6.29, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %4.01 ve %3.13 oranında bir farklılık göstermektedir. Bağlantı esnekliğindeki azalma ile birlikte sistemdeki yerdeğiştirme değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir. Kompozit çerçeve sistemin kolon-kirişlerinin rijit bağlı olması durumunda en üst katında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 7.66 cm iken MCS yönteminde bu değer 7.5 cm'dir. %90 ve %75 bağlı olması durumunda ise PSFEM'den sırasıyla 8.50 cm ve 12.90 cm, MCS yönteminden de sırasıyla 8.06 cm ve 12.40 cm düzeyinde yerdeğiştirme değerleri tespit edilmiştir. PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda biraz daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir (Şekil 86). Şekilden ve sayısal değerlerden görüldüğü gibi, çerçeve sistemin yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri tamamen rijit bağlı olması durumuyla

karşılaştırıldığında daha büyük değerler elde edilmektedir. Çerçeve sistemin tamamen rijit bağliyken kat seviyesi boyunca bulunan maksimum yerdeğiştirme değerleri için yarı rijit bağli olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit (%90) ve daha zayıf bağli (%75) iken oluşan farka göre sırasıyla %10.92 ve %74.97 oranlarında değişmektedir.

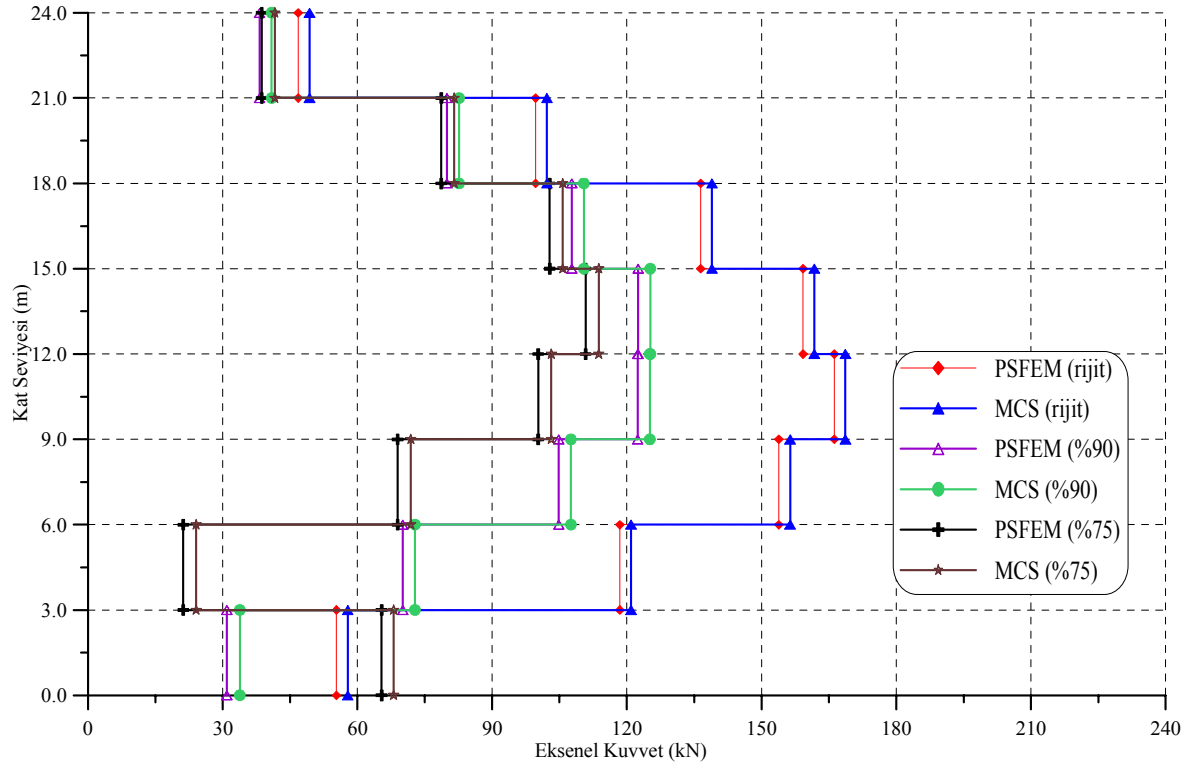


Şekil 86. Yarı rijit bağli kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmeleri

### 3.3.1.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Yarı rijit bağli kompozit kesitli çerçeve sistemin ikinci aksındaki kolonlar boyunca PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum eksenel kuvvetler Şekil 87'de yer almaktadır. Sistemin tamamen rijit olması durumunda elde edilen değerler kısmi bağli iken bulunan eksenel kuvvet değerlerinden daha büyük olmaktadır. Bu farklar bağlantı rijitliğindeki azalma ile artmaktadır. Rijit bağli olma durumuna göre %90 ve %75 bağli olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %28.19 ve %36.08 oranında küçük olmaktadır. Şekil 87'de ayrıca PSFEM ve MCS yöntemlerinin birbirine yakınlığı karşılaştırılmaktadır. Şekilden, her iki yöntemden elde edilen stokastik eksenel kuvvet değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. PSFEM'den yarı rijit bağli

kompozit çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %2.54, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.93 ve %4.20 oranında bir farklılık göstermektedir.

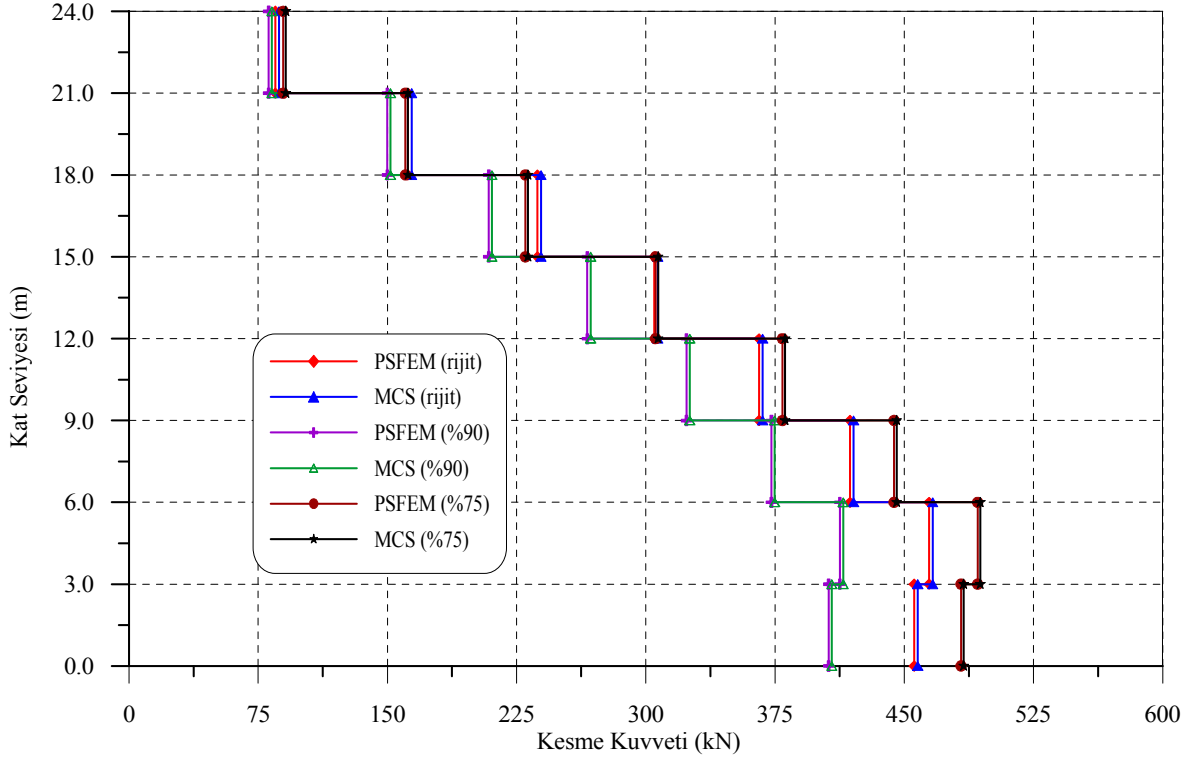


Şekil 87. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Bu örnek için son karşılaştırma (Şekil 88-89) farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre kat seviyesi boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri için yapılmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin %75 bağlı olması durumunda, en küçük değerler ise sistemin nispeten rijit bağlı olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre %90 ve %75 bağlı olma durumlarından elde edilen ortalama fark sırasıyla %10.15 ve %3.91 olmaktadır. Eğilme momentleri için ise bu farklar sırasıyla %12.52 ve %6.60 düzeyindedir. Şekil 88-89'da çerçeve sistem için PSFEM ve MCS yöntemleri mukayese edilmektedir. Şekillerden görüleceği üzere, her iki yöntemden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. PSFEM ile yarı rijit bağlı kompozit çerçeve sistemin kat seviyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda

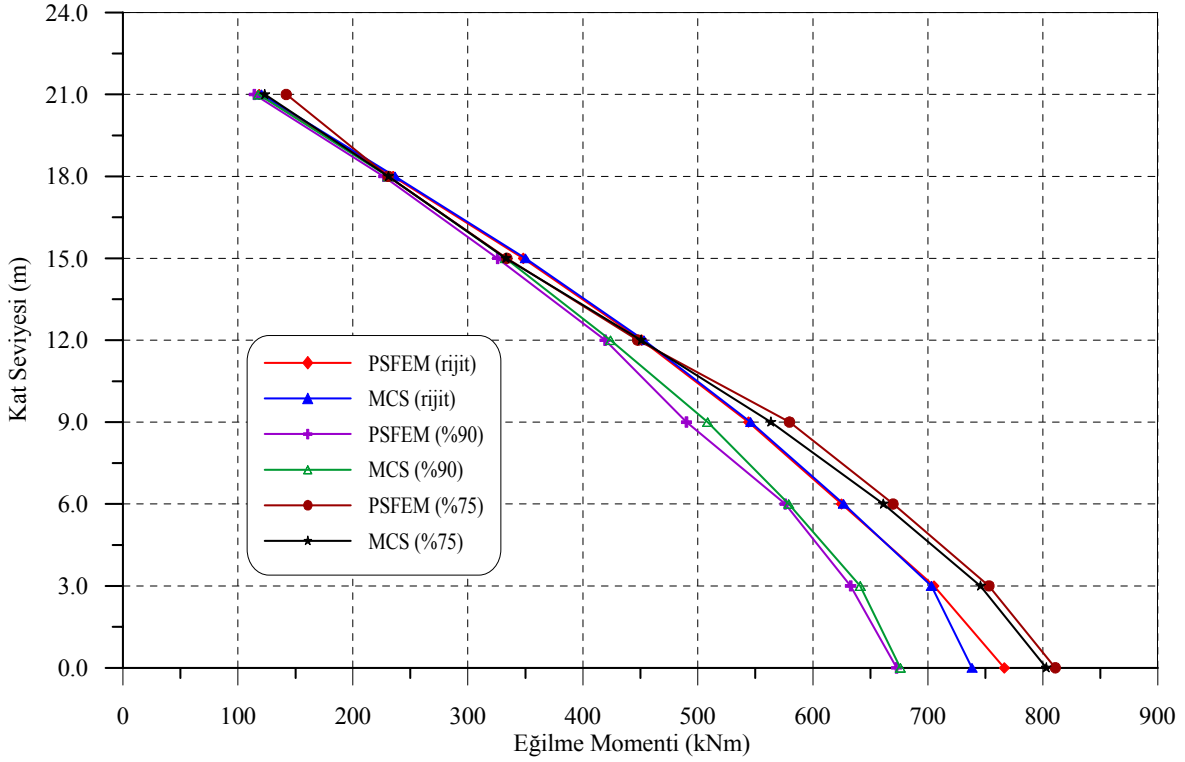


ortalama %0.90, nispeten rijit ve daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.90 ve %0.63 oranında bir farklılık göstermektedir. Kolon-kiriş bağlantılarının yarı rijit olması durumunda sistemin kat seviyesi boyunca PSFEM'den elde edilen eğilme momenti değerleri için bu farklar sırasıyla %1.02, %1.73 ve %2.78 olmaktadır.



Şekil 88. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri

Tamamen rijit ve yarı rijit bağlantılara sahip kompozit kesitli çerçeve sistemin malzeme ve geometrik özelliklerinin yanı sıra yay sabitinin de belirsiz olması durumlarında elde edilen stokastik yerdeğiştirmeler ve eleman kuvvetleri ilgili şekillerde gösterilmiştir. Uygulanan deprem yükü altında yarı rijit bağlantılara sahip kompozit çerçeve sistem için, sistemin tamamen rijit olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük yerdeğiştirme değerleri ve daha küçük aksenal kuvvet değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca %75 bağlı iken daha büyük diğer durumlarda ise daha küçük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri elde edilmektedir. Burada deprem hareketinin geniş bir frekans aralığında yayıldığını ve sonuçlar üzerinde etkili olabileceğini unutmamak gerekmektedir.



Şekil 89. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli çerçeve sistemin rastgele değişken başlangıç rijitliği için yükseklik boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.3.2. Yarı Rijit Bağlı Kompozit Kesitli Köprü Sisteminin PSFEM ve MCS Yöntemlerine Göre Analizi

“2. Yapılan Çalışmalar” bölümünde boyutları ve kesit özellikleri verilen yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin (Şekil 29), malzeme özelliklerinin, geometrik özelliklerinin ve başlangıç rijitliğinin rastgele değişken olması durumları için perturbasyon esaslı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (PSFEM) ve Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine göre stokastik dinamik çözümleri gerçekleştirilmektedir. Seçilen köprü sisteminin stokastik dinamik analizleri sırasında kirişlerinin rijit ve yarı rijit bağlı olduğu kabul edilmektedir. Kiriş-kolon bağlantılarında iki türlü yarı rijit bağlı olma durumu dikkate alınmaktadır. Bu bağlantılardan ilkinin nispeten rijit (%90 bağlı) ikincisinin ise daha zayıf (%75 bağlı) bağlı olduğu dikkate alınarak yerdeğiştirmeleri ve kesit tesirleri değerleri elde edilmektedir. Analizlerde yer hareketi olarak 1999 Kocaeli depreminin YPT330 bileşeni dikkate alınmaktadır. Bu depreme ait grafik Bölüm 2.2.1.1.’de verilmektedir.

### 3.3.2.1. Elastisite Modülünün Rastgele Değişken Olması Durumu

#### 3.3.2.1.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

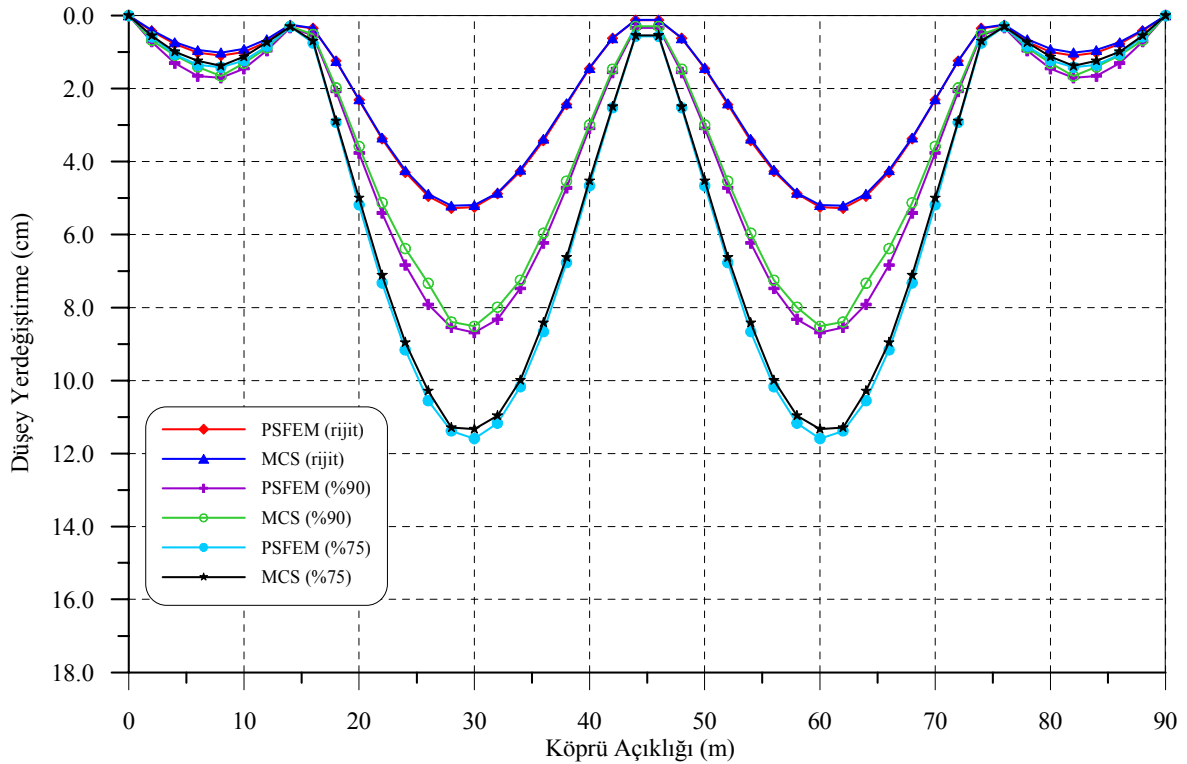
Elastisite modülünü rastgele değişken kabul ederek PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucu elde edilen doğal frekanslar tam rijit ve yarı rijit bağlantılar olması durumları için Tablo 24’te verilmektedir. Rijit bağlı sistemde frekans değerleri en yüksek olurken, bağlantılardaki rijitliğin azalmasıyla doğal frekans değerleri de azalmaktadır. Kompozit kesitli köprü sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağıllıkta frekans değerlerinde oluşan ortalama fark sırasıyla %5.46 ve %10.19 oranında azalmaktadır. Tablo 24’te PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olarak değiştiği görülmektedir. Rastgele değişken elastisite modülü için PSFEM’den bulunan frekans değerleri MCS yöntemine göre bulunan değerlerden rijit bağlı olması durumuna göre ortalama %0.45, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %0.94 ve %0.44 oranlarında bir fark göstermektedir. İki yöntem birbirine yakın sonuçlar verdiği için stokastik dinamik analizde PSFEM’in MCS yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu öne çıkmaktadır.

Tablo 24. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	1.341	1.263	1.177	1.336	1.258	1.172
2	1.773	1.543	1.332	1.764	1.536	1.327
3	3.900	3.875	3.834	3.884	3.358	3.817
4	4.333	4.165	4.017	4.314	4.147	3.999
5	5.011	4.617	4.290	4.988	4.596	4.272
6	5.453	4.826	4.375	5.426	4.803	4.357
7	5.844	5.827	5.801	5.820	5.803	5.777
8	8.869	8.584	8.355	8.830	8.547	8.317
9	9.933	9.184	8.693	9.882	9.139	8.653
10	14.504	14.382	14.124	14.439	14.312	14.044

### 3.3.2.1.2. Yerdeşistirmelerin Karşılaştırılması

şekil 90'da sadece elastisite modülünün belirsiz olması durumu için kısmi bağlı kompozit köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğistirme değerleri sunulmaktadır. Sistemin rijit ve yarı rijit bağlı (%90 ve %75 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş düşey yerdeğistirme değerleri karşılaştırılmaktadır.



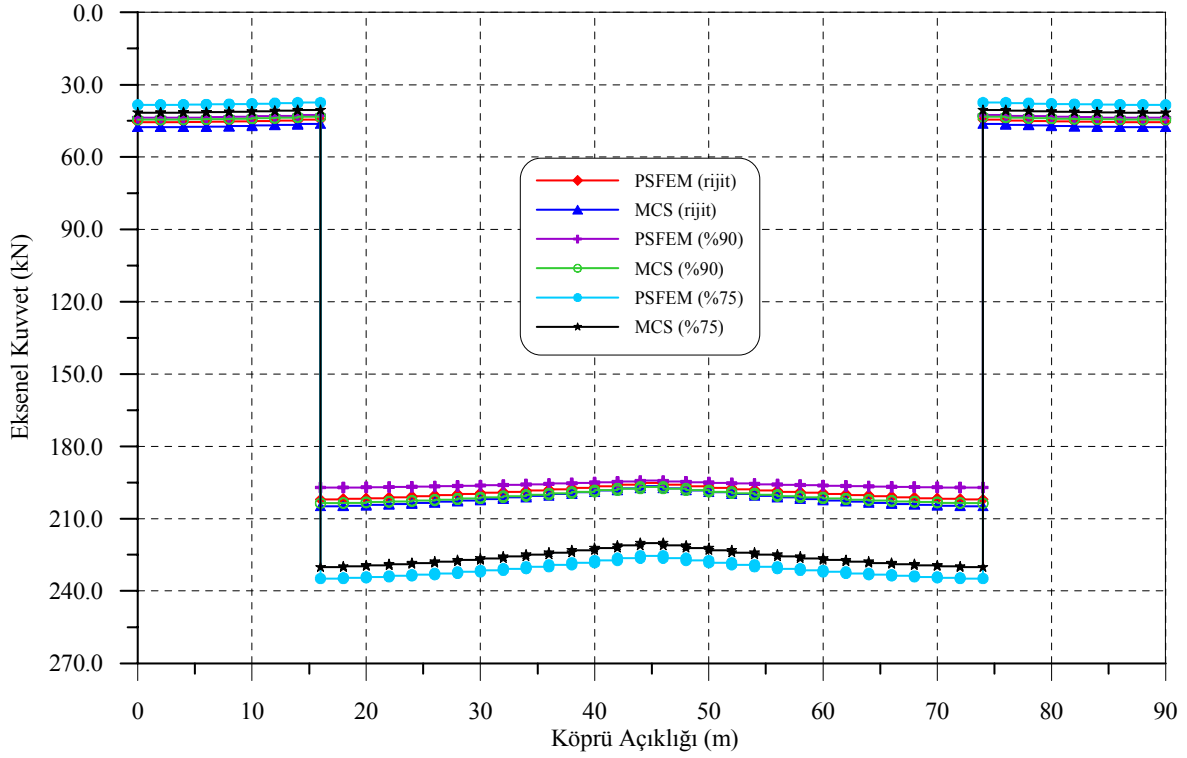
şekil 90. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğistirmeleri

Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğistirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğistirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için paralel bir durum sergilemektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğistirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %3.30, nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %4.88 ve %4.12 oranında bir farklılık göstermektedir. Bağlantı esnekliğindeki azalmayla köprü kirişindeki yerdeğistirme değerleri artmaktadır. Kompozit köprü sisteminin tamamen rijit bağlı olması durumunda

köprü tabliyesi orta kısmında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 5.30 cm iken MCS yönteminde bu değer 5.20 cm'dir. %90 ve %75 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 8.68 cm ve 11.58 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 8.52 cm ve 11.32 cm düşey yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Şekil 90'dan görüleceği üzere köprü için PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Köprü sisteminin açıklığı boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri göz önüne alındığında, sistemin tamamen rijit bağlı olması durumuna göre elde edilen yerdeğiştirmeler nispeten rijit (%90) ve zayıf bağlı (%75) olması durumlarından elde edilen yerdeğiştirmelere göre sırasıyla %69.75 ve %114.20 oranlarında farklılık arz etmektedir.

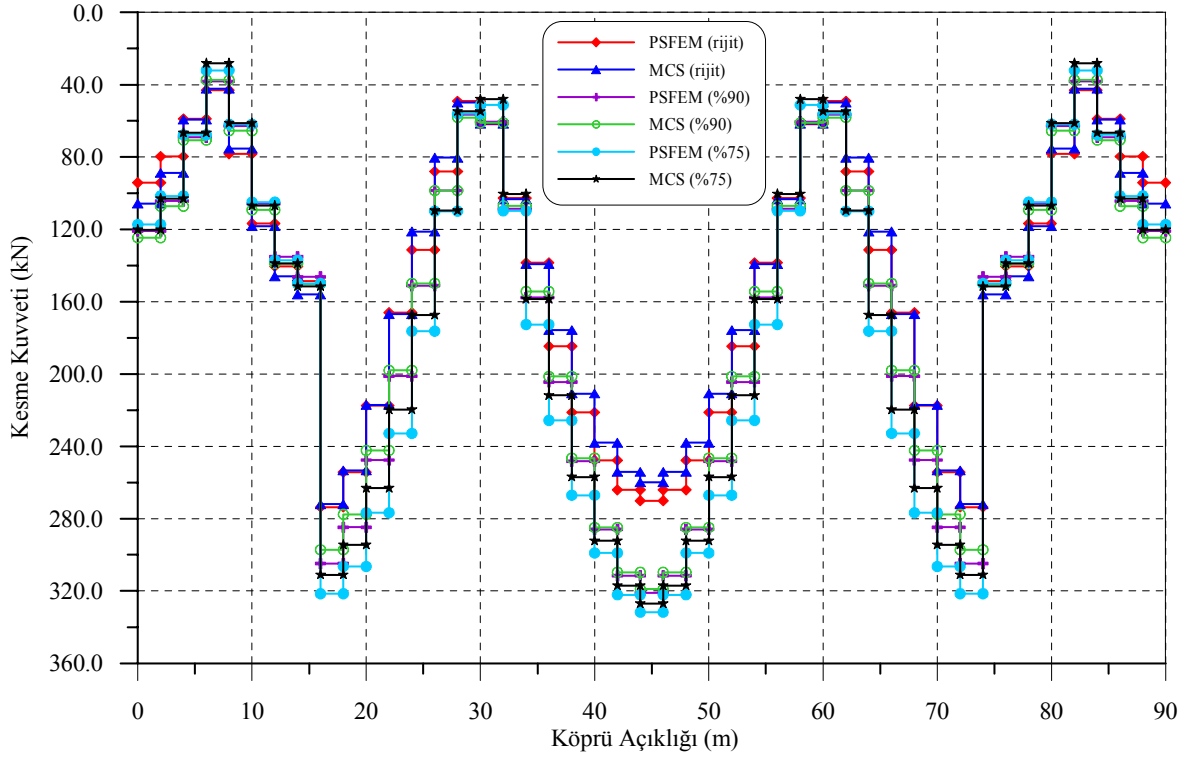
### **3.3.2.1.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması**

Şekil 91'de farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum aksenal kuvvetler gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, PSFEM için en büyük değerler %75 bağlı olması durumunda oluşurken, MCS yönteminde de bu sonuca benzer değerler elde edilmiştir. Rijit bağlı olma durumuna göre %90 ve %75 bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %2.52 ve %15.95 olmaktadır. Burada deprem hareketinin geniş bir frekans aralığında yayıldığını ve sonuçlar üzerinde etkili olabileceğini unutmamak gerekmektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen aksenal kuvvet değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %2.29, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %2.25 ve %4.16 oranında bir farklılık göstermektedir.

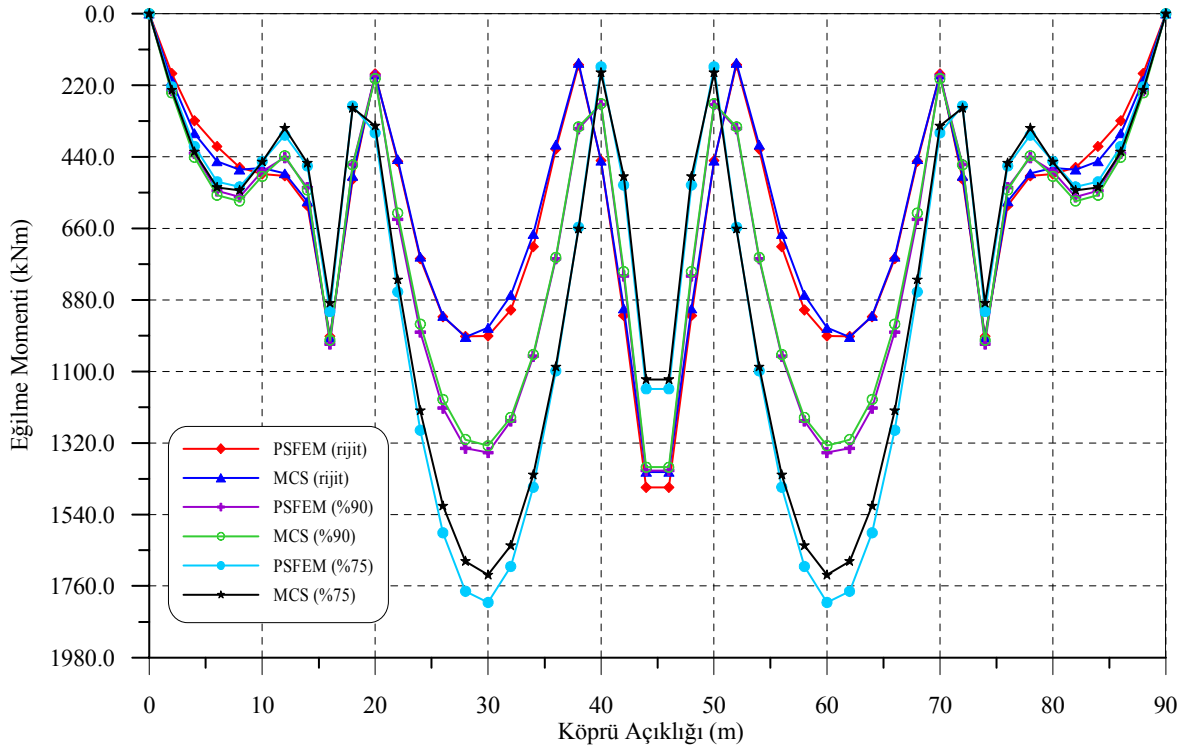


Şekil 91. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri

Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprünün açıklığı boyunca elde edilen maksimum kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri Şekil 92-93'te verilmektedir. Köprü tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri kirişler kolonlara %75 rijitlikle bağlı iken en büyük olmakta ve bunları sırasıyla %90 bağlı ve tamamen rijit bağlı olması durumunda elde edilen kuvvet tesirleri izlemektedir. Sistemin tamamen rijit olması durumunda köprü tabliyesinin orta kısmında elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri köprünün kısmi bağlı olması durumlarında elde edilen kesme kuvveti değerlerine oranla sırasıyla %18.87 ve %22.83 daha küçük olmaktadır. Eğilme momenti değerleri için ise bu fark sırasıyla %34.63 ve %82.66 daha küçük olmaktadır. PSFEM ve MCS yöntemleri için elde edilen değerlere bakıldığında ise genelde her iki yöntemin değerleri birbirine yakın olarak değişmektedir. PSFEM ile yarı rijit bağlı kompozit köprü sisteminin açıklığı boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, rijit bağlı olması durumunda MCS yöntemine göre ortalama %3.55, nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.93 ve %3.07 oranında bir farklılık göstermektedir. Eğilme momenti değerleri için ise bu farklar sırasıyla %3.35, %1.83 ve %3.76 oranında ortaya çıkmaktadır.



Şekil 92. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 93. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken elastisite modülü için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.3.2.2. Enkesit Alanının Rastgele Değişken Olması Durumu

#### 3.3.2.2.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli köprü sisteminin tamamen rijit ve yarı rijit bağlantılar olması durumlarında, enkesit alanının rastgele değiştiği kabulüyle gerçekleştirilen PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen stokastik frekans değerleri Tablo 25'te karşılaştırılmaktadır. Rijit bağlı sistemde frekans değerleri en yüksek değerlerini alırken, bağlantılardaki rijitliğin azalmasıyla doğal frekanslar da azalmaktadır. Kompozit kesitli köprü sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılıkta oluşan ortalama frekans değerleri sırasıyla %7.15 ve %10.18 oranında azalmaktadır. Tablo 25'te PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. Rastgele değişken enkesit alanı için PSFEM'den bulunan frekans değerlerinin MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama farkı %0.19, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %0.29 ve %0.21 düzeyinde olmaktadır. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi durumunda, doğal frekans değerinin en büyük olduğu onuncu moddaki değerler dikkate alındığında rijit ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen frekans değerinin elastisite modülü için elde edilen değerlere göre sırasıyla %0.97, %0.83 ve %1.04 oranlarında büyük olduğu hesap edilmiştir.

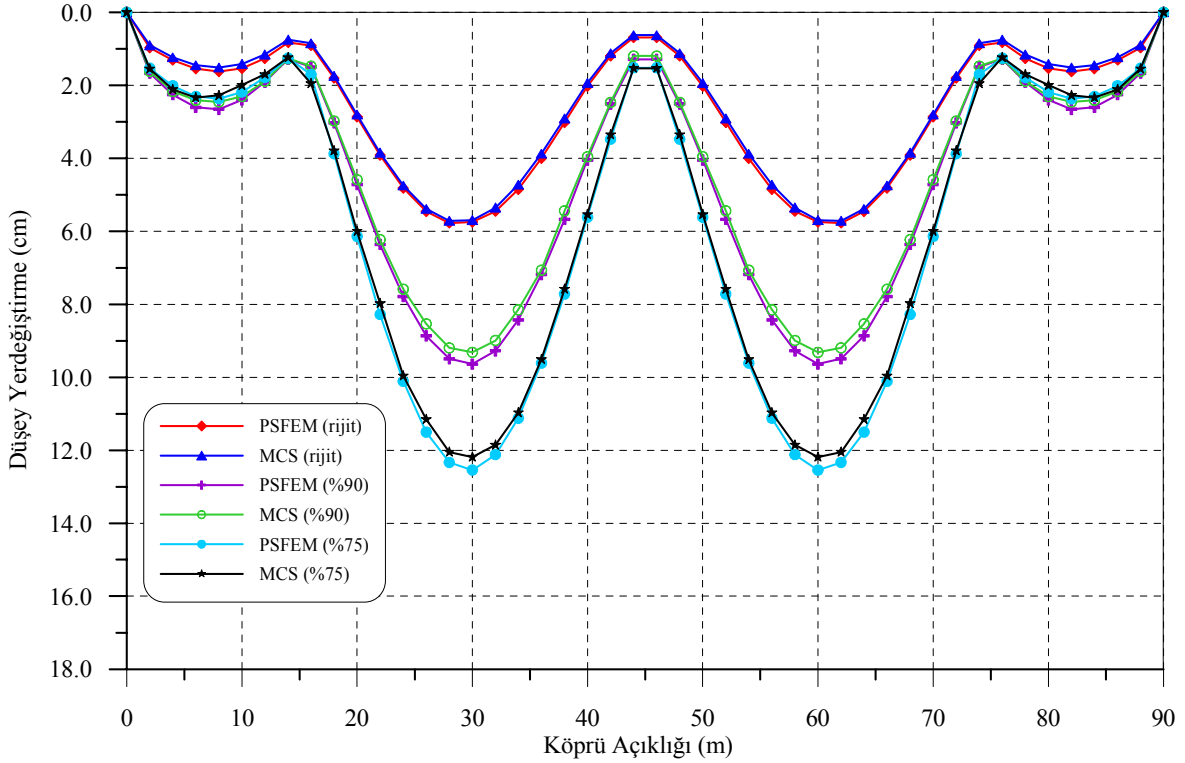
Tablo 25. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için doğal frekans değerleri

Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	1.356	1.273	1.190	1.352	1.268	1.186
2	1.792	1.551	1.347	1.787	1.546	1.343
3	3.931	3.398	3.868	3.929	3.368	3.864
4	4.373	4.165	4.057	4.367	4.157	4.050
5	5.049	4.637	4.345	5.043	4.616	4.324
6	5.456	4.843	4.424	5.454	4.836	4.410
7	5.898	5.831	5.803	5.893	5.824	5.799
8	8.969	8.652	8.430	8.938	8.645	8.420
9	10.055	9.244	8.777	10.010	9.239	8.761
10	14.597	14.394	14.198	14.580	14.352	14.191



### 3.3.2.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Kompozit kesitli çerçeve sistemin rijit ve yarı rijit bağlı (%90 ve %75 bağlı) ve aynı zamanda enkesit alanının belirsiz olması durumunda PSFEM ve MCS yöntemleriyle elde edilmiş köprü açıklığı boyunca en büyük düşey yerdeğiştirme değerleri Şekil 94'te incelenmektedir.



Şekil 94. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri

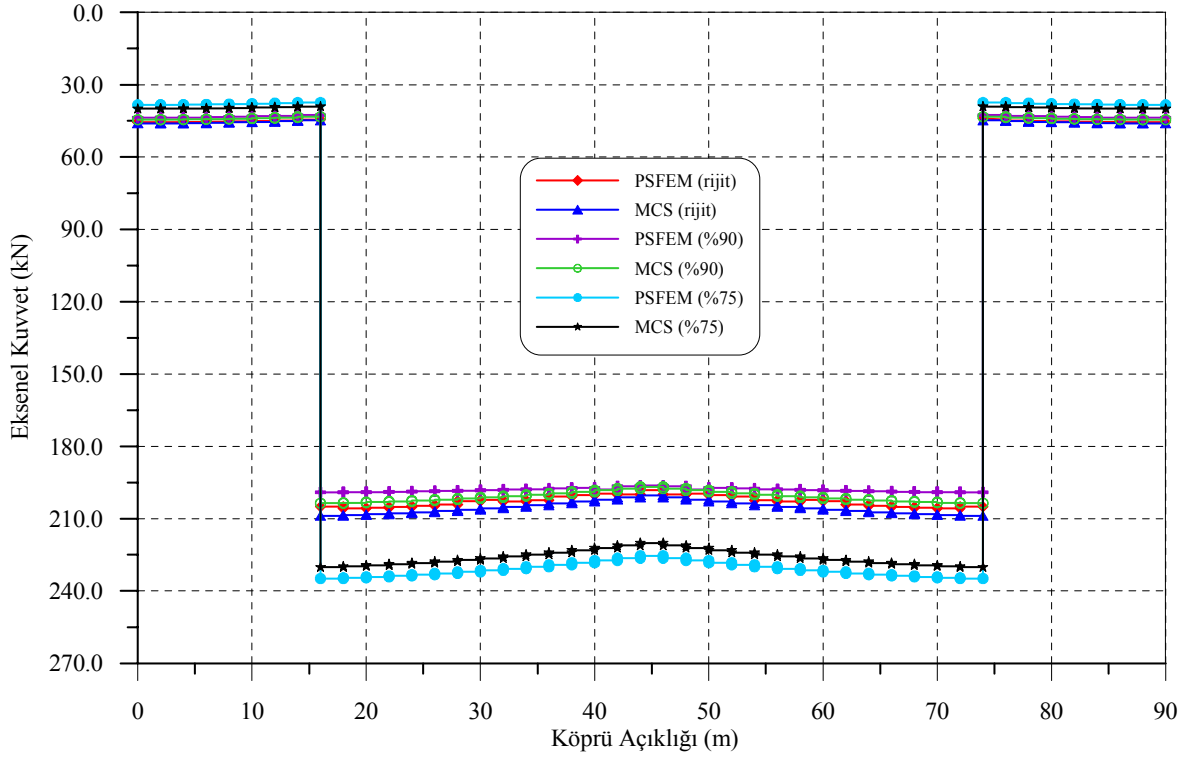
Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.88, nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %3.33 ve %3.16 oranında büyük olmaktadır. Köprü sisteminin rijit bağlı olması durumunda açıklık orta kısmında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 5.78 cm iken MCS yönteminde bu değer 5.71 cm düzeyinde kalmaktadır. %90 ve %75 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 9.64 cm ve 12.54 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 9.31 cm ve 12.18 cm yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Kompozit kesitli köprüünün yarı rijit bağlı olması durumlarında elde edilen

düsey yerdeğiştirme değerleri tamamen rijit bağlı olması durumuyla karşılaştırıldığında daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir (Şekil 94). Bu farklar bağlantı rijitliğindeki azalmayla (%75 bağlı) artmaktadır. Köprü kiriş ve kolonları tamamen rijit bağlıyken yerdeğiştirme değeri için yarı rijit bağlı olması durumlarında oluşan fark, nispeten rijit (%90) ve daha zayıf bağlı (%75) olması durumları için sırasıyla %68.11 ve %98.43 düzeyinde olmaktadır.

Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda elastisite modülünün rastgele seçildiği duruma göre daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Enkesit alanının stokastik olarak değişmesi halinde, yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu köprü açıklığı orta noktasındaki değerler dikkate alındığında rijit ve yarı rijit bağlantılar için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülü için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %8.65, %9.86 ve %7.66 daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

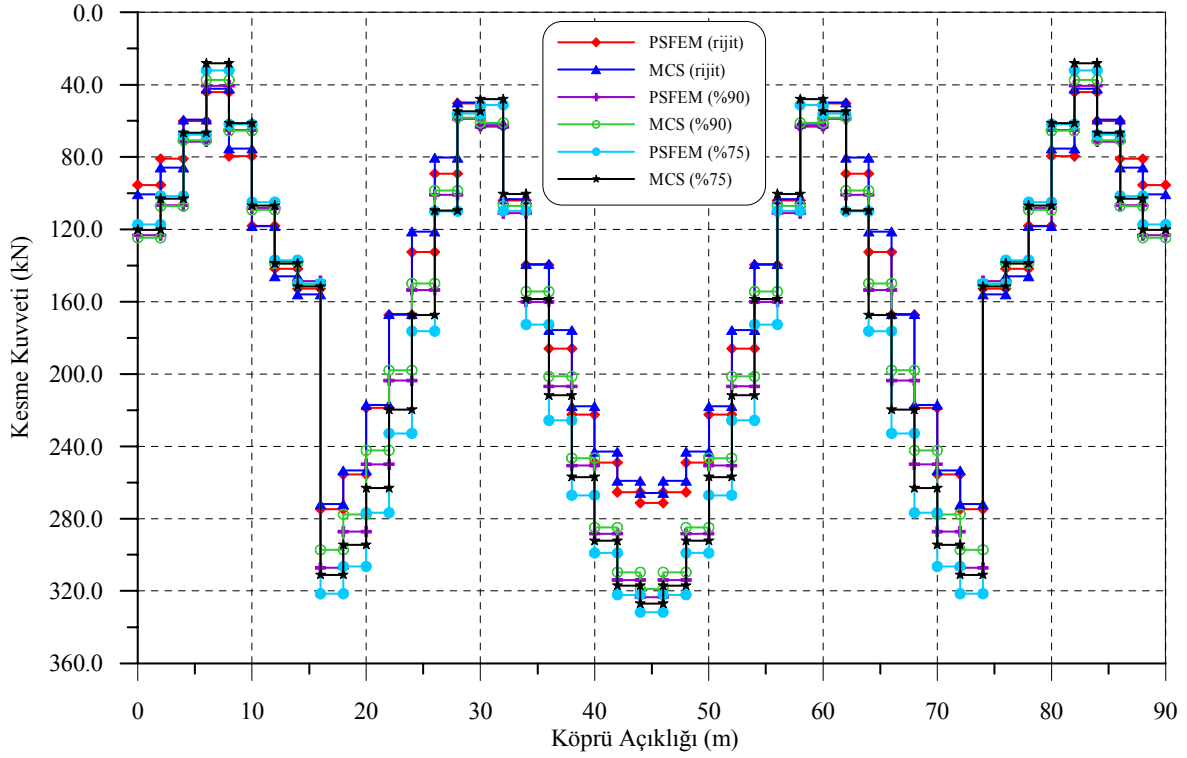
### **3.3.2.2.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması**

Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprünün açıklığı boyunca PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen maksimum aksenal kuvvet değerleri Şekil 95'te yer almaktadır. Şekilden de görüleceği üzere, PSFEM ve MCS yöntemleri için en büyük değerler sistem %75 bağlı olduğu durumda oluşurken, rijit ve %90 bağlı olması halinde bulunan aksenal kuvvet değerleri ise birbirine daha yakın bir görüntü sergilemektedirler. Rijit bağlı olma durumuna göre %90 ve %75 bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %2.52 ve %15.95 olmaktadır. Şekil 95'te ayrıca PSFEM ve MCS yöntemlerinin birbirine yakınlığı karşılaştırılmaktadır. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin tabliyesi boyunca PSFEM'den elde edilen aksenal kuvvet değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.29, nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %2.25 ve %4.16 oranında bir farklılık göstermektedir.

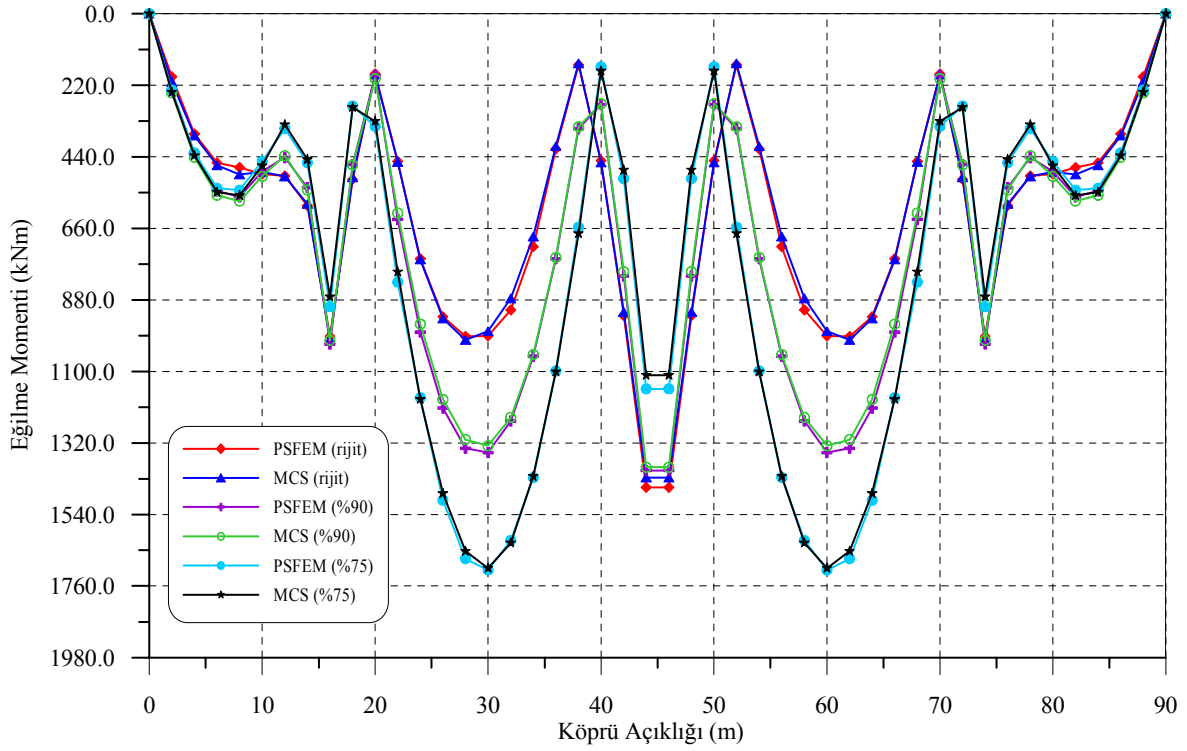


Şekil 95. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum aksenal kuvvetleri

Şekil 96-97'de farklı bağlantı türleri için PSFEM ve MCS yöntemlerine göre kompozit kesitli köprü sisteminin açıklığı boyunca elde edilen maksimum kesme ve eğilme momentleri karşılaştırılmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi en büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sistemin %75 bağlı olması durumunda, en küçük değerler ise rijit olması halinde oluşmaktadır. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %14.01 ve %19.50 olmaktadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%90 bağlı) ve daha zayıf bağlı (%75 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama fark %27.93 ve %62.15 olmaktadır. Şekillerden de görüleceği üzere, PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti grafikleri birbirine yakın değerler almaktadır. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %3.07, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %2.29 ve %4.07 oranında bir farklılık göstermektedir. Eğilme momenti değerleri için ise bu değişim, tamamen rijit iken MCS yöntemine göre ortalama %1.96, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %1.83 ve %2.48 düzeyinde olmaktadır.



Şekil 96. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 97. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken enkesit alanı için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

### 3.3.2.3. Başlangıç Rijitliğinin Rastgele Değişken Olması Durumu

#### 3.3.2.3.1. Frekans Değerlerinin Karşılaştırılması

Başlangıç rijitliğini rastgele değişken kabul ederek PSFEM ve MCS yöntemleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonuçlarından elde edilen doğal frekanslar tam rijit ve yarı rijit bağlantılar olması durumları için Tablo 24’te verilmektedir. Rijit bağlı sistemde frekans değerleri en yüksek değerlerini alırken, bağlantılardaki rijitliğin azalmasıyla doğal frekans değerleri de azalmaktadır. Kompozit kesitli köprü sistem için rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılıkta oluşan ortalama fark sırasıyla %5.46 ve %10.19 oranında azalmaktadır. Ayrıca PSFEM ve MCS yönteminden elde edilen frekans değerlerinin birbirine oldukça yakın olarak değiştiği Tablo 24’te görülmektedir. Rastgele değişken başlangıç rijitliği için PSFEM’den bulunan frekans değerlerinin MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama farkı %0.45, nispeten rijit ve daha zayıf bağlantılar olması halinde ise sırasıyla %0.94 ve %0.44 düzeyinde olmaktadır. İki yöntem birbirine yakın sonuçlar verdiği için stokastik dinamik analizde PSFEM’in MCS yerine kullanılabilir bir yöntem olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 26. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için doğal frekans değerleri

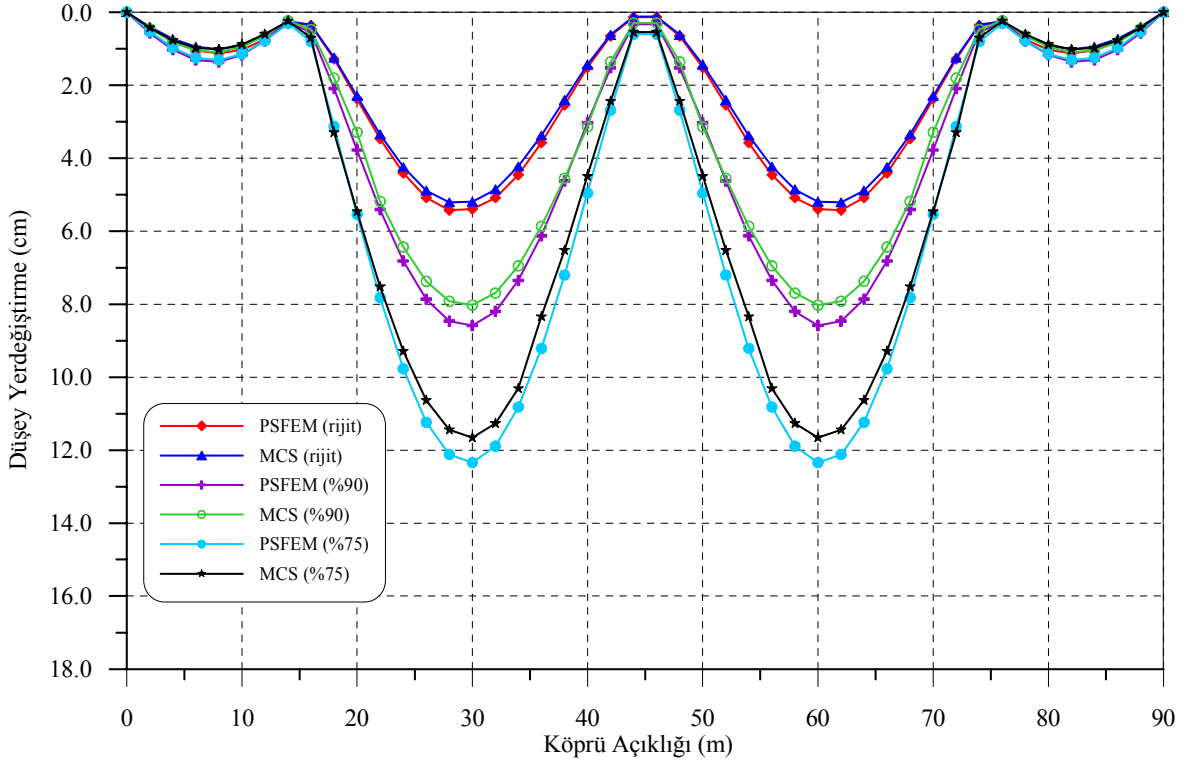
Mod Sayısı	Doğal Frekanslar (Hz)					
	PSFEM			MCS		
	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı	Rijit	%90 bağlı	%75 bağlı
1	1.341	1.263	1.177	1.336	1.258	1.172
2	1.773	1.543	1.332	1.764	1.536	1.327
3	3.900	3.875	3.834	3.884	3.358	3.817
4	4.333	4.165	4.017	4.314	4.147	3.999
5	5.011	4.617	4.290	4.988	4.596	4.272
6	5.453	4.826	4.375	5.426	4.803	4.357
7	5.844	5.827	5.801	5.820	5.803	5.777
8	8.869	8.584	8.355	8.830	8.547	8.317
9	9.933	9.184	8.693	9.882	9.139	8.653
10	14.504	14.382	14.124	14.439	14.312	14.044

#### 3.3.2.3.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

Şekil 98’de sadece başlangıç rijitliğinin belirsiz olması durumu için kısmi bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme

değerleri sunulmaktadır. Sistemin rijit ve yarı rijit bağlı (%90 ve %75 bağlı) olması durumlarında, PSFEM ve MCS yöntemleriyle hesaplanan düşey yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılmaktadır. Buna göre, perturbasyon yönteminden elde edilen yerdeğiştirmeler genel itibariyle MCS yöntemlerinden elde edilen yerdeğiştirme değerlerine, bütün bağlantı türleri için bir yakınlık sergilemektedir. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %2.35, nispeten rijit ve biraz daha zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla, %3.82 ve %4.03 oranında bir farklılık göstermektedir. Bağlantı esnekliğindeki azalma ile beraber köprü kirişindeki yerdeğiştirme değerleri artmaktadır. Kompozit köprü sisteminin tamamen rijit bağlı olması durumunda köprü tabliyesinin orta kısmında oluşan en büyük yerdeğiştirme değerleri, PSFEM için yaklaşık 5.42 cm iken MCS yönteminde bu değer 5.25 cm olmaktadır. %90 ve %75 bağlı olması durumunda PSFEM'den sırasıyla 8.58 cm ve 12.34 cm, MCS yönteminden ise sırasıyla 8.12 cm ve 11.87 cm yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Şekil 98'den görüleceği üzere köprü için PSFEM yöntemi ile gerçekleştirilen stokastik dinamik analiz sonucunda daha büyük yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Köprü sisteminin tamamen rijit bağlı olması durumunda açıklığı boyunca elde edilen düşey yerdeğiştirme değerleri nispeten rijit (%90) ve zayıf bağlı (%75) olması durumlarında elde edilen yerdeğiştirme değerlerine göre sırasıyla %55.57 ve %118.06 oranlarında fark ortaya koymaktadır.

Başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda elastisite modülü ve enkesit alanının rastgele değiştiği kabulüne göre daha büyük düşey yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir. Dönel yay sabitinin belirsiz olarak değişmesi halinde, yerdeğiştirme değerinin en büyük olduğu köprü açıklığı orta noktasındaki değerler dikkate alındığında rijit ve yarı rijit bağlantılardan %75 bağlı olması durumu için elde edilen yerdeğiştirme değerinin elastisite modülünün rastgele değişmesi durumu için elde edilen yerdeğiştirme değerine oranla sırasıyla %2.58 ve %6.16 daha büyük, %90 bağlılık yüzdesi için ise %1.17 daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Enkesit alanının rastgele değişken olması durumunda ise bu farklar rijit ve yarı rijit bağlantılar için sırasıyla %6.46, %12.35 ve %1.62 daha küçük olarak ortaya çıkmaktadır.

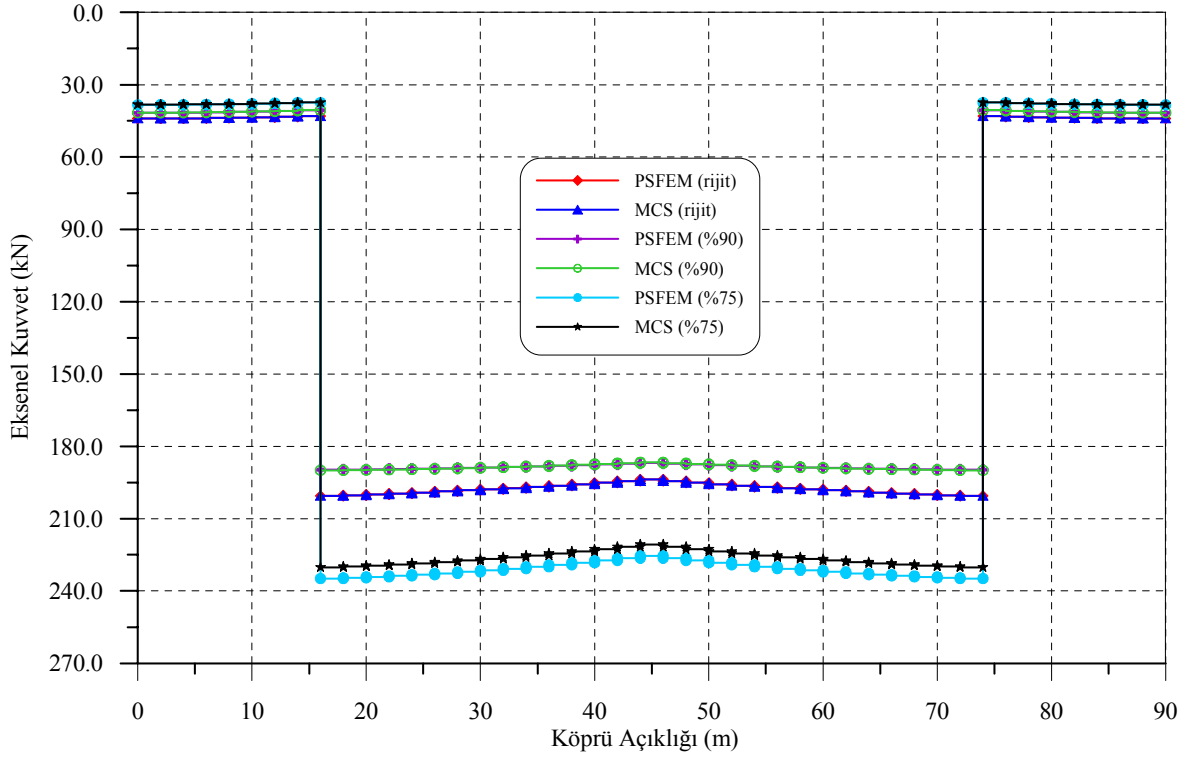


Şekil 98. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmeleri

### 3.3.2.3.3. Kesit Tesirlerinin Karşılaştırılması

Bu örnek için son karşılaştırmalar başlangıç rijitliğinin stokastik olarak değişmesi durumunda oluşan en büyük aksenal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerine ilişkin grafiklerin sistemin tamamen rijit, %90 ve %75 bağlı olması durumları için gerçekleştirilmektedir.

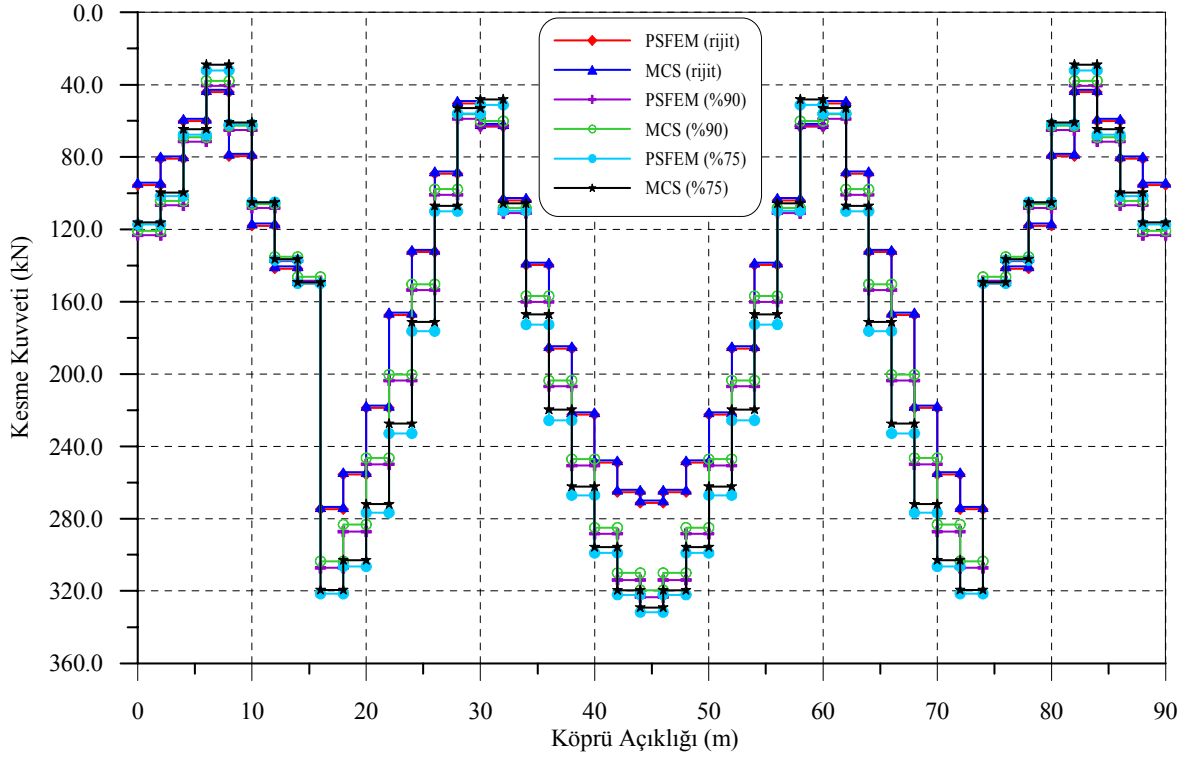
Şekil 99'da yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü örneği için diğer örneklere benzer bir karşılaştırma yapılmakta ve burada da yine elastisite modülü ve enkesit alanının stokastik değişimine benzer bir durum elde edilmektedir. Ancak daha öncede belirtildiği gibi burada deprem hareketinin sonuçlar üzerinde etkisi bulunmaktadır. Köprü tabliyesinde sistemin rijit bağlı olması durumuna göre %90 ve %75 bağlılık yüzdesi için oluşan ortalama farklar sırasıyla %4.91 ve %15.49 şeklindedir. MCS yöntemine göre rijit ve yarı rijit bağlantılar olması durumlarında aksenal kuvvetler için PSFEM ile aralarında oluşan ortalama farklar ise sırasıyla %0, %0.10 ve %1.43 düzeyinde olmaktadır. Verilen oranlardan her iki yöntemin sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



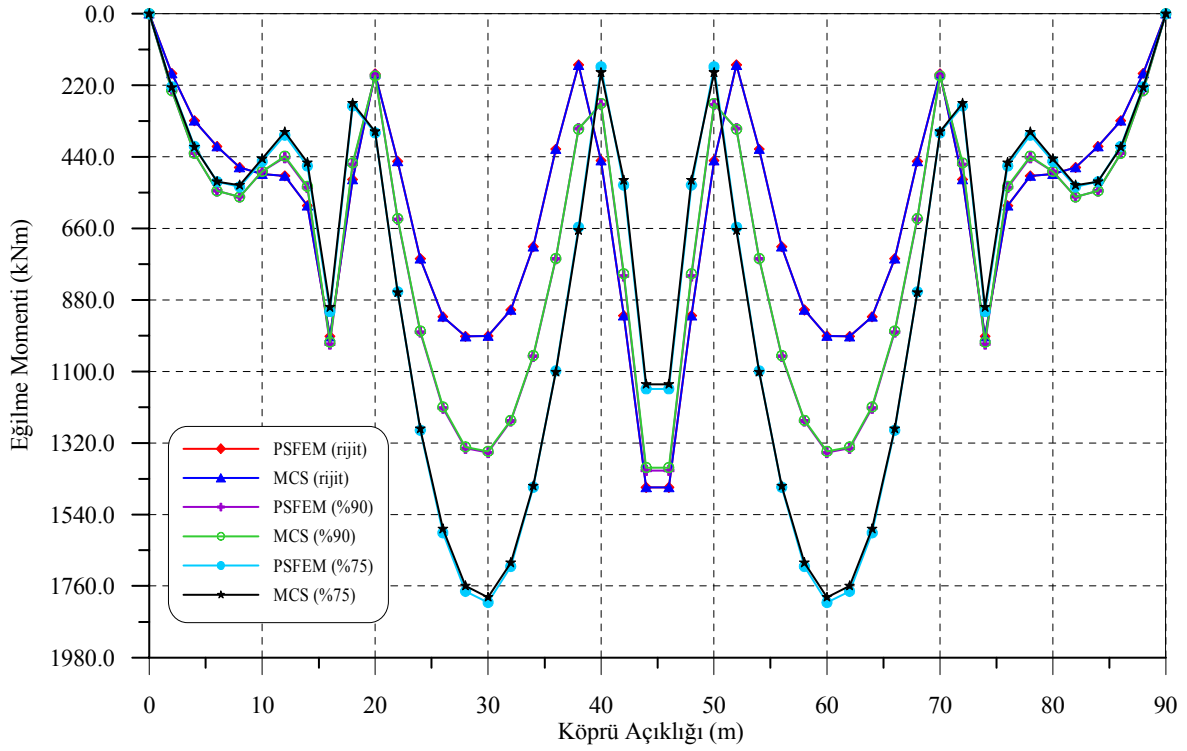
Şekil 99. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eksenel kuvvetleri

Tabliyede oluşan kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri Şekil 100-101'de incelenmektedir. Kesme kuvveti değerlerinde, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit ve zayıf bağlı olma durumlarında elde edilen ortalama fark sırasıyla %13.93 ve %20.41 olmaktadır. Eğilme momentleri için ise, rijit bağlı olma durumuna göre nispeten rijit (%90 bağlı) ve biraz daha zayıf bağlı (%75 bağlı) olma durumlarında elde edilen ortalama farklar sırasıyla %29.50 ve %65.88'dir. Şekillerden de görüleceği üzere, PSFEM ve MCS yöntemlerinden elde edilen stokastik kesme kuvveti ve eğilme momenti grafikleri birbirine oldukça yakın değerler almaktadır. Perturbasyon yöntemiyle yarı rijit bağlı köprü sisteminin tabliyesi boyunca elde edilen kesme kuvveti değerleri, MCS yöntemine göre rijit bağlı olması durumunda ortalama %1.19, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %2.29 ve %4.07 oranında bir farklılık göstermektedir. Eğilme momenti değerleri için ise bu değişim, tamamen rijit iken MCS yöntemiyle fark oluşturmazken, nispeten rijit ve zayıf bağlı olması durumlarında ise sırasıyla %0.43 ve %1.55 düzeyinde küçük farklar ortaya koymaktadır. Ayrıca her iki yöntemin stokastik dinamik sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.





Şekil 100. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum kesme kuvvetleri



Şekil 101. Yarı rijit bağlı kompozit kesitli köprü sisteminin rastgele değişken başlangıç rijitliği için tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentleri

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada belirsiz malzeme, geometri ve bağlantı rijitliği özelliklerine sahip farklı türdeki yapı sistemlerinin stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle stokastik dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, belirsizlik durumlarını da dikkate alarak yapıların olasılıklı analizi için geliştirilen en yaygın iki yöntemin PSFEM ve MCS yöntemleri olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, malzeme, geometri ve bağlantı rijitliği özelliklerinin rastgele olduğu kabulüyle, farklı yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizleri bu iki yöntemle göre gerçekleştirilmiş olup daha sonra her iki yöntemin sonuçları birbiriyle mukayese edilmiştir.

SFEM'in dinamik analiz uygulamalarını göstermek amacıyla deprem yükü altında iki ve üç boyutlu basit ve yarı karmaşık çerçeve sistemlere ve daha kompleks köprü modellerine bu yöntem uygulanmış ve analizler sonucunda malzeme ve geometrik özelliklerin rastgele olması durumunda frekanslar, yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri elde edilerek, sonuçlar MCS yönteminden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kompozit elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin, stokastik dinamik analizi geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece son zamanlarda kullanım alanı oldukça yaygınlaşan kompozit kesitlerden oluşmuş yapı sistemlerinin rastgele değişen malzeme ve geometrik özelliklerle stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Çalışma boyunca üzerinde durulan bir diğer husus da yarı rijit bağlı sistemlerin stokastik dinamik analizi olmaktadır. Buna göre bu tür yapı birleşim noktalarını daha gerçekçi bir şekilde dikkate alarak stokastik dinamik analizini gerçekleştiren hesap yöntemini geliştirmek bu çalışmanın bir diğer amacını oluşturmaktadır.

Nihayetinde, tüm bu durumlar birleştirilerek yarı rijit bağlantılı kompozit kesitli yapı sistemlerinin üç boyutlu rijitlik matrisi elde edilmiş ve mevcut bilgisayar programına eklenerek bu tür yapı sistemlerinin stokastik analiz yöntemi geliştirilmiş olmaktadır. Deterministik veya stokastik olarak tanımlanan parametrelerle çubuk tipi elemanlardan oluşan yapı sistemlerinin dinamik analizi yapan SFEDYN (Kleiber ve Hien, 1992) bilgisayar programı temel alınarak, rastgele malzeme, geometri ve başlangıç rijitliği özellikleri için yarı rijit bağlantılı kompozit kesitli yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini gerçekleştirebilen SFEDYNCPR programı hazırlanmıştır.

Uygulama amacıyla kompozit kesitlerden oluşan çerçeve ve köprü modelleri, yarı rijit bağlantılara sahip çelik çerçeve ve köprü sistemi ve son olarak da yarı rijit bağlantılara sahip kompozit kesitlerden oluşan çerçeve ve köprü modelleri seçilmiştir. Her bir sistemin malzeme, geometri ve başlangıç rijitliği özelliklerinin rastgele değişken olması durumları için stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Malzeme özellikleri, geometrik özellikler (elastisite modülü, kütle yoğunluğu ve enkesit alanı) ve başlangıç rijitliğindeki (yay sabiti) değişim dikkate alınarak çelik veya kompozit kesitli, rijit veya yarı rijit bağlantılı yapı sistemlerin stokastik dinamik analizi sonucu bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Üç boyutlu çerçeve sistemin ve Fatih Sultan Mehmet köprüsünün PSFEM ve MCS yöntemlerine göre gerçekleştirilen stokastik dinamik analizi sonucunda elde edilen doğal frekanslar, yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu durum mevcut SFEDYN programının doğruluğunun en önemli göstergesidir.
2. Yapısal özelliklerdeki belirsizlikler doğal frekanslar, yerdeğiştirmeler ve diğer kesit tesirleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
3. Önerilen perturbasyon esaslı stokastik sonlu eleman yöntemi (PSFEM) yer hareketine maruz kalan kompozit kesitli ve yarı rijit bağlantılara sahip yapı sistemlerinin değişen malzeme ve geometrik özellikler altında stokastik dinamik analizlerini gerçekleştirmek için uygun bir yöntemdir. Önerilen algoritma Monte Carlo simülasyon (MCS) yöntemine yakın sonuçlar vermektedir.
4. MCS yöntemi diğer bütün yöntemlerin çözmekte başarısız olduğu durumları ele alan oldukça kullanışlı matematiksel bir araçtır. MCS yönteminin çok yönlü olması önemli bir özelliği iken, yapı sistemlerindeki serbestlik derecesi sayısı ve belirsiz parametrelerin sayısı arttığı durumlarda istatistiksel yakınsamaları elde etmek için CPU (işlemci) açısından bu yöntem çok ağır bir yük oluşturmakta ve bir hayli zaman almaktadır. Bu çalışmayla, PSFEM'in MCS yöntemine göre çok daha kısa zamanda belirsiz olarak değişen malzeme ve geometrik özelliklerle, yarı rijit bağlantılara sahip çelik veya kompozit kesitli yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini gerçekleştirebildiği tespit edilmiştir.
5. PSFEM ve MCS yöntemleri düşük değişim katsayıları için (%5-%15) birbirine oldukça yakın değerler verirken, bu katsayının artmasıyla (%20-%30) her iki yöntemin sonuçları birbirinden giderek uzaklaşmaktadır. Bunun sebebi de PSFEM'in rastgele değişkenlerin ortalama değerlerinden rastgele parametrelerin değişimini kullanarak bu

parametrelerin gerçek olasılıklı dağılımını hesaba dahil etmemeleridir. Ancak MCS yöntemi ise rastgele değişken girdi parametrelerinin gerçek rastgele davranışını hesaba katmaktadır.

6. Kompozit kesitli yapı sistemleri için, malzeme ve geometrik özelliklerdeki değişimin dikkate alınması durumunda frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerlerinde en büyük artışı genellikle enkesit alanındaki değişim sağlamaktadır. Kütle yoğunluğundaki değişim ise yerdeğiştirme ve eleman kesit tesirlerinin stokastik değişimi üzerinde en az etkili olmaktadır.
7. Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise sistemin büyüklük ve kompleksliğinin, MCS ve perturbasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçları önemli düzeyde etkilemediğidir. Ancak bu çalışmada seçilen her bir sistem kendi içinde değerlendirildiğinde, gerek yerdeğiştirme değerleri gerekse kesit tesiri değerlerinin en küçük olduğu yerlerde bu iki yöntemin sonuçlarında göreceli olarak bir uzaksama, en büyük değerlerin olduğu noktalarda ise göze çarpar derecede bir yakınsama söz konusu olmaktadır.
8. Yarı rijit bağlantılara sahip çelik türü yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizi sonucunda sistemlerde en büyük frekans değerlerinin sistemin tamamen rijit bağlı olduğu, en büyük yerdeğiştirme ve eksenel kuvvet değerlerinin ise kiriş ve kolonların mafsallı bağlı olduğu durumlarda elde edildiği görülmüştür. En büyük kesme kuvveti ve eğilme momenti ise birkaç özel durum hariç %50 (zayıf) bağlı olması durumunda elde edilmektedir.
9. Yarı rijit bağlantılı kompozit kesitlerden oluşan çerçeve sistemin PSFEM ve MCS yöntemlerine göre stokastik dinamik analizi sonucunda en büyük frekans değerlerinin sistem tamamen rijit bağlı iken, en büyük yerdeğiştirme, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerinin ise sistemin %75 bağlı olması durumunda elde edildiği görülmüştür. Eksenel kuvvetler için maksimum değer kolon ve kirişlerin tamamen rijit bağlı olması durumunda oluşmaktadır.
10. Sadece kirişlerin kolonlara kısmi bağlı olduğu düşünülerek tasarlanan kompozit kesitli köprü sisteminde, en büyük doğal frekans değerleri sistemin rijit bağlı olması durumunda oluşurken, en büyük düşey yerdeğiştirme, eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme momentlerinin ise %75 bağlı olması durumunda oluştuğu tespit edilmiştir.
11. Kısmi bağlantılar, yapı sistemlerinin stokastik tepkilerini özellikle güçlü yer hareketine maruz kalındığında önemli derecede etkilemekte ve performans esaslı

yapısal tasarımlarda bu tür yeni yaklaşımların dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu şekilde elde edilecek sonuçlarla yapılacak tasarımlar, klasik çözümlerle elde edilecek sonuçlarla yapılacak tasarımlara göre daha emniyetli ve ekonomik olmaktadır.

12. Yarı rijit bağlantılara sahip yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizlerinde, malzeme ve geometrik özellikler ile başlangıç rijitliğindeki değişimin dikkate alınması durumunda frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesiri değerleri üzerinde en büyük etkiyi genellikle enkesit alanındaki belirsizlik oluşturmaktadır. Elastisite modülündeki değişim ise yerdeğiştirme ve eleman kuvvetleri üzerinde diğer özelliklerin rastgele seçilmesi durumu kadar önemli bir etki oluşturmamaktadır.
13. Genel olarak deterministik analiz sonucunda daha büyük frekans, yerdeğiştirme ve kesit tesirleri elde edilmektedir. Rastgele değişen malzeme ve kesit özellikleriyle gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucunda deterministik analiz sonucunda tespit edilen değerlere oranla yaklaşık %15-20 oranında daha küçük değerler hesaplanmaktadır. Bu şekilde elde edilecek sonuçlarla yapılacak tasarımlar, deterministik çözümlerle elde edilecek sonuçlarla yapılacak tasarımlara göre daha emniyetli ve ekonomik olmaktadır.
14. Stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle kompozit kesitli çerçeve ve köprü sistemleri ve yarı rijit bağlı çelik veya kompozit yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizinde, malzeme özelliklerinden elastisite modülü ve kütle yoğunluğunun, geometrik özelliklerden enkesit alanının ve kısmi bağlı sistemlerde başlangıç rijitliğinin rastgele olarak değişmesinin yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yapı sistemlerinin analizinde belirsizliklerin dikkate alınmasının gerekliliği bir kez daha ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen en önemli bulgulara yer verildikten sonra, gelecek çalışmalara ışık tutacak birkaç öneriye değinilecek olunursa;

- 1) Bu çalışmada yapı sistemlerinin analizleri malzeme ve geometrik özelliklerinin lineer olduğu kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalar malzeme ve geometri bakımından lineer olmama durumu dikkate alınarak gerçekleştirilebilir.
- 2) Yine bu çalışmada malzeme ve geometrik özelliklerin stokastikliği dikkate alınarak stokastik dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem hareketinin stokastikliği dikkate alınarak yarı rijit bağlantılara sahip çelik veya kompozit kesitli yapı

sistemlerinin analizlerinin gerçekleştirilmesi konusu gelecek çalışmalar için önemli bir ipucu sunmaktadır.

- 3) Ayrıca bu çalışmada malzeme ve geometrik özelliklerin stokastikliği ayrı ayrı dūřunölerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bu özelliklerin hepsinin aynı anda rastgele olarak değiştiği kabulölle stokastik dinamik özöllemeler gerçekleştirilebilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Abdel-Ghaffar, A.M. ve Lawrence, I.R., 1982. Suspension Bridge Response to Multiple Support Excitations, Journal of the Engineering Mechanics Division, 108, 419-435.
- Adanur, S., 2003. Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Maruz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Adhikari, S. ve Manohar, C.S., 1999. Dynamic Analysis of Framed Structures with Statistical Uncertainties, Int. J. Numer. Meth. Engng., 44, 1157-1178.
- Allegri, G., Corradi, S. ve Marchetti, M., 2006. Stochastic Analysis of the Vibrations of an Uncertain Composite Truss for Space Applications, Composites Science and Technology, 66, 273-282.
- Antonio, C.C. ve Hoffbauer, L.N., 2007. Uncertainty Analysis Based on Sensitivity Applied to Angle-Ply Composite Structures, Reliability Engineering and System Safety, 92,1353-1362.
- Araujo, J.M. ve Awruch, A.M., 1994. On Stochastic Finite Elements for Structural Analysis, Computers and Structures, 52, 3, 461-469.
- Argyris, J., Papadrakakis, M. ve Stefanou, G., 2002. Stochastic Finite Element Analyses of Shells, Comput. Methods Appl. Mecs. Engrg., 191, 4781-4804.
- Augusti, G., Barrata, A. ve Casciati, F., 1984. Probabilistic Methods in Structural Engineering, Chapman and Hall, London, 427 s.
- Awkar, J.C. ve Lui, E.M., 1999. Seismic Analysis and Response of Multistory Semi Rigid Frames, Engineering Structures, 21, 425-441.
- Banik S.S., 2003. Dynamic analysis of structures with uncertain properties, Doktora Tezi, University of Windsor, Kanada.
- Batho, C. ve Rowen, H.C., 1934. Investigation on Beam and Stanchion Connections, 2<sup>nd</sup> Report of the Steel Structures Research Committee, HMSO.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Akköse, M., 2005. Influence of Base-Rock Characteristics on the Stochastic Dynamic Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Engineering and Structures, 27, 10, 1498-1508.
- Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Başağa, H.B. ve Çavdar, A., 2007a. Uzay Kafes Çelik Sistemlerin Stokastik Sonlu Eleman Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs, Eskişehir, 209-220.

- Bayraktar, A., Çavdar, Ö., Çavdar, A. ve Başağa H.B., 2007b. Stochastic Finite Element Analysis of Concentrically Braced Frames to Earthquake Forces, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, October 24-26, Suleyman Demirel University, Isparta-Anatlya, 383-392.
- Bhattacharyya, B. ve Chakraborty, S., 2002. NEMCS Technique for Stochastic Structural Response Sensivity, Comput. Methods Appl. Mecs. Engrg., 191, 5631-5645.
- Boyce, E.W. ve Goodwin, B.E., 1964. Random Transverse Vibration of Elastic Beams, SIAM Journal, 12, 613-629.
- Button, M.R., 1989. Numerical Techniques for Dynamic Stochastic Structural Analysis, Doktora Tezi, University of California, ABD.
- Chakraborty, S. ve Dey, S.S., 1995. Stochastic Finite Element Method for Spatial Distribution of Material Properties and External Loading, Computers and Structures, 55, 1, 41-45.
- Chakraborty, S. ve Dey, S.S., 1996. Stochastic Finite Element Simulation of Random Structure on Uncertain Foundation Under Random Loading, International Journal of Mechanical Sciences, 38, 11, 1209-1218.
- Chakraborty, S. ve Sarkar S. K., 2000. Analyses of a Curved Beam on Uncertain Elastic Foundation, Finite Element in Analyses and Design, 36, 73-82.
- Chan, S.L. ve Ho, G.W., 1994. Nonlinear Vibration Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, 120, 1075-1087.
- Chan, S.L., 1995. Dynamic Behavior of Flexible Joints and Analysis of Flexibly Connected Steel Frames, Engineering Structures, 17, 8, 542-549.
- Chaudhuri, A. ve Chakraborty, S., 2003. Reliability Evaluations of 3-D Frame Subjected to Non-Stationary Earthquake, Journal of Sound and Vibration, 259, 4, 797-808.
- Chaudhuri, A. ve Chakraborty, S., 2005. Reliability of Linear Structures with Parameter Uncertainty under Non-Stationary Earthquake, Structural Safety, 28, 231-246.
- Chen, J.J., Che, J.W., Sun, H.A., Ma, H.B. ve Cui, M.T., 2002. Probabilistic Dynamic Analysis of Truss Structures, Structural Engineering and Mechanics, 13, 2, 231-239.
- Cheng, J. ve Xiao, R., 2005. Probabilistic Free Vibration and Flutter Analyses of Suspension Bridges, Engineering Structures, 27, 10, 1509-1518.
- Chui, P.P.T. ve Chan, S.L., 1996. Transient Response of Moment-Resistant Steel Frames with Flexible and Hysteretic Joints, Journal of Constructional Steel Research, 39, 221-243.



- Chui, P.P.T. ve Chan, S.L., 1997. Vibration and Deflection Characteristics of Semi-Rigid Jointed Frames, Engineering Structures, 19, 1001-1010.
- Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A. ve Adanur, S., 2008. Perturbation Based Stochastic Finite Element Analysis of the Structural Systems with Composite Sections under Earthquake Forces, Steel and Composite Structures, 8, 2, 129-144.
- Da Silva, J.G.S., De Lima, L.R.O., Da Vellosco, P.C.G., De Andrade, S.A.L. ve De Castro, R.A., 2008. Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Portal Frames with Semi-Rigid Connections, Engineering Structures, 30, 2566–2579.
- Der Kiureghian, A., 1985. Finite Element Methods in Structural Safety Studies, Structural Safety Studies, ASCE, 112, 40-52.
- Deodatis, G., 1990. Bound on response variability of stochastic finite element system, J. Engng Mech., ASCE, 116, 3, 565-585.
- Deodatis, G., 1991. Weight Integral Method: I Stochastic Stiffness Matrix, Journal of Engineering Mechanics, 117, 8, 1851-1864.
- Deodatis, G. ve Shinouzoka, M., 1991. Weight Integral Method: II. Response Variability and Reliability, Journal of Engineering Mechanics, 117, 8, 1865-1877.
- Dissanayake, U.I., Davison, J.B. ve Burgess, I.W., 1999. Composite Beam Behavior in Braced Frames, Journal of Constructional Steel Research, 49, 3, 271-289.
- Du, S., 2000. Efficiency of Simulation-Based SFE Structural Analysis: Modelling and Solution Issues, Doktora Tezi, Baltimore University, Maryland.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1990. Stochastic Response of Suspension Bridges to Earthquake Forces, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 19, 133–52.
- El-Tawil, S., Kanno, R. ve Deierlein, G.G., 1996. Constitutive Model for Beam-Column Joints in the Analysis of Mixed Steel-Concrete Frames, Proc. of Comp. Constr. III, 9-14 Haziran, Irsee, Germany.
- Erdem, H., 1998. Yarı Rijit Bağlı Üç Boyutlu Çerçevelerin Nonlineer Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Falsone, G. ve Impollania, N., 2002. A New Approach for the Stochastic Analyses of Finite Element Modelled Structures with Uncertain Parameters, Comput. Methods Appl. Mechs. Engrg., 191, 5067-5085.
- Fang, L.X., Chan, S.L. ve Wong, Y.L., 1999. Strength Analysis of Semi-Rigid Steel-Concrete Composite Frames, Journal of Constructional Steel Research, 52, 3, 269-291.

- Ganesan, R. ve Kowda, V.K., 2005. Buckling of Composite Beam-columns with Stochastic Properties, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 24, 5, 513-543.
- Gao, L. ve Haldar, A., 1995. Safety evaluation of frames with PR connections, Journal of Structural Engineering, 121, 7, 1101-1118.
- Graham, L.L. ve Deodatis, G., 2001. Response and Eigen Value Analyses of Stochastic Finite Element Systems with Multiply Correlated Material and Geometric Properties, Probabilistic Engineering Mechanics, 16, 11-29.
- Graham, L. ve Deodatis, G., 1998. Variability Response Functions for Stochastic Plate Bending Problem, Structural Safety, 20, 167-188.
- Griffis, L.G., 1987. Motivation for and Fundamentals of Composite Action in Structures, Proceedings of the Boston Section of ASCE on Composite Construction, Boston.
- Ghanem, R.G. ve Spanos, P.D., 1991. Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach, Springer Verlag, New York, 451 s.
- Ghanem, R.G. ve Spanos, P.D., 1991. Spectral Stochastic Finite Element Formulation for Reliability Analysis, J. Engng Mech., ASCE, 117,10, 2351-2372.
- Gong, Y., 2003. Performance Based Design of Steel Building Frameworks under Seismic Loading, Doktora Tezi, University of Waterloo, Kanada.
- Gutierrez, M.A., 2005. The Random Dimension in Computational Failure Mechanics, Probabilistic Engineering Mechanics, 21, 3, 257-266.
- Hien, T.D. ve Kleiber M., 1991. Stochastic Design Sensitivity in Structural Dynamics, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 32, 6, 1247-1265.
- Huh, J. ve Haldar, A. , 2001. Stochastic Finite-Element-Based Seismic Risk of Nonlinear Structures J. Struct. Engrg., 127, 3, 323-329.
- Kaminski, M. ve Kleiber, M., 2000. Perturbation Based Stochastic Finite Element Method for Homogenization of Two-Phase Elastic Composites, Computer and Structures, 78, 811-826.
- Kaminski, M. ve Carey, G.F., 2005. Stochastic Perturbation-Based Finite Element Approach to Fluid Flow Problems, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 15, 7, 671-697.
- Kaminski, M., 2006. On Generalized Stochastic Perturbation-Based Finite Element Method, Communications in Numerical Methods in Engineering, 22, 23-31.
- Kishi, N., Chen, W.F., Goto, Y. ve Matsuoka, K.G., 1993. Design Aid of Semi-rigid Connections for Frame Analysis, Engineering Journal, 30, 3, 90-107.

- Kleiber, M. ve Hien, T.D., 1992. The Stochastic Finite Element Method, Wiley Inc., New York, 322 s.
- Köylüoğlu, M.U., Nielsen S.R.K. ve Çakmak A.Ş., 1995. Stochastic Dynamics of Geometrically Non-Linear Structures with Random Properties Subject to Stationary Random Excitation, Journal of Sound and Vibration, 190, 5, 821-841.
- Köylüoğlu, M.U. ve Elishakoff, I., 1998. A Comparison of Stochastic and Interval Finite Elements Applied to Shear Frames with Uncertain Stiffness Properties, Computers and Structures, 67, 91-98.
- Lawrence, M.A., 1987. Basis Random Variables in Finite Element Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24, 10, 1849-1863.
- Lee, B.W. ve Lim, O.K., 1996. Application of the First-Order Perturbation Method to Optimal Structural Design, Structural Engineering and Mechanics, 4, 4, 425-436.
- Lei, Z. ve Qiu, C., 2000a. Neumann Dynamic Stochastic Finite Element Method of Vibration for Structures with Stochastic Parameters to Random Excitation, Computers and Structures, 77, 651-657.
- Lei, Z. ve Qiu, C., 2000b. A Stochastic Variational Formulation for Nonlinear Dynamic Analysis of Structure, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 190, 597-608.
- Leon, R.T., 1998. Analysis and Design Problems for PR Composite Frames Subjected to Seismic Loads, Engineering Structures, 20, 4, 364-371.
- Liu, W.K., Belytschka, T. ve Mani, A., 1986a. Random Field Finite Elements, International Journal for Numerical Method in Engineering, 23, 10, 1831-1845.
- Liu, W.K., Belytschka, T. ve Mani, A., 1986b. Probabilistic Finite Elements for Nonlinear Structural Dynamics, Computer Methods in Applied mechanics and Engineering, 56, 1, 61-81.
- Liu, W., Mani, A. ve Belytschko, T., 1987. Finite Element Methods in Probabilistic Mechanics, Probabilistic Engineering Mechanics, 2, 4, 201-213.
- Liu, W.K., Belytschka, T. ve Mani, A., 1989. Application of Probabilistic Finite Element Method in Elastic/Plastic Dynamics, Journal of Engineering for Industry, 109, 1, 2-8.
- Lin, S.C. ve Kam, T.Y., 1992. Buckling Analysis of Imperfect Frames Using a Stochastic Finite Element Method, Computers and Structures, 42, 6, 895-901.
- Lui, E.M. ve Chen, W.F., 1986. Analysis and Behavior of Flexibly-Jointed Frames, Engineering Structures, 8, 107-118.
- Lui, E.M. ve Lopes, A., 1997. Dynamic Analysis and Response of Semi-Rigid Frames, Engineering Structures, 19, 644-654.

- Lui, E.M. 1999. Structural Steel Design, Structural Engineering Handbook, CRC Press, New York, ABD, 1253 s.
- Mahadevan, S. ve Mehta, S., 1993. Dynamic Reliability of Large Frames, Computer&Structures, 47, 1, 57-67.
- McGuire, W., Gallagher, R.H. and Ziemian, R.D., 1999. Matrix Structural Analysis, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 460 s.
- Mehanny, S.S. ve Deierlein, G.G., 2000. Modeling of Assessment of Seismic Performance of Composite Frames with Reinforced Concrete Columns and Steel Beams, Blume Earthquake Engineering Center, Rapor No 135, ABD, 442 s.
- Melchers, R.E., 1999. Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley&Sons, England, 561 s.
- Melchers, R.E. ve Ahammed, M., 2004. A Fast Approximate Method for Parameter Sensitivity Estimation in Monte Carlo Structural Reliability, Computers and Structures, 82, 55-61.
- Mirza, S.A., 1998. Monte Carlo Simulation of Dispersions in Composite Steel Concrete Column Strength Interaction, Engineering Structures, 20, 2, 97-104.
- Moon, B.Y., Kang, G.J., Kang, B.S. ve Cho, D.S., 2004. Dynamic and Reliability Analysis of Stochastic Structure System Using Probabilistic Finite Element Method, Structural Engineering and Mechanics, 18, 1, 125-135.
- Monforton, G.R. ve Wu, T.S., 1963. Matrix Analysis of Semi-Rigidly Connected Frames, Journal of Structural Division, ASCE, 89, 6, 13-42.
- Nakagiri, S., Takabatke, H. ve Tani, S., 1985. Uncertain Eigenvalue Analysis of Composite Laminated Plates by the Stochastic Finite Element Method, The Winter Annual Meeting, ASME, 1-8.
- Ngah M.F. ve Young A., 2007. Application of the Spectral Stochastic Finite Element Method for Performance Prediction of Composite Structures, Composite Structures, 78, 447-456.
- Nieuwenhof, B.V. ve Coyette, J., 2002. Modal Approaches for the Stochastic Finite Element Analysis of Structures with Material and Geometric Uncertainties, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 192, 3705-3729.
- Noh, H.C., 2004. A Formulation for Stochastic Finite Element Analysis of Plate Structures with Uncertain Poisson's Ratio, Comput. Methods Appl. Mecs. Engrg., 193, 4857-4873.

- Noh, H.C., 2006. Effect of Multiple Uncertain Material Properties on the Response Variability of in-Plane and Plate Structures, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195, 2697–2718.
- Onkar, A.K., Upadhyay, C.S. ve Yadav D., 2006. Generalized Buckling Analysis of Laminated Plates with Random Material Properties Using Stochastic Finite Elements, International Journal of Mechanical Sciences, 48, 780–798.
- Papadopoulos, V. ve Papadrakakis, M., 1997. Stochastic Finite Element – Based Reliability Analysis of Space Frame, Probabilistic Engineering Mechanics, 13, 1, 53-65.
- Papadopoulos, V., Deodatis, G. ve Papadrakakis M., 2005. Flexibility Based Upper Bounds on the Response Variability of Simple Beams, Comput. Methods Appl. Mecs. Engrg., 194, 1385-1404.
- Papadopoulos, V. ve Deodatis, G., 2005. Response Variability of Stochastic Frame Structures Using Evolutionary Field Theory, Comput. Methods Appl. Mecs. Engrg., 195, 1050-1074.
- Papadrakakis, M. ve Papadopoulos, V., 1996. Robust and Efficient Methods for the Stochastic Finite Element Analysis Using Monte Carlo Simulation, Comp. Meth. in Applied Mechanics and Engineering, 134, 325-340.
- Papadrakakis, M. ve Kotsopoulos, A., 1999. Parallel Solution Methods for Stochastic Finite Element Analysis Using Monte Carlo Simulation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 168, 305-320.
- Peebles, P.Z., 1987. Probability Random Variables and Random Signal Principles, McGraw Hill Inc., Second Edition, ABD, 345 s.
- Pilkey W.D., 2002. Analysis and Design of Elastic Beams-Computational Methods, Wiley Inc., ABD, 408 s.
- Pradlwalter, H.J. ve Schueller, G.I., 1999. Assessment of Low Probability Events of Dynamical Systems by Controlled Monte Carlo Simulation, Probabilistic Engineering Mechanics, 14, 213-227.
- Prashtofer, P.H. ve Beadle, C.W., 1985. Dynamic Response of Structures with Statistical Uncertains in Their Stiffness, Journal of Sound and Vibration, 42, 4, 477-493.
- Renton, J.D., 1962. Stability of Space Frames by Computer Analysis, Journal of Structural Division, ASCE, 88, 4, 81-103.
- Rex, C.O. ve Easterling, W.S., 2002. Partially Restrained Composite Beam–Girder Connections, Journal of Constructional Steel Research, 58, 1033–1060.

- Sakurai, S., Ellingwood, B. ve Koshiyama, S., 2001. Probabilistic Study of the Behavior of Steel Frames with Partially Restrained Connections, Engineering Structures, 23, 1410–1417.
- Salazar, A.R. ve Haldar, A., 1999. Nonlinear Seismic Response of Steel Structures with Semi-Rigid and Composite Connections, Journal of Constructional Steel Research, 51, 37–59.
- Sapountzakis, E.J. ve Mokos, V.G., 2006. 3-D Beam Element of Composite Cross Section Including Warping and Shear Deformation Effects, Computers and Structures, 85, 102–116.
- Sapountzakis, E.J. ve Mokos, V.G., 2007. Vibration Analysis of 3-D Composite Beam Elements Including Warping and Shear Deformation Effects, Journal of Sound and Vibration, 306, 818-834.
- Sekulovic, M. ve Salatic, R., 2001. Nonlinear Analysis of Frames with Flexible Connections, Computers and Structures, 79, 1097-1107.
- Sekulovic, M., Salatic, R. ve Nefovska, M., 2002. Dynamic Analysis of Steel Frames with Flexible Connections, Computers and Structures, 80, 11, 935-955.
- Sekulovic, M. ve Nefovska-Danilovic M., 2008. Contribution to Transient Analysis of Inelastic Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Engineering Structures, 30, 976–989.
- Shi, G. ve Xiong, Y., 2000. Probabilistic Buckling Analysis of Fiber Metal Laminates under Shear Loading Condition, Advances in Engineering Software, 31, 519–527.
- Shinozuka, M., 1972. Monte Carlo Simulation of Structural Dynamics, Computers and Structures, 2, 865-874.
- Shinozuka, M. ve Astill, J., 1972. Random Eigenvalue Problems in Structural Analysis, AIAA Journal, 10, 4, 456-462.
- Shinozuka, M., 1987. Basic Issues in Stochastic Finite Element Analysis, Proc. 5<sup>th</sup> ICASP, University of Waterloo Press, 506-519.
- Shinozuka, M. ve Deodatis, G., 1988. Response Variability of Stochastic Finite Element Systems, Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 114, 3, 499-519.
- Solnes, J., 1997. Stochastic Processes and Random Vibrations: Theory and Practice, John Wiley & Sons Ltd., England, 221 s.
- Soong, T.T. ve Bogdanoff, J.L., 1963. On the Natural Frequency a Disordered Linear Chain of N-Degrees of Freedom, International Journal of Mechanical Sciences, 6, 225-237.

- Sniady, P. ve Zielichowski-Haber, W., 2004. New approach in Stochastic Finite Element Method, Proc. Appl. Math. Mech., 4, 1, 374-375.
- Suarez, L.E., Singh, M.P. ve Matheu, E.E., 1995. Seismic Response of Structural Frameworks with Flexible Connections, Computers and Structures, 58, 27-41.
- Sultan, S.A.R., 2007. Performance-Based Optimal Design of Semi-Rigid Connected Steel Frames under Seismic Loading, Doktora Tezi, The University of Iowa, ABD.
- Takada, T., 1990. Weighted Integral Method in Stochastic Finite Element Analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 5,3 ,146-156.
- Tezcan, S.S. ve Mahapatra, B.C., 1969. Tangent Stiffness Matrix for Space Frame Members, J. Struct. Div. ASCE, 95, 1257-1270.
- Tin-Loi, F. ve Vimonsatit, V., 1996. Nonlinear Analysis of Semirigid Frames: A Parametric Complementarity Approach, Engineering Structures, 18, 115-124.
- URL-1, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>, PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Centre). 12.10.2008.
- Vanmarcke, E. and Grigoriu, M. 1983. Stochastic Finite Element Analysis of Simple Beam, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 5, 1203-1214.
- Vanmarcke, E.H., Shinozuka, M., Nakagiri, S., Schueller, G.I. ve Grigoriu, M., 1985. Random Fields and Stochastic Finite Elements, Structural Safety, 3, 143-166.
- Vellasco, P.C.G.D., De Andrade, S.A.L., Da Silva, J.G.S., De Lima, L.R.O. ve Brito, O., 2006. A Parametric Analysis of Steel and Composite Portal Frames with Semi-Rigid Connections, Engineering Structures, 28, 4, 543-556.
- Waarts, P.H. ve Vrouwenvelder, A.C.W.M., 1999. Stochastic Finite Element Analysis of Steel Structures, Journal of Constructional Steel Research, 52, 21–32.
- Wang, J.F. ve Li, G.Q., 2008. A Practical Design Method For Semi-Rigid Composite Frames under Vertical Loads, Journal of Constructional Steel Research, 64, 176–189.
- Weng, C.C. ve Yeng, S.I., 2002. Comparisons of Concrete-Encased Composite Column Strength Provisions of ACI Code and AISC Specification, Engineering Structures, 24, 59–72.
- Weyand, K., Laspart, J.P. ve Steenhuis, M., 1998. Economy Studies of Steel Building Frames with Semi-Rigid Joints, Journal Constructional Steel Research, 46, 1-3.
- Wilson, E.L., 1997. SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Verification Manual, Computer and Structures Inc., California, 382 s.

- Wong, Y.L., Yu, T. ve Chan, S.L., 2007. A Simplified Analytical Method for Unbraced Composite Frames with Semi-Rigid Connections, Journal of Constructional Steel Research, 63, 7, 961-969.
- Yamazaki, F., Shinozuka, M. ve Dasgupta, G., 1988. Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis, J. Engng Mech., 114, 8, 1335-1354.
- Yiu, F. ve Zhang, Q., 2000. Stability Analysis of Steel Space Structures with System Parametric Uncertainties, Communications in Numerical Method in Engineering, 16, 267-273.
- Zhang, Z. ve Chen, S., 1991. The Standard Deviations of the Eigensolutions for Random MDOF Systems, Computers and Structures, 39, 603-607.
- Zhang, J., 1994. Stochastic Finite Element-Based Structural Analysis and Reliability Assessment, Doktora Tezi, The University of Johns Hopkins, ABD.
- Zhang J. ve Ellingwood, B.R., 1995. The Effects of Uncertain Material Properties on Structural Stability, Journal of Structural Engineering-ASCE, 121, 4, 705-716.
- Zhang, Y., Chen, S., Liu, Q. ve Liu T., 1996. Stochastic Perturbation Finite Elements, Computers and Structures, 59, 3, 425-429.
- Zhang J. ve Ellingwood, B.R., 1996. SFEM for Reliability of Structures with Material Nonlinearities, Journal of Structural Engineering-ASCE, 122, 6, 701-704.
- Zhang, Q.L. ve Peil, U., 1997. Random Finite Element Analysis for Stochastic Responses of Structures, Computers & Structures, 62, 4, 611-616.
- Zheng, Y., 1999. Stochastic Finite Element Analysis of Continuous Elastic Systems, Doktora Tezi, The University of Western Ontario, London.
- Zielichowski-Haber, W., 2005. Sensitivity Analysis of Uncertain Structures Subject to Stochastic Load in the Framework of SFEM, Proc. Appl. Math. Mech. (PAMM), 1, 5, 731-732.
- Zhu, W.Q. ve Wu, W.Q., 1992. A Stochastic Finite Element Method for Real Eigenvalue Problem, Probabilistic Engineering Mechanics, 118, 3, 496-511.
- Xu, Y.L. ve Zhang, W.S., 2001. Modal Analysis and Seismic Response of Steel Frames with Connection Dampers, Engineering Structures, 23, 385-396.



## ÖZGEÇMİŞ

Özlem ÇAVDAR, 1978 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1995 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümünü kazandı. 1997 yılında bu bölümden birincilikle mezun oldu ve aynı yıl KTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne dikey geçiş yaptı. 2000 yılında bu bölümden üçüncülükle mezun oldu. 2001 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına başladı. Yine aynı yıl, KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim dalında Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. 2005 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak, aynı Enstitü ve Anabilim Dalı'nda başladığı doktora programından 2009 yılında başarıyla mezun oldu.

Evli, bir çocuk annesi olan ve iyi derecede İngilizce bilen ÇAVDAR halen Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.