

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HASAR GÖRMÜŞ SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN  
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÜMÜT SAKİNE DEMİR**

**DENİZLİ, HAZİRAN 2016**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HASAR GÖRMÜŞ SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN  
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÜMÜT SAKİNE DEMİR**

**DENİZLİ, HAZİRAN 2016**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

ÜMÜT SAKİNE DEMİR tarafından hazırlanan "HASAR GÖRMÜŞ SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Prof. Dr. Selçuk TOPRAK  
Pamukkale Üniversitesi



Üye  
Doç. Dr. Ceyhan Özçelik  
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20.07.2016 tarih ve ..27/18... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**Ümüt Sakine DEMİR**



## ÖZET

**HASAR GÖRMÜŞ SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN  
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSAN TEZİ  
ÜMÜT SAKİNE DEMİR  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)**

**DENİZLİ, HAZİRAN 2016**

Su dağıtım sistemleri yerleşim yerlerinin en hayati yapılarından biridir. Bir su dağıtım sistemi borulardan ve diğer hidrolik bileşenlerden oluşur. Borular su dağıtım sisteminin ana elemanlarıdır ve doğal afetler veya işletim hataları sonucu hasar görebilirler. Boru hasarları kırık ve çatlak olarak iki grupta incelenebilir. Bir su dağıtım sisteminin bazı borularının hasar gördükten sonra da belli bir seviyede hizmete devam etmesi beklenir.

Su dağıtım sisteminin performansı hasar görmüş sistemdeki debi ve basınçlara bağlıdır. Deprem su dağıtım sistemleri üzerinde önemli hasar verici etkisi olan bir olay olduğu için tez kapsamında dokuz adet varsayımsal su dağıtım sisteminin deprem sonrası performansı dört farklı onarım oranı kullanılarak detaylı olarak araştırılmıştır. Temel varsayımsal su dağıtım sistemi ana dağıtım hattı boyunca iki ve üç kat büyütülmüştür. Bu sistemlere bir ya da iki rezervuar eklenmiştir ve sistemlerin ayrı bölgelelerinin uç kısımlarına borular eklenerek bu değişikliklerin servis oranını ve graf indisleri arasındaki ilişkiyi nasıl değiştirdiği gözlenmiştir.

Hasarların su dağıtım sistemindeki yerleri Monte Carlo simülasyonları ile belirlenmiştir ve bu amaçla GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) programı kullanılmıştır. Su dağıtım sisteminin performansı graf indisleri kullanılarak ve bu indisler ile elde edilen sonuçlar GIRAFFE programının su dağıtım sisteminin performansını ölçmek için verdiği servis oranı ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda ellibir adet graf indisi kullanılmıştır.

Çalışma sonuçlarına göre bütün su dağıtım sistemlerinde onarım oranı arttıkça servis oranının azaldığı gözlenmiştir. Bir rezervuardan beslenen sistem büyüdükçe bütün onarım oranlarında servis oranı azalmaktadır. Rezervuar sayısı arttıkça bütün onarım oranlarında servis oranı artmaktadır. Ayrı bölgeleleri birleştiren borular eklenmesi bütün onarım oranlarında servis oranını arttırmaktadır. Ayrıca servis oranı ile aynı şekilde davranan ve servis oranı ile aynı şekilde davranmayan graf indisleri belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER: Deprem, GIRAFFE, Graf indisleri, Servis oranı, Su dağıtım sistemi,**

## **ABSTRACT**

### **PERFORMANCE INVESTIGATION OF DAMAGED WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**

**MSC THESIS**

**ÜMÜT SAKİNE DEMİR**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ABDULLAH CEM KOÇ)**

**DENİZLİ, JUNE 2016**

Water distribution systems are one of the most vital lifelines of urban areas. A water distribution system consists of pipes and other hydraulic appurtenances. Pipes are the main elements of a water distribution and they may be damaged after natural disasters or operational errors. Pipe damages are grouped as breaking and leaking. A water distribution system is expected to serve at a certain level after some pipes were damaged.

Performance of water distribution system depends on the available flows and pressures in the damaged system. Earthquake is the major destructive phenomenon on the water distribution systems so in this study post earthquake performance of nine hypothetical water distribution systems with four different repair rates were investigated in detail. The basic hypothetical water distribution system was enlarged along the main distribution line two and three times, one or two extra reservoirs added to these systems and edge of the eaves of systems were connected with pipes to see how these changes affected the relationship between the service ratio and graph indices.

Locations of the damages are selected by Monte Carlo simulations. To achieve this, GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) computer program was used. Service ratio values obtained from GIRAFFE and graph based network indices were compared. In accordance with this purpose, fifty one graph indices were used.

According to results of study, service ratio is decreasing when repair rate increases for all hypothetical systems. When reservoir numbers increase, service ratio increases for all repair rates. Addition of pipe increases service ratio for all repair rates. Moreover, indices have similar behaviour with service ratio and indices have not similar behaviour with service ratio were determined.

**KEYWORDS:Earthquake, GIRAFFE, Graph indices, Service ratio, Water distribution system**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	3
1.1.1    Deprem etkisi altında her bir boru hasarının etkilerini araştırmak için yapılan çalışmalar .....	3
1.1.2    Deprem etkileri altında hasar oranı ve servis oranı arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar.....	3
1.1.3    Deprem riski altında su temini sistemleri için fazlalık indisini inceleyen çalışmalar.....	3
1.1.4    Su dağıtım sistemlerinin risk ve güvenilirliğinin değerlendirilmesinde basamaklandırma bozukluklarının etkisini inceleyen çalışmalar .....	4
1.1.5    Su dağıtım sisteminin zemin sıvılaşması sonucu servis düzeyini inceleyen çalışmalar.....	4
1.1.6    Graflarla ilgili yapılan çalışmalar .....	4
1.1.7    Su dağıtım sisteminin hasar görebilirliği ile ilgili yapılan çalışmalar .....	5
1.1.8    Su dağıtım sisteminin güvenilirliği ile ilgili yapılan çalışmalar ....	6
1.1.9    Su dağıtım sistemlerinin performans değerlendirmesi için yapılan çalışmalar .....	7
1.2    Tezin Organizasyonu .....	9
<b>2. DEPREM ETKİSİYLE BORU HASARLARI</b> .....	<b>10</b>
2.1    GIRAFFE .....	11
2.1.1    Servis Oranı .....	14
2.2    GIRAFFE Girdiler ve Çıktılar.....	15
2.2.1    Girdiler.....	15
2.2.2    Kontrol Parametreleri .....	16
2.2.3    Sabit Monte Carlo Simülasyonu .....	16
2.2.4    Monte Carlo Simülasyonlarının Çıktısı .....	18
2.3    Boru Hasar Modellemesi .....	18
2.3.1    Boru Çatlak Simülasyonu .....	19
2.3.1.1    Hidrolik Model.....	19
2.3.1.2    Çatlak Sınıflandırması.....	21
2.3.1.2.1    Ek Yeri Ayrılması.....	22
2.3.1.2.2    Çevresel Çatlak.....	23
2.3.1.2.3    Boyuna Çatlak.....	24
2.3.1.2.4    Boru Duvarının Yerel Kaybı.....	26
2.3.1.2.5    Boru Duvarının Yerel Yırılması.....	27
2.3.1.3    Çatlak Tiplerinin Olasılığı .....	28
2.3.2    Boru Kırık Simülasyonu .....	29

2.3.3	Boru Hasar Modellerinin Uygulanması .....	30
2.3.3.1	Boru Hasarı Oluşturma .....	30
2.3.3.2	Hasar Durumuna Karar Verme .....	31
2.3.3.3	Çatlak Tipinin Belirlenmesi .....	32
2.4	Negatif Basınç Düzeltmesi .....	32
<b>3.</b>	<b>SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN PERFORMANSI .....</b>	<b>35</b>
3.1	Graf Tabanlı Su Dağıtım Ağı Performans Ölçütleri.....	36
3.2	GIRAFFE İle Monte Carlo Simülasyonları.....	54
3.3	Pearson ve Spearman Korelasyonları .....	55
3.3.1	Pearson Korelasyon Katsayısı .....	55
3.3.2	Spearman Korelasyon Katsayısı .....	56
<b>4.</b>	<b>VARSAYIMSAL SU DAĞITIM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>58</b>
4.1	H1 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	58
4.2	H2 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	61
4.3	H3 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	64
4.4	H4 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	67
4.5	H5 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	70
4.6	H6 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	73
4.7	H7 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	76
4.8	H8 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	79
4.9	H9 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi .....	82
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>85</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>93</b>
<b>7.</b>	<b>EKLER.....</b>	<b>99</b>
	EK A Varsayımsal Sistemlerin Farklı Onarım Oranları İçin Göreceli İndis Değerleri .....	99
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>115</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2. 1: GIRAFFE Simülasyon Akış Şeması (Shi 2006) .....	12
Şekil 2.2: Model Tahminleri ve Fıskiye Verisi Arasındaki Karşılaştırma (Shi 2006).....	20
Şekil 2.3: Çatlak Simülasyonu için Hidrolik Model (Cornell Üniversitesi 2007).....	20
Şekil 2.4: Ek Yeri Ayrılmasının Şematik Çizimi (Shi 2006) .....	22
Şekil 2.5: Yuvarlak Çatlağın Şematik Çizimi (Shi 2006).....	24
Şekil 2.6: Boyuna Çatlağın Şematik Çizimi (Shi 2006) .....	25
Şekil 2.7: Boru Duvarı Yerel Kaybının Şematik Çizimi (Shi 2006) .....	26
Şekil 2.8: Boru Duvarı Yerel Yırtılmasının Şematik Çizimi (Shi 2006).....	27
Şekil 2.9: GIRAFFE'da Boru Kırığının Hidrolik Modeli (Cornell Üniversitesi 2007) .....	29
Şekil 2.10: Boru Hasarı Oluşturmada Poisson Süreci (Shi 2006) .....	31
Şekil 2.11: Negatif Basınç Gösterimi (Cornell Üniversitesi 2007) .....	33
Şekil 4.1: H1 Sisteminin Şebeke Planı .....	59
Şekil 4.2: H1 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	60
Şekil 4.3: H2 Sisteminin Şebeke Planı .....	62
Şekil 4.4: H2 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	63
Şekil 4.5: H3 Sisteminin Şebeke Planı .....	65
Şekil 4.6: H3 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	66
Şekil 4.7: H4 Sisteminin Şebeke Planı .....	68
Şekil 4.8: H4 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	69
Şekil 4.9: H5 Sisteminin Şebeke Planı .....	71
Şekil 4.10: H5 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	72
Şekil 4.11: H6 Sisteminin Şebeke Planı .....	74
Şekil 4.12: H6 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	75
Şekil 4.13: H7 Sisteminin Şebeke Planı .....	77
Şekil 4.14: H7 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	78
Şekil 4.15: H8 Sisteminin Şebeke Planı .....	80
Şekil 4.16: H8 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	81
Şekil 4.17: H9 Sisteminin Şebeke Planı .....	83
Şekil 4.18: H9 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları.....	84
Şekil 5.1: Servis Oranının Onarım Oranları ile Değişimi.....	87
Şekil 5.2: Harary İndisi Değerleri.....	87
Şekil 5.3: Göreceli Harary İndisleri.....	88
Şekil 5.4: Göreceli Ortalama Yol Uzunluğu İndisleri .....	88
Şekil 5.5: Göreceli Laplasiyen Enerji İndisleri.....	89
Şekil 5.6: Göreceli Köşegendışı Karmaşıklık İndisleri .....	89
Şekil A.1: Göreceli Toplam Komşuluk İndisleri.....	99
Şekil A.2: Göreceli Zagreb 1 İndisleri.....	99
Şekil A.3: Göreceli Zagreb 2 İndisleri.....	100
Şekil A.4: Göreceli Modifiye Zagreb İndisleri.....	100
Şekil A.5: Göreceli Değişken Zagreb İndisleri.....	100
Şekil A.6: Göreceli Randik Bağlanabilirlik İndisleri .....	101
Şekil A.7: Göreceli Normalize Kenar Karmaşıklığı İndisleri .....	101

Şekil A.8: Göreceli Atom Bağlanabilirlik İndisleri.....	101
Şekil A.9: Göreceli Geometrik Aritmetik 1 İndisleri .....	102
Şekil A.10: Göreceli Geometrik Aritmetik 2 İndisleri .....	102
Şekil A.11: Göreceli Entropi İndisleri.....	102
Şekil A.12: Göreceli Bertz Karmaşıklık İndisleri.....	103
Şekil A.13: Göreceli Düğüm Noktası Derecesi Eşitliği Tabanlı Bilgi İndisleri.....	103
Şekil A.14: Göreceli Graf Düğüm Noktası Karmaşıklığı İndisleri .....	103
Şekil A.15: Göreceli Kenar Eşdeğerliği Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisleri.....	104
Şekil A.16: Göreceli Kenar Büyüklüğü Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisleri.....	104
Şekil A.17: Göreceli Ortalama Eklem İndisleri.....	104
Şekil A.18: Göreceli Verimlilik İndisleri .....	105
Şekil A.19: Göreceli Graf Karmaşıklık İndisleri.....	105
Şekil A.20: Göreceli Spektral Yarıçap İndisleri .....	105
Şekil A.21: Göreceli Mesafe Kodu Merkez İndisleri .....	106
Şekil A.22: Göreceli Komşuluk HMS İndisleri.....	106
Şekil A.23: Göreceli Laplasiyen HMS İndisleri.....	106
Şekil A.24: Göreceli Arttırılmış HMS İndisleri .....	107
Şekil A.25: Göreceli Genişletilmiş Komşuluk HMS İndisleri .....	107
Şekil A.26: Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık HMS İndisleri .....	107
Şekil A.27: Göreceli Rastgele Hareket Markov HMS İndisleri .....	108
Şekil A.28: Göreceli Komşuluk SMS İndisleri .....	108
Şekil A.29: Göreceli Laplasiyen SMS İndisleri .....	108
Şekil A.30: Göreceli Arttırılmış SMS İndisleri .....	109
Şekil A.31: Göreceli Genişletilmiş Komşuluk SMS İndisleri.....	109
Şekil A.32: Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık SMS İndisleri.....	109
Şekil A.33: Göreceli Rastgele Hareket Markov SMS İndisleri.....	110
Şekil A.34: Göreceli Komşuluk ISMS İndisleri.....	110
Şekil A.35: Göreceli Laplasiyen ISMS İndisleri .....	110
Şekil A.36: Göreceli Arttırılmış ISMS İndisleri.....	111
Şekil A.37: Göreceli Genişletilmiş Komşuluk ISMS İndisleri.....	111
Şekil A.38: Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık ISMS İndisleri.....	111
Şekil A.39: Göreceli Rastgele Hareket Markov ISMS İndisleri.....	112
Şekil A.40: Göreceli Arttırılmış PMS İndisleri .....	112
Şekil A.41: Göreceli Arttırılmış IPMS İndisleri.....	112
Şekil A.42: Göreceli Graf Enerji İndisleri.....	113
Şekil A.43: Göreceli Estrada İndisleri .....	113
Şekil A.44: Göreceli Laplasiyen Estrada İndisleri .....	113
Şekil A.45: Göreceli Küme Sayısı İndisleri .....	114
Şekil A.46: Göreceli Çap İndisleri.....	114
Şekil A.47: Göreceli Yoğunluk İndisleri .....	114

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> GIRAFFE Kontrol Parametreleri (Cornell Üniversitesi 2007).....	16
<b>Tablo 2.2:</b> Sabit Monte Carlo Simülasyonu için Girdi Parametreleri (Cornell Üniversitesi 2007) .....	17
<b>Tablo 2.3:</b> Probabilistik Boru Hasarı Girdi Dosyasındaki Sütunların Tanımlanması (Cornell Üniversitesi 2007) .....	17
<b>Tablo 2.4:</b> Boru Çatlak Tipleri, Nedenleri ve Yerleri .....	22
<b>Tablo 2.5:</b> Farklı Boru Malzemeleri için Çatlak Tiplerinin Görülme Olasılığı (Shi 2006).....	28
<b>Tablo 3.1:</b> QuACN Kütüphanesiyle Hesaplanan İndislerin Komutları.....	37
<b>Tablo 3.2:</b> İgraph Kütüphanesiyle Hesaplanan İndislerin Komutları .....	38
<b>Tablo 3.3:</b> Monte Carlo Simülasyon Sayıları.....	55
<b>Tablo 4.1:</b> Varsayımsal Su Dağıtım Sistemlerinin Özellikleri.....	58
<b>Tablo 5. 1:</b> Graf İndislerinin Servis Oranı ile Karşılaştırılması .....	86
<b>Tablo 5.2:</b> İndisler ile Servis Oranı Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları .....	90

## KISALTMALAR

<b>GYD</b>	: Geçici Yer Deformasyonları
<b>KYD</b>	: Kalıcı Yer Deformasyonları
<b>OO</b>	: Onarım Oranı
<b>GIRAFFE</b>	: Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes
<b>LADWP</b>	: Los Angeles Department of Water and Power
<b>CBS</b>	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
<b>ALA</b>	: American Lifelines Alliance
<b>QuACN</b>	: Quantitative Analyze of Complex Networks

## SEMBOL LİSTESİ

$A$	: Orifis alanı
$A_{max}$	: Maksimum dairesel alan
$A(G)$	: Toplam kenar sayısı
$a_{ij}$	: Komşuluk matrisi elemanı
$\tilde{a}_k$	: Köşegen matrisin diyagonalı
$a_k$	: Her bir matris diyagonalının matris diyagonallarının toplamına oranı
$C$	: İlgili denklik sınıfı sayısı
$C_D$	: Debi katsayısı
$c_i$	: Aynı düğüm noktası mesafesi kodlu düğüm noktalarının sayısı
$c_{ij}$	: Bütün düğüm noktalarının $j \geq i$ dereceli komşularının sayısı
$D$	: Boru çapı
$d_i$	: $i$ .nci gözlemin sıra numaraları arasındaki fark
$d_{ij}$	: Düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe
$E$	: Kenar sayısı
$E_g$	: Kenarların alt kümesi
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$H_i$	: Hidrolik yükseklik
$H_{iE}$	: Yükseklik
$K$	: Yersel kayıp katsayısı
$k$	: Asıl çatlak alanının maksimum çatlak alanına oranı
$k_1$	: Çatlak uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan bir sabit
$k_2$	: Çatlak genişliğinin hesaplanmasında kullanılan bir sabit
$k_{vi}$	: Düğüm noktası $v_i$ 'nin derecesi
$k_{max}$	: Grafın bütün düğüm noktalarının maksimum derecesi
$\bar{k}$	: Graftaki derece gruplarının sayısı
$L$	: Çatlak uzunluğu
$L_k$	: Hasar yerleri arasındaki mesafe
$l_{ij}$	: Düğüm noktaları arasındaki mesafe
$m$	: Ayrıt sayısı
$N$	: Düğüm noktası sayısı
$N_i^Y$	: $i$ inci düğüm noktası yörüngesine ait düğüm noktalarının sayısı
$N_i$	: düğüm noktası yörüngelerinin niceliği
$N_i^{k_v}$	: $i$ ve $\bar{k}$ ' ya eşit dereceli düğüm noktalarının sayısı
$n$	: İki değişkenli örnekte toplam gözlem sayısı
$P$	: Boru iç basıncı
$P_{bk}$	: Şartlı olasılık
$Q_T$	: Mevcut talep
$Q_T^*$	: Gerekli talep
$Q$	: Debi
$q$	: Grafın komşuluk matrisinin en büyük özdeğeri
$R(G)$	: Randic bağlanabilirlik indisi
$r$	: Korelasyon katsayısı
$S_s$	: Servis oranı
$s$	: Matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2, tek olduğu zaman 1 alınan değer

$T$	: Matrisin diyagonallarının toplamı
$t$	: Maksimum olası dairesel açıklığın kalınlığı
$u_1$	: Rastgele değişken
$v_i^c$	: Düğüm noktası karmaşıklığı
$W$	: Çatlak genişliği
$\bar{x}$	: $x$ 'in aritmetik ortalaması
$\bar{y}$	: $y$ 'nin aritmetik ortalaması
$\gamma_w$	: Suyun birim hacim ağırlığı
$\theta$	: Çatlağın açılma açısı
$\mu_2$	: Üniform dağılmış rastgele sayı
$\rho$	: Komşuluk matrisi
$\lambda_i$	: Matrisin özdeğeri
$\mu_i$	: Laplasiyen matrisin özdeğeri

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca emeğini ve katkılarını esirgemeyen, tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım tez danışmanım Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ' a teşekkürü bir borç bilirim ve yüksek lisans öğrenimim boyunca katkı ve destek veren Prof. Dr. Selçuk TOPRAK'a teşekkür ederim. Katkılarından dolayı jüri üyesi Ceyhun ÖZÇELİK'e teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen değerli aileme, tez çalışmam boyunca ve her zaman yanımda olan, destek veren sevgili eşim Ahmet DEMİR'e, bölüm hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışma 114M258 No'lu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ümüt Sakine Demir

# 1. GİRİŞ

Su dağıtım sistemi bir yerleşim yerinin en önemli altyapılarından biridir. Su dağıtım sisteminin hasar görmesi sadece yangınla mücadele kapasitesini olumsuz etkilemez aynı zamanda yaşamsal, ticari ve endüstriyel faaliyetlere de engel olarak büyük ekonomik kayıplara yol açar (Hwang ve diğ. 1998). Su dağıtım sistemleri hasara uğrayabilirler. Bu hasarlar doğal afetler (deprem, heyelan vb.) ve işletim hataları (su darbesi vb.) sonucu gerçekleşebilir. Depremler su dağıtım sistemleri üzerinde en büyük etkisi olan doğal afetler olduğu için bu çalışmada hasar sebebi olarak ele alınmıştır. Deprem sonucu su dağıtım sisteminin tüm elemanları (borular, depolar, pompa istasyonları vb.) hasar görebilir ancak bu çalışmada sadece boru hasarları dikkate alınmıştır. Boru hatlarının deprem öncesinde olduğu kadar deprem sonrasında da fonksiyonunu devam ettirebilmesi gerekir (Toprak ve Yoshizaki 2003).

Gömülü boruların deprem sonucu hasarı Geçici Yer Deformasyonları (GYD) veya Kalıcı Yer Deformasyonları (KYD) ile olur. GYD deprem dalgasının yayılması veya yerin sarsılması sonucu oluşan ve kalıcı olmayan deplasmanlar iken, KYD ise yüzey kırıkları, sıvılaşma, toprak kayması ve kohezyonsuz zeminlerin farklı oturması sonucu oluşan kalıcı deplasmanlardır. GYD ve KYD'nin birbirine göre büyüklükleri hangisinin boru üzerinde daha etkili olacağını da belirler (Toprak ve diğ. 2009). Su dağıtım sisteminin yer üstündeki ve yeraltındaki bileşenleri üzerinde GYD ve KYD'nin etkileri değerlendirilmelidir. Yeraltındaki tesislerin sismik yükler altındaki performansları yapı-zemin ilişkisi modelleriyle, geçmiş depremlerdeki gözlemlere dayalı ampirik modellerle, kapalı formdaki analitik yöntemlerle ve sonlu elemanlar analizi gibi sayısal simülasyonlarla belirlenir. KYD genellikle küçük alanlarda görülmesine karşın borular üzerinde büyük hasar oluşturur. Buna karşın GYD tüm su dağıtım sistemini etkiler ancak borular üzerindeki hasar oranı düşüktür (Shi ve O'Rourke 2008). Boruların hasarları onarım oranı (OO) ile ifade edilir. OO bir su dağıtım sisteminde veya sistemin belli bir kısmında deprem sonucu yapılacak onarım sayısının toplam boru uzunluğuna oranıdır (onarım sayısı/km). Onarım oranı Geçici Yer Deformasyonlarında maksimum yer hızına ve boru cinsi ile boru çapına bağlıdır. Kalıcı Yer Deformasyonlarında ise zemin deplasmanına bağlıdır.



Tez kapsamında dört farklı onarım oranı kullanılmıştır. Bunlardan 0.2 ve 0.5 onarım oranları Geçici Yer Deformasyonunu göstermektedir. Onarım oranı 2.0 ve 4.0 Kalıcı Yer Deformasyonunu ifade etmektedir.

Çalışmada önce su dağıtım sistemlerinde hasar kavramı ve boru hasarları ele alınmıştır ve hasarın kırık ya da çatlak olduğu çatlak ise çatlak türü açıklanmıştır. Daha sonra sistemin hidrolik yeterliliği için önemli olan negatif basınç düzeltmesi açıklanmıştır. Kırık ve çatlakların şebeke üzerindeki sayı ve yerleri ile çatlak türünün önceden belirlendiği deterministik uygulama ve verilen onarım oranına bağlı olarak sistemde rastgele dağıtılmış hasarlar oluşturan olasılıksal yaklaşım ile boru hasarlarını kırık ve çatlak olarak simüle eden bir program olan GIRAFFE programının Sabit Monte Carlo (Monte Carlo Fixed) simülasyonu kullanılarak boru hasarlarının oluşturulması verilmiştir. Gerçek su dağıtım sistemleri ve literatürde kullanılan pek çok su dağıtım sistemi olmasına rağmen tez kapsamında varsayımsal sistemler kullanılmıştır. Bunun nedeni sistemlerin kontrollü bir şekilde oluşturulması, boru uzunluğu, boru çapı gibi özelliklerin istenilen şekilde belirlenebilmesidir. Bu doğrultuda ana bir hat üzerinde üç bölgeye ayrılan ve bir rezervuardan beslenen varsayımsal bir su dağıtım sistemi oluşturulmuştur. İlk sistem ana hat üzerinde iki ve üç kat büyütülerek, büyütülen sistemlere bir ya da iki rezervuar eklenerek ve ilk sistem ile iki ve üç kat büyütülmüş olan sistemlere ayrı bölgeyi birleştiren borular eklenerek dokuz adet varsayımsal su dağıtım sistemi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda sistemin büyütülmesinin, rezervuar eklenmesinin, boru eklenmesinin servis oranı ve graf indislerini nasıl değiştirdiği gözlenmiştir.

Tezin amacı, su dağıtım sistemlerinin deprem sonrası hizmet verebilme kapasitesini gösteren, hasar sonrası su iletebilen düğüm noktası sayılarının toplamının sistemin bütün düğüm noktası sayısına bölünerek elde edilen bir ölçüt olan GIRAFFE programının verdiği servis oranına göre sistemin deprem sonrası su iletebilme kapasitesini (performansını) belirlemek ve düğümler ile bu düğümleri birbirine bağlayan kenarlardan oluşan bir ağ sistemi olan grafların sağlamlığını, zayıflığını graftaki düğüm noktası ve kenarların birbirine göre durumlarını belirleyen Graf indisleri incelenerek servis oranı ile bu indisler arasındaki ilişkiyi belirlemektir.

## **1.1 Literatür Özeti**

Literatür özetinde kendi içerisinde farklı parametreler ele alınarak yapılan çalışmalar ayrı ayrı verilmiştir.

### **1.1.1 Deprem etkisi altında her bir boru hasarının etkilerini araştırmak için yapılan çalışmalar**

Wang ve Au (2009) deprem etkisi altında su temini sisteminin kritik bağlantılarını belirlemek için bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Deprem etkileri altında her bir boru hasarının etkilerini tanımlamak için iki şartlı olasılık niceliği olan Damage Consequence Index (DCI) ve Upgrade Benefit Index (UBI) indislerini kullanmışlardır. Bu indisleri hesaplamak için Monte Carlo simülasyonlarından yararlanmışlardır.

### **1.1.2 Deprem etkileri altında hasar oranı ve servis oranı arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar**

Kawakami (1992) çalışmasında hasar oranı ve servis oranını kullanarak deprem etkileri altında iki oran arasındaki ilişkiyi tanımlamak için yoğunluk fonksiyonu adında bir metod geliştirmiştir. Yoğunluk fonksiyonu beklenen değerdir ve servis oranının kovaryansdır, hasar oranının fonksiyonu olarak hesaplanır.

### **1.1.3 Deprem riski altında su temini sistemleri için fazlalık indisini inceleyen çalışmalar**

Javanbarg ve Takada (2007) deprem riski altındaki su temini sistemleri için sismik fazlalık indisini geliştirmişlerdir. Bu indis entropik bir ölçü olarak bir sistemin belirsizliğini ve fazlalığını göstermektedir. Sismik fazlalık indisi tasarımdaki optimum düzeni seçmek ve sismik riske karşı en iyi azaltmayı bulmak için sismik güvenilirlik ile kullanılabilir. Bu indis Kobe şehrinin su dağıtım sisteminin incelenmesinde kullanılmıştır.

#### **1.1.4 Su dağıtım sistemlerinin risk ve güvenilirliğinin değerlendirilmesinde basamaklandırma bozukluklarının etkisini inceleyen çalışmalar**

Su dağıtım sisteminin bir parçasında meydana gelen bozukluğun birbirine bağlı parçaların da bozulmasına neden olduğu anlamına gelen basamaklandırma bozuklukları ile ilgili yapılan çalışma aşağıda verilmiştir.

Duenas-Osorio ve Vemuru (2009) çalışmalarında kompleks altyapı sistemlerinin risk ve güvenilirlik değerlendirmesindeki basamaklandırma bozukluklarının etkisini incelemişlerdir. Basamaklandırma bozukluklarından dolayı aşırı yüklemeler bir tolerans parametresi ile modellenmiştir. Bu parametre pratik güç iletim sistemlerindeki akış talepleri için şebeke elemanının akış kapasitesini ölçmektedir.

#### **1.1.5 Su dağıtım sisteminin zemin sıvılaşması sonucu servis düzeyini inceleyen çalışmalar**

Chou ve diğ. (2013) Tayvan'daki Lan-Yan bölgesi su dağıtım sisteminin zemin sıvılaşması sonucu servis düzeyini GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) programı yardımıyla incelemişlerdir.

#### **1.1.6 Graflarla ilgili yapılan çalışmalar**

Graf teorisi grafları inceleyen bir matematik dalıdır. Graf, düğümler ve bu düğümleri birbirine bağlayan kenarlardan oluşan bir tür ağ sistemidir. Graflarla ilgili çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Gupta ve Prasad (2000) doğrusal graf teorisini boru şebeke analizi için kullanmışlardır. Doğrusal graf teorisini kullanan sayısal bir metod, borudaki akış ve basıncın kararlı durum analizi için gösterilmiştir. Bazı şebekeler önerilen metodun güvenilirliğini kontrol etmek için analiz edilmiştir.

Nardo ve Natale (2011) su temini sistemlerinin bölge ölçümü için graf tabanlı bir tasarım destek metodu kullanmışlardır.

Yazdani ve Jeffrey (2011) gerçek veya varsayımsal su dağıtım sistemlerinin graf teorisi temelli ağ analizleri kullanılarak hesaplayan bazı ölçütler ile sağlamlıklarını ve zayıflıklarını araştıran çalışmalar yapmışlardır.

Hawick (2012) bazı gerçek ve gerçek olmayan su dağıtım şebekeleri için graf teorik analizi ile sağlamlık ve parçalanma özellikleri üzerine çalışmıştır. Arasındalık metriğini ve şebeke bileşenlerini kullanarak en önemli bileşeni seçmiştir. Sekiz farklı su dağıtım sistemini kullanarak ölçüm özelliklerini rapor etmiştir.

Fragiadakis ve diğ. (2012) Kıbrıs adasının su şebekesini değerlendirmek için eskimiş su dağıtım sisteminin sismik risk değerlendirmesi için bir sistem sunmuşlardır. Yol numaralandırma metodu ve Monte Carlo simülasyonu yaklaşımları karşılaştırılırken şebeke güvenilirliği graf teorisi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Perez ve diğ. (2013) su dağıtım sistemi alanlarının göreceli önemini tespit etmek için graf teorisinin spektral ölçümleri üzerine bir metod geliştirmişlerdir. Su dağıtım alanları yarı denetimli kümelemenin esnek bir metodu kullanılarak analiz edilmiştir.

### **1.1.7 Su dağıtım sisteminin hasar görebilirliği ile ilgili yapılan çalışmalar**

Su dağıtım sisteminin hasar görebilirliği bir su dağıtım sisteminde veya sistemin belli bir kısmında deprem sonucu yapılacak onarım sayısının toplam boru uzunluğuna oranı olan onarım oranı (OO) ile ifade edilir. Hasar görebilirlik ile ilgili çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Stedinger ve Loucks (1982) su dağıtım sistemlerinin olası performansını değerlendirmek için üç kriter vermişlerdir. Bunlar güvenilirlik, dayanıklılık ve hasar görebilirliktir. Bu kriterler alternatif tasarım seçimi ve su kaynakları projelerinin geniş çeşitliliği için işletim politikalarını değerlendirmede kullanılmıştır.

Adachi ve Ellingwood (2008) çalışmalarında sismik yoğunluğun ve şebeke bütünlüğü üzerine bileşen kırılabilirliğinin etkisini değerlendirmişlerdir. Shelby County'deki elektrik ve su dağıtım sistemlerinin sismik hasar görebilirliğini ve şebekenin riskini gösteren bir çalışma yapmışlardır.

Bentes ve diğ. (2011) su dağıtım sistemlerinin hasar görebilirliğinin teorisini, sistemin hasar görebilir parçalarına dayanarak incelemişlerdir. üç tane su dağıtım şebekesi üzerinde sistemin hasar görebilirliği analiz edilmiştir.

Yazdani ve Jeffrey (2012a) su dağıtım sistemlerinin yapılış ve fonksiyonu arasındaki ilişkiyi göstermek ve bu sistemlerin hasar görebilirlik ve sağlamlık analizindeki yapısal ölçümlerin uygulamasını değerlendirmek için deterministik şebeke tabanlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Örnek bir su dağıtım sistemi üzerinde çalışılmıştır ve fazlalık, en uygun bağlanabilirlik ve yapısal sağlamlık gibi kavramlar ölçülmüştür.

### **1.1.8 Su dağıtım sisteminin güvenilirliği ile ilgili yapılan çalışmalar**

Su dağıtım sisteminde sağlanan suyun maksimum istenilen sudan büyük olma olasılığı güvenilirliği verir. Bir su dağıtım sisteminin güvenilirliği sistemdeki düğüm noktalarından normal ve anormal şartlar altında yeterli basınçla birlikte yeterli suyu alabilme olasılığıdır. Güvenilirlik ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Kameda ve diğ. (1984) sismik hasarı, sistem güvenilirliğini ve su dağıtım sisteminin deprem sonrası iyileşmesi boyunca servis oranının çeşitliliğini değerlendirmek için kapsamlı bir metod geliştirmişlerdir. Mühendislik için yararlı güvenilirlik ölçüleri ve gerçek depremlerdeki hasarın ışığında sistem modelleri oluşturulmuştur. 1978 Miyagiken-Okı depremi boyunca Sendai şehrinin su dağıtım sisteminin hasar verisi kapsamlı olarak kullanılmıştır.

Awumah ve Goulter (1990) güvenilirlik ve fazlalığın ölçümü için entropi tabanlı bilgiler rapor etmişlerdir. Düğüm noktası güvenilirliği ile şebekenin kademesi ve bağlantı hatası şartları için yeterli basınçla beslenen akışın yüzdesi ölçülüp parametrelerle karşılaştırılarak ölçüler değerlendirilmiştir. Entropi ölçüleri şebeke

güvenilirliğindeki değişiklikleri yansıtmak için gösterilmiştir ve iki karşılaştırma parametresi ile ölçülmüştür.

Javanbarg ve Takada (2010) Osaka şehrinin su dağıtım sisteminin 1995 Kobe depremi sonrası sismik güvenilirliğini, kullanılabilirlik ve servis düzeyi göstergeleriyle incelemişlerdir.

Shoji ve Tabata (2011) Tokyo şehrindeki elektrik, gaz ve su dağıtım sistemlerinin sismik risk altında sismik güvenilirliğini ortalama derece ( $q$ ), karakteristik yol uzunluğu ( $L$ ), kümeleme katsayısı ( $C$ ), en büyük kümelemenin göreceli büyüklüğü ( $S$ ), izole edilmiş kümelemelerin ortalama büyüklüğü ( $s$ ) ve ulaşabilirlik oranı ( $R_a$ )'yı kullanarak değerlendirmişlerdir.

Yazdani ve Jeffrey (2012b) su dağıtım sistemlerinin arızalarına karşı güvenilirlik ve sağlamlığı su dağıtım sisteminin tasarımı ve işleyişinin temel ilkeleri olarak kabul etmişlerdir. Su dağıtım sistemlerini sistem bileşenlerinin fiziksel ve hidrolik özelliklerini kullanarak ağırlıklı ve yönlü şebekeler olarak modellemişlerdir. Bileşen ve şebeke bazında karşılaştırma sistemlerinin yapısal özelliklerini ölçmek için betimleyici ölçümlerden yararlanmışlardır.

Yoo ve diğ. (2013) depreme karşı su dağıtım sistemlerinin sistem sağlamlık değerlendirme modelini geliştirmişlerdir. Bu amaç için olası sismik senaryolar altında sistem bileşenlerinin göreceli önemini incelemek için tekrarlı olasılık simülasyonları yapılmıştır. Olasılıksal sismik simülasyonlar için Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Sismik hasarlar, sistem servis oranı, düğüm noktası servis oranı ve su bulunabilirliği gibi birkaç sağlamlık indisi kullanılarak ölçülmüştür. Önerilen metod, geçmiş sismik bilgiler kullanılarak Güney Kore'deki gerçek bir şebeke için uygulanmıştır.

### **1.1.9 Su dağıtım sistemlerinin performans değerlendirmesi için yapılan çalışmalar**

Su dağıtım sisteminin performansı, su dağıtım sisteminin depremden sonra su iletebilme kapasitesinin bir ölçüsüdür. Deprem sonucunda su iletebilen düğüm

noktası sayısının toplam düğüm noktası sayısına oranı ile elde edilir. Performans ile ilgili çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Wagner ve diğ. (1988) su dağıtım sistemlerinin performansı için olasılıksal güvenilirlik ölçüleri olan ulaşılabilirlik ve bağlanabilirlik üzerine çalışmışlardır.

Hwang ve diğ. (1998) Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımı ile bir su dağıtım sisteminin sismik performansının değerlendirilmesi için bir metod sunmuşlardır. Önerilen metotta yer sarsıntısı ve toprak sıvılaşmasından dolayı oluşan boru hasarı değerlendirilmektedir. Çalışmada önerilen metod kullanılarak Memphis'deki su dağıtım sisteminin sismik performansı değerlendirilmiştir.

Duenas-Osorio ve diğ. (2007) çalışmalarında gerçek birbirine bağlı şebekelerin performansı üzerine sismik bozulmanın etkilerini araştırmışlardır. Birbirine bağlılığın birkaç derecesi keşfedilmiştir. Birbirine bağlı şebeke kırılma eğrileri tanıtılmıştır.

Toprak ve diğ. (2009) Pamukkale ve Karakova-Akhan fayı ile ilişkili 6, 6.3, 6.5 ve 7 büyüklüklerindeki depremler durumunda Denizli'deki su dağıtım sisteminin performansını değerlendirmişlerdir. Geçici ve Kalıcı Yer Deformasyonlarının birbirine göre büyüklükleri hangisinin boru üzerinde daha etkili olacağını belirlemektedir. Farklı büyüklükteki depremlerin göreceli etkisi ve bir depremi izleyen boru hattı performansı değerlendirilmiştir.

Romero ve diğ. (2010) Los Angeles su dağıtım sistemi üzerinde sismik riskleri, fay kırılmasını, toprak kaymasını, sıvılaşmayı ve zemin büyümesini incelemişlerdir. Su temini simülasyon sonuçları San Andres fayı üzerindeki 7.8 büyüklüğündeki bir deprem için gösterilmiştir. 24 saat sonra ciddi su kayıpları görülmüştür. Boru hattının yaklaşık 2700 yerinde hasar oluşmuştur ve normal su iletiminde %66 azalma olmuştur. Su temini sistemi, su kalitesi standartlarını karşılamak için sistemden kaldırılan rezervuarlar olmadan modellenmiştir.

Muranho ve diğ. (2013) su dağıtım şebekelerinin işlevsel performansını değerlendirmek için teknik performans indislerinin kullanımını incelemişlerdir. Boru parçalanma ya da yangın söndürme senaryoları boyunca işlevsel performans değerlendirmesini tanımlamışlardır.

Dziedzic ve Karney (2014) metrik tabanlı üç enerji verimini ve şebeke performansını değerlendirmek için yapısal bir metriği tanımlamışlardır. Bunlar örnek bir şebeke için farklı şekil ve senaryolar ile hesaplanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan varsayımsal sistemler kontrollü bir şekilde oluşturulmuştur ve sadece belli özellikleri değişmektedir. Literatürde yer alan ve gerçek olan sistemler bu şekilde kontrollü değişikliklere izin vermemektedir. Tez kapsamında temel bir sistem kontrollü olarak değiştirilip yeni sistemler oluşturulmuştur ve bu değişikliklerin etkisi literatürde mevcut olan ve gerçek sistemlere göre daha net görülmektedir. Dört farklı onarım oranı kullanılarak sayısı iki bine kadar çıkan Monte Carlo simülasyonu yapılmıştır. Literatürde daha önce su dağıtım sistemleri için kullanılmayan elli bir adet graf indisi kullanılarak su dağıtım sistemlerinin performans analizi yapılmıştır.

## **1.2 Tezin Organizasyonu**

Tezin birinci bölümünde, konu ile ilgili genel bilgiler verilmiş, ele alınan problem tanımlanmış ve konu ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Ayrıca tezin amacı, kapsamı ve kullanılan yöntem açıklanmıştır.

İkinci bölümde, deprem etkisiyle boru hasarları anlatılmış, GIRAFFE programı ve onunla ilgili parametreler tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, su dağıtım sistemlerinin performansı bazı parametreler ve ellibir adet graf indisi kullanılarak değerlendirilmiştir. GIRAFFE ile yapılan Monte Carlo simülasyonlarının dört farklı onarım oranına göre simülasyon sayıları verilmiştir. Ayrıca tez kapsamında performans değerlendirilmesi amacı ile kullanılan pearson ve spearman korelasyonları hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, dokuz adet varsayımsal su dağıtım sisteminin özellikleri tanıtılmıştır.

Beşinci bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar verilmiştir.



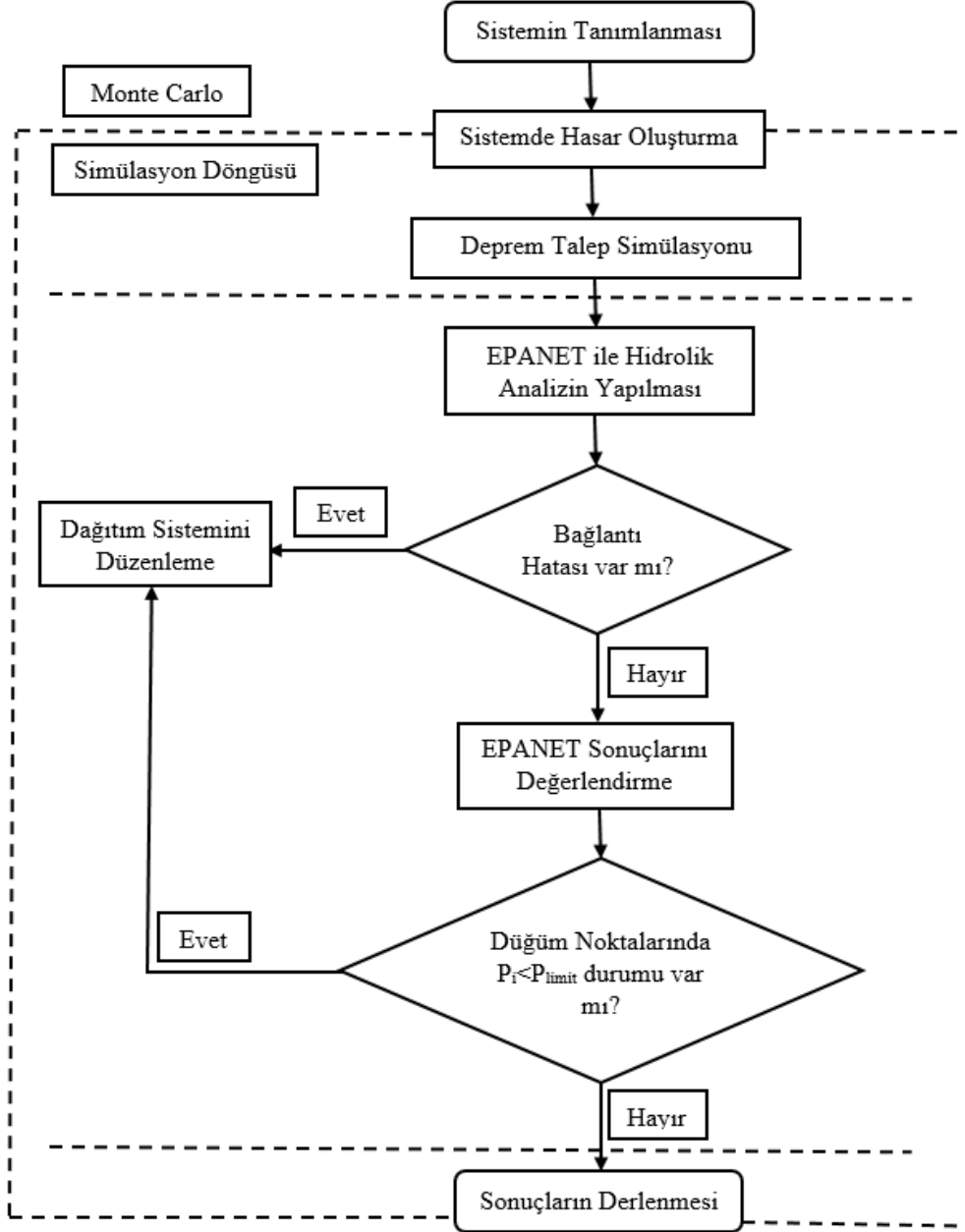
## 2. DEPREM ETKİSİYLE BORU HASARLARI

Gömülü boruların deprem sonucu hasarı Geçici Yer Deformasyonları (GYD) veya Kalıcı Yer Deformasyonları (KYD) ile olur. GYD deprem dalgasının yayılması veya yerin sarsılması sonucu oluşan ve kalıcı olmayan deplasmanlar iken KYD ise yüzey kırıkları, sıvılaşma, toprak kayması ve kohezyonsuz zeminlerin farklı oturması sonucu oluşan kalıcı deplasmanlardır. GYD ve KYD'nin birbirine göre büyüklükleri hangisinin boru üzerinde daha etkili olacağını da belirler (Toprak ve diğ. 2009). KYD genellikle küçük alanlarda görülmesine karşın borular üzerinde büyük hasar oluşturur. Buna karşın GYD tüm su dağıtım sistemini etkiler ancak borular üzerindeki hasar oranı düşüktür (Shi ve O'Rourke 2008).

Su dağıtım sistemleri istenen debi ve basınçtaki suyu tüketicilere sağlar. Kaynaktan tüketiciye kadar suyu ileten dağıtım sistemi rezervuarlar, depolar, borular, pompalar, vanalar vs.' den oluşur. Gerçek bir su dağıtım sisteminde su, boru boyunca tüketiciler tarafından çekilir. Ancak su dağıtım sisteminin matematik modelinde boru birleşimleri su tüketim noktaları olarak kabul edilir. Su dağıtım sisteminin fiziksel bileşenlerinin, düğüm noktaları ve ayrıtlar olarak temsil edildiği hidrolik ağ, bir su dağıtım sisteminin matematik modelidir. Borular hidrolik ağda ayrıtlar ile temsil edilir, boru birleşimleri ise düğüm noktalarıdır (Koç ve diğ. 2015). Araştırmalar bir su dağıtım sisteminin depremde en çok hasar gören bileşenin gömülü borular olduğunu göstermektedir (ATC 1991). Dolayısıyla bu çalışmada dağıtım sisteminin hasarı yalnızca boru hasarları ile temsil edilmiştir. Bu çalışmada, GIRAFFE (Graphical Iterative Response analysis for Flow Following Earthquakes) programı ve onun metodu boru hasarlarını ve negatif basınç düzeltmesini simüle etmek için kullanılmıştır. GIRAFFE, hasar görmüş su dağıtım sistemlerinin hidrolik analizi için Cornell Üniversitesi'nde geliştirilmiştir (Cornell Üniversitesi 2007). Söz konusu yazılım, basınçlı boru ağlarının hidrolik ve su kalitesi davranışlarını geniş bir periyotta simüle edebilen bir yazılım olan EPANET programıyla birlikte çalışır (EPA 2000).

## 2.1 GIRAFFE

GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes), hasarların su dağıtım sistemindeki yerlerini deterministik ve Monte Carlo simülasyonları ile belirleyen bir programdır. Deterministik simülasyon için GIRAFFE şebekeye deterministik olarak hasar ekler ve hasarlı şebeke üzerinde hidrolik analiz yapar. Hasar sayısı hem depremin şiddetine hem de borunun cinsine bağlıdır. Monte Carlo simülasyonu için kullanıcılar ya yapılacak simülasyon sayısını belirlerler ya da kendi kendini sonlandıran algoritmayı kullanarak otomatik olarak simülasyonun çalışmasına izin verirler. GIRAFFE'nin ilk sürümü MS-DOS ortamında çalışmak için tasarlanmıştır. GIRAFFE'nin 2 ve 3 sürümleri kullanıcıya kolaylık sağlamak için grafiksel kullanıcı ara yüzü ile donatılmıştır. Tez kapsamında boru hasarları Sabit Monte Carlo (Monte Carlo Fixed) simülasyonu kullanılarak simüle edilmiştir. Tam bir GIRAFFE simülasyonu beş ana bölümden oluşur (Şekil 2.1). Bunlar sistem tanımı, sismik hasar, deprem talep simülasyonu, hidrolik şebeke analizi ve sonuçların derlenmesidir. Bu fonksiyonlar aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2. 1: GIRAFFE Simülasyon Akış Şeması (Shi 2006)

**Sistem Tanımı:** Sistem tanımlama modülü analiz edilecek hidrolik sistemi tanımlar, fiziksel ve işlevsel özellikler, topoloji ve sistemin talepleri üzerine bilgi verir. Kullanıcılar sistem tanımlama için EPANET'in grafiksel kullanıcı arayüzünü kullanabilirler ve sistem tanımlama dosyasını buradan elde edebilirler.

**Sistem Hasarı:** Genel olarak boru kırıkları ve çatlakları modellenilebilir. Bir boru çatlağı 5 bölümde sınıflandırılabilir.

1. Ek Yeri Ayrılması
2. Çevresel çatlak
3. Boyuna çatlak
4. Boru duvarının yerel kaybı
5. Boru duvarının yerel yırtığı

Bir boru çoklu kırık ve çatlaklara sahip olabilir. Boru hasarı için deterministik ve probabilistik olmak üzere iki simülasyon seçeneğı vardır. GIRAFFE hasarlı boru hatlarından zamanla su kayıplarının hesaba katılması ile tankların deprem performansını da içerir. Tank performansı göz önüne alındığında, hidrolik simülasyon, kullanıcılar tarafından ayarlanan farklı zaman adımlarına bölünür. Her bir zaman adımı içinde, GIRAFFE sabit olarak belirlenmiş tank seviyeleri için kararlı durum hidrolik simülasyonunu yapar. Sonraki bir zaman adımındaki tank seviyeleri, mevcut tank su seviyeleri, tank çatlakları ve tank kesit alanlarına göre güncellenir.

**Deprem Talep Simülasyonu:** Deprem talep simülasyonu, hidrolik şebeke modelinde bulunmayan küçük çaplı dağıtım boru hatları için hasarın etkilerini artan düğüm noktası talepleri ile göz önüne alır. Düğüm noktası taleplerinin artışı kırılma eğrisi ile simüle edilir. Kırılma eğrisi Los Angeles su dağıtım sisteminin Monte Carlo simülasyonları üzerine geliştirilmiştir. Deprem talebi kırılma eğrisi ile probabilistik olarak simüle edildiğinden dolayı deprem talep simülasyonu sadece probabilistik simülasyonlar için çalışabilir.

**Hidrolik Şebeke Analizi:** Bu bölüm hasarlı hidrolik şebekeyi çözmek ve negatif basınçları yok etmek için EPANET programını kullanır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi hasarlı sistem, hidrolik şebeke analizi için EPANET'e gönderilir. Bazı elemanların deprem hasarından dolayı ana sistem ile bağlantısı olmadığı için hasarlı sistem çözülemez. Bu durumda EPANET, ana sistemle bağlantısı olmayan her bir elemanı kullanıcıya söyleyen hata mesajı verir. GIRAFFE hata mesajlarını okur ve

veri tabanından bağlantısız elemanları yok ederek hataları düzeltir. Sonra GIRAFFE düğüm noktası basınçlarını kontrol eder ve sistemdeki en düşük düğüm noktası basıncını tanımlar. Eğer en düşük basınç, negatif basıncı yok etmek için önceden GIRAFFE'a sıfır olarak girilmiş basınç sınırından daha yüksek ise hidrolik analiz durur. Eğer en düşük basınç, basınç sınırından daha düşükse, program düğüm noktalarını, bu düğüm noktasına bağlanan boruları ve düğüm noktası ile borularla ilişkili işlevsel parametreleri yok eder. Yok etmenin her bir adımından sonra GIRAFFE yeniden bir hidrolik şebeke analizi yapar ve sistemdeki basınç sınırından daha düşük basınç kalmayana kadar bu işlem devam eder. GIRAFFE'da programın esnekliğini arttırmak için basınç sınırını ayarlama kullanıcı müdahalesi gerekir. Örneğin, yangın söndürmek için yetersiz basınçlı alanlar, yangın söndürme amacı için gerekli bir basınç sınırı belirlenerek tanımlanabilir.

**Sonuçların Derlenmesi:** Bu modül CBS ile uyumlu formatta hidrolik analiz sonuçlarını toplar. Aynı zamanda sistem performansını ölçmek için bir ölçüt olan servis oranını verir.

### 2.1.1 Servis Oranı

Servis oranı, depremsel hasar senaryosu için sağlanabilen debinin her bir düğüm noktasından çekilen debilerin toplamına oranı olarak tanımlanır (Denklem 2.1).

$$S_s = \frac{Q_T}{Q_T^*} \quad (2.1)$$

$S_s$  servis oranı,  $Q_T$  sağlanabilen debi ve  $Q_T^*$  her bir düğüm noktasından çekilen debilerin toplamıdır.

Servis oranı, her bir talep noktası için ve bütün sistem için hesaplanabilir. Deterministik bir simülasyonda, her bir talep noktası için servis oranı, eğer bu talep noktası negatif basınç ya da bağlantı problemlerinden dolayı izole edilmişse ya sıfırdır ya da bu talep sağlanabiliyorsa 1'dir. Bir probabilistik simülasyon için sistem servis oranı, matris biçiminde rapor edilir. Her bir Monte Carlo simülasyonunda servis oranı her bir talep noktası için ve bütün sistem için elde edilir. Eğer kullanıcılar tank

performansını dikkate almak için zaman serisi simülasyonu yaparsa, çıktıları her bir zaman adımı için verir.

## **2.2 GIRAFFE Girdiler ve Çıktılar**

GIRAFFE simülasyonları için girdiler, bazı kontrol parametrelerini ve veri dosyalarını içerir. Kontrol parametreleri en düşük basıncı yok etmeyi, zaman uzunluğunu, tank su seviyelerini ve simülasyon seçeneklerini güncellemek için zaman adımını belirler. Girdi veri dosyaları, sistem tanımı, boru hasarı oluşturma ve deprem talep simülasyonu için dosyaları içerir. GIRAFFE simülasyonlarından asıl çıktıları, düğüm noktaları, tanklar, borular, pompalar ve vanaları içeren sistem bileşenlerinin hidrolik analiz sonuçlarıdır ve hasarlı sistemin servis oranıdır. Girdi parametreleri, veri dosyaları ve çıktı dosyaları bu bölümde tanıtılmıştır.

### **2.2.1 Girdiler**

GIRAFFE hem deterministik hem de probabilistik simülasyonları yapabilir. Kullanıcılar ya Monte Carlo simülasyon çalışma sayısını belirleyebilir ya da kendi kendini sonlandıran algoritmayı kullanarak simülasyon çalışmalarının sayısını programın belirlemesine izin verir. Hem deterministik hem de probabilistik simülasyonlar için kullanıcıların sistem tanım dosyasını, en düşük basınç değerini, tank su seviyelerini güncellemek için toplam zaman uzunluğunu ve tank su seviyelerini güncellemek için zaman adımını belirlemede bazı kontrol parametrelerini girmesi gerekir.

### 2.2.2 Kontrol Parametreleri

GIRAFFE programının başlatılması ile, kullanıcıların bir simülasyon türünü seçmesini isteyen bir pencere görünür. Bu pencerede Deterministik (Deterministic), Sabit Monte Carlo (Monte Carlo Fixed) ya da Esnek Monte Carlo (Monte Carlo Flexible) seçenekleri vardır. Tablo 2.1’de üç simülasyon seçeneğinin her biri için gerekli kontrol parametreleri verilmektedir.

**Tablo 2.1:** GIRAFFE Kontrol Parametreleri (Cornell Üniversitesi 2007)

İsim	Açıklama
System Definition File	.inp uzantılı EPANET sistem tanım dosyasının adıdır. Dosya adı en fazla 80 karakter olabilir.
Minimum Pressure to Eliminate	GIRAFFE’in sistemden düğüm noktası ve onlara bağlı boruları yok ettiği psi birimindeki basınç sınırıdır. Negatif basıncı yok etmek için genellikle 0 girilir.
Simulation Time	Tank su seviyelerini güncellemek için simülasyon zamanının toplam uzunluğudur. Kararlı durum için 0’ dır.
Simulation Time Step	Tank su seviyelerini güncellemek için zaman adımıdır. Kararlı durum simülasyonu için 1’ dir.

### 2.2.3 Sabit Monte Carlo Simülasyonu

Eğer kullanıcı “Monte Carlo Fixed Number” simülasyonunu seçerse GIRAFFE, kullanıcı tarafından belirlenen simülasyon sayısı ile birlikte Monte Carlo simülasyonunu yapar. GIRAFFE probabilistik boru hasarı oluşturmak için dosya depolama bilgilerinin girdi ismini kullanıcıya sorar. Kullanıcıların ihtiyacı olan girdi parametreleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

**Tablo 2.2:** Sabit Monte Carlo Simülasyonu için Girdi Parametreleri (Cornell Üniversitesi 2007)

İsim	Açıklama
Pipe Repair Rate File	Probabilistik boru hasarı oluşturmak için girdi dosyasının ismidir. Maksimum 80 karakterdir.
Number of Simulations	1'den 100'e kadar değişen Monte Carlo simülasyon zamanıdır.
Random Seed	Rastgele sayı üretmek için kaynaktır.
Nodal Demand Calibration	Deprem talebini simüle etmek ya da etmemek için seçenekleri seçmektir. Simülasyon olacaksa "Yes" olmayacaksa "No" seçilir.
Regression Equation	Nodal Demand Calibration için "Yes" seçiliyorsa bu değer gereklidir. Deprem talep simülasyonu için seçenekler "Mean Prediction Plus Noise Terms" ya da "%90 Confidence Level Prediction"dır.
Mean Pressure File	(Eğer "Nodal Demand Calibration" için "Yes" seçildiyse bu değer gereklidir). Deprem talep değerlendirmesi için girdi dosyasının adıdır. Maksimum 80 karakterdir.

Bu dosya sekme ile ayrılmış bir metin dosyasıdır ve kullanıcılar girdi dosyası oluşturmak için Microsoft Word, Excel ya da Not defterini kullanabilirler ve inp uzantılı olarak kaydedebilirler. Her bir boru hattının kayıtlarının ardından probabilistik boru hasarı dosyası bir başlık ile başlar. Kullanıcılara, kendi dosyalarına başlığı kopyalamaları önerilir. Boru hasarı oluşturma dosyasındaki başlık terimleri Tablo 2.3' de açıklanmıştır.

**Tablo 2.3:** Probabilistik Boru Hasarı Girdi Dosyasındaki Sütunların Tanımlanması (Cornell Üniversitesi 2007)

İsim	Tip	Açıklama
PipeID	char	Kullanıcıların hasar vermek istedikleri borunun adıdır. Kullanıcılar sistem tanım dosyasındaki bu boruyu kullanacaklarından emin olmalıdır. Aksi takdirde program doğru çalışmaz. Maksimum 30 karakterdir.
Length	float	Borunun km cinsinden uzunluğudur. Her bir borunun uzunluğu sistem tanım dosyasından elde edilebilir.
RR	float	Boru uzunluğunun km başına onarım oranıdır. Pik yer hızı ve kalıcı yer deformasyonu gibi sismik risk parametreleri ile ilişkilidir. Her bir boru hattı için onarım oranının belirlenmesi CBS kullanılarak yürütülen konumsal manipülasyonu gerektirir.
Material	char	Boru hattının malzemesidir. CI: dökme demir, DI: düktil demir, RS: perçinli çelik, CON: beton boru, STL: kaynaklı çelik ve N/A: boru hattının yukarıda belirtilen 5 tipinin yanı sıra diğer tipleridir.



#### **2.2.4 Monte Carlo Simülasyonlarının Çıktısı**

GIRAFFE için asıl çıktılar, düğüm noktaları, tanklar, borular, pompalar ve vanaları içeren şebeke fiziksel bileşenlerinin her bir tipi için hidrolik analiz sonuçlarıdır. Monte Carlo simülasyonunun ana çıktıları sistem servis oranıdır. Sistem servis oranı bilgisi “Serviceability\*.out” dosyasında ve matris formatında verilir. Her bir Monte Carlo simülasyon çalışması için servis oranı, her bir talep noktası için ve tüm sistem için rapor edilir. Bütün Monte Carlo simülasyon çalışmaları için düğüm noktası ve sistem servis oranı ortalaması hesaplanır. GIRAFFE düğüm noktalarının, tankların, boruların, pompaların ve vanaların sonuçlarını “JunctionResults\_Time\*.out”, “TankResults\_Time\*.out”, “PipeResults\_Time\*.out”, “PumpResults\_Time\*.out” ve “ValveResults\_Time\*.out” olarak rapor eder.

#### **2.3 Boru Hasar Modellemesi**

Hidrolik şebeke analizi kullanılarak, hasarlı bir su dağıtım sistemindeki akış ve basıncı öngörmek için, çatlak ve kırıkları içeren boru hattı hasarının, hasarlı sistemin hidrolik simülasyonu tarafından izlenen şebeke içine eklenmesi gerekir. GIRAFFE, boru hasar modellemesi için detaylı analiz imkanı sunar. American Lifelines Alliance (ALA) tarafından boru hatları için belirlenen depremsel ilkeler doğrultusunda kırık, bir boru hattının tamamen bölünmesi olarak tanımlanır. Kırılmış borunun iki komşu parçası arasından akış geçmez. Çatlak ise bir boru hattındaki küçük bir açıklık olarak tanımlanır ve boru hattı boyunca su geçmeye devam eder. Çatlak boyunca basınç ve debide bir kayıp olsa da su iletilir. Çatlaklar borudaki delikleri, parçalı boru hatları üzerinde çok küçük eklem yeri ayrılmalarını ve büyük çapta çelik boru hatlarındaki çok küçük çatlamları içerir. Kırık bir boru, su iletim fonksiyonunu tamamen kaybederken çatlaklı bir boru fonksiyonunu kısmen kaybeder.

### 2.3.1 Boru Çatlak Simülasyonu

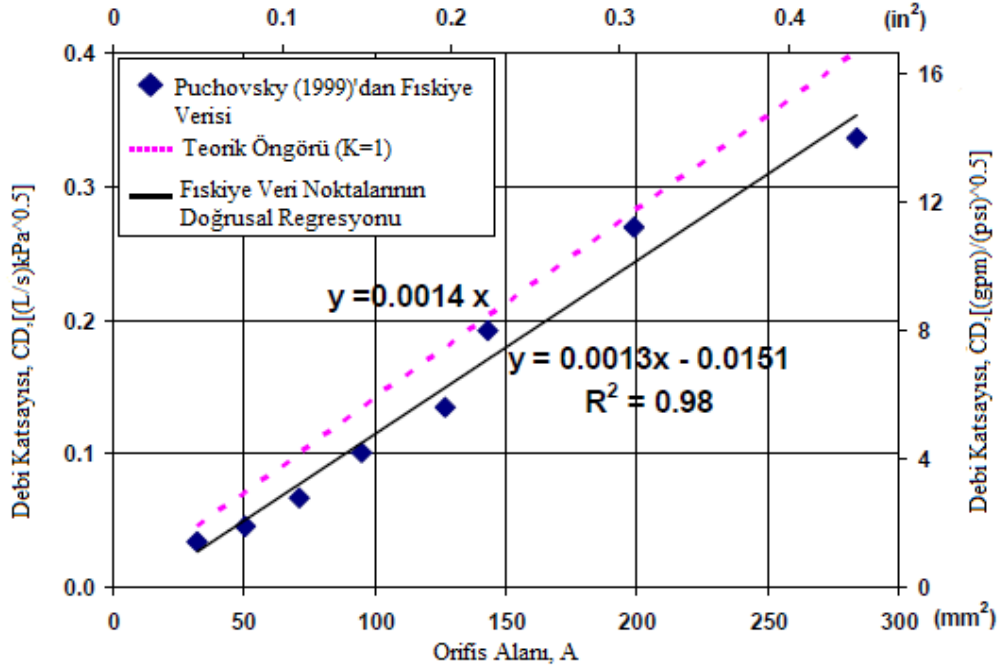
Bu bölüm GIRAFFE’da kullanılan çatlak simülasyonunun yöntemini vermektedir. Burada bir çatlağın hidrolik modeli açıklanmaktadır. Çatlaklar 5 farklı sınıfa ayrılır. Bunlar ek yeri ayrılması, çevresel çatlak, boyuna çatlak, boru duvarının yerel kaybı ve boru duvarının yerel yırtılmasıdır. Çatlak alanı boru çapının bir fonksiyonu olarak ifade edilir.

#### 2.3.1.1 Hidrolik Model

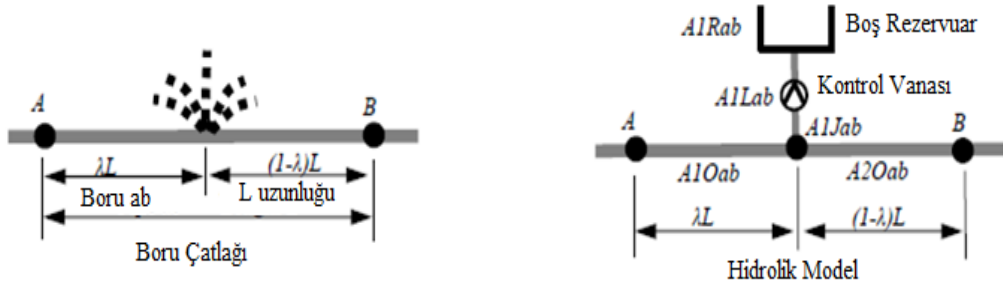
Bir boru çatlağı esas olarak boru duvarındaki ya da boru birleşme yerindeki bir orifistir ve suyun çevredeki toprağa tahliye edilmesine izin verir. Bir boru çatlağı, bir ucu çatlak boruya bağlı ve diğer ucuna boş bir rezervuar eklenip atmosfere açılan hayali bir boru olarak simüle edilir. Hayali boru içine sadece çatlak borudan rezervuara akışa izin veren çekvalf yerleştirilmiştir. Çatlaktaki bütün enerji kayıpları yersel kayıplarla oluşur. Hayali borunun çapı çatlak alanı tarafından belirlenir. Bu hidrolik modele dayalı bir çatlaktan su kaybı:

$$Q = [2g/(K\gamma_w)]^{0.5}AP^{0.5} = (2g/\gamma_w)^{0.5}AP^{0.5} = C_D P^{0.5} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 ile hesaplanır.  $Q$  debi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $K$  yersel kayıp katsayısı (1 alınır),  $A$  orifis alanı,  $P$  boru iç basıncı  $C_D$  debi katsayısı  $(2g/\gamma_w)^{0.5}A$ ’ya eşittir. Boru çatlağı, bir fiskiyeye benzetilebilir. Su akışı Denklem 2.2’de verilen akım denklemi tarafından yönetilir. Modeli doğrulamak için fiskiye verisinin bir dizisi ile debi katsayısı  $C_D$  ve orifis alanı  $A$  Denklem 2.2’den  $C_D$  ve  $A$  arasındaki teorik ilişkiyi test etmek için kullanılır. Şekil 2.2’deki karşılaştırma gösteriyor ki teorik tahminler ve gerçek veri birbirine yakındır. Gerçek fiskiyelerin  $C_D$  si teorik  $C_D$  ’den %10 daha düşüktür. Model bütün sürtünme kayıplarını dikkate almadığı için daha büyük debide su kaybına neden olurken, kısa bir uzunluğa sahip gerçek fiskiyelerin sürtünme kaybı dolayısıyla debide küçük bir azalma meydana gelir. Şekil 2.3 GIRAFFE’deki boru çatlak modelinin uygulamasını göstermektedir.



Şekil 2.2: Model Tahminleri ve Fıskiye Verisi Arasındaki Karşılaştırma (Shi 2006)



Şekil 2.3: Çatlak Simülasyonu için Hidrolik Model (Cornell Üniversitesi 2007)

AB borusunda bir çatlak meydana geldiği varsayılır. Memba noktası A ve mansap noktası B'ye bağlı olarak AB'nin uzunluğu  $L$ 'dir.  $\lambda L$  mesafesinde bir çatlak meydana geldiği varsayılır.  $\lambda$  bir sabittir ve uzunluk oranı olarak ifade edilmektedir. GIRAFFE, çatlağı aşağıda açıklanan 4 adımda simüle eder:

1. Şebekeden AB borusu silinir,
2. Çatlağın bulunduğu noktaya A1Jab isimli yeni bir düğüm noktası eklenir ve bu noktanın kotu A ve B noktalarının yüksekliklerinin doğrusal enterpolasyonu ile tanımlanır,
3. AB borusu ile aynı çap ve aynı pürüzlülüğe sahip orijinal borunun yerini alan A1Oab ve A2Oab adında iki yeni boru eklenir. Boru A1Oab düğüm noktası A ve düğüm noktası A1Jab'ye bağlanır ve boru A2Oab düğüm noktası A1Jab ve düğüm noktası B'ye bağlanır. Yeni eklenen düğüm noktası A1Jab ile aynı yüksekliğe sahip A1Rab adında boş bir rezervuar eklenir,
4. Yeni eklenen düğüm noktası A1Jab ve rezervuar A1Rab'ye bağlı A1Lab adında bir boru eklenir. A1Lab borusunun uzunluğu 0.5 feet olarak, pürüzlülüğü 1000000 ve yersel kayıp katsayısı 1 olarak ayarlanır. A1Lab borusunun bütün enerji kayıpları yersel kayıp olarak hesaplanır. A1Lab borusunda bir kontrol vanası kurulur ve su sadece çatlamış borudan boş rezervuara akar.

### **2.3.1.2 Çatlak Sınıflandırması**

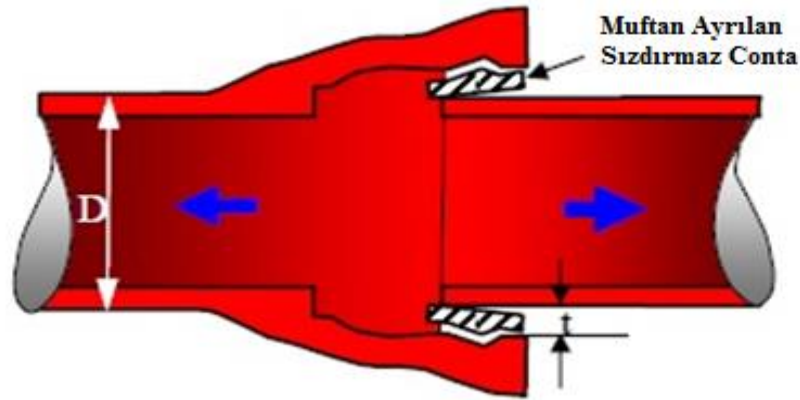
Çatlak simülasyon modelinin en önemli parametresi orifis alanıdır ve sismik yükleme karakteristiklerinin yanı sıra boru malzemesine bağlıdır. Orifis alanı hesabında malzeme özellikleri, ortak karakteristikler ve hasar mekanizmaları, Kuzey Amerika'da boru hatlarında yaygın olarak kullanılan beş malzeme ve birleşim türü (dökme demir, düktil demir, beton, perçinli birleşmiş çelik ve kaynaklı birleşmiş çelik) için Shi (2006) tarafından detaylı bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın temelinde çatlaklar beş farklı tipte sınıflandırılmıştır. Tablo 2.4'de beş farklı boru çatlağı, çatlağın nedenleri ve yerleri verilmiştir.

**Tablo 2.4:** Boru Çatlak Tipleri, Nedenleri ve Yerleri

Çatlak Tipi	Çatlak Nedeni	Çatlak Yeri
Ek Yeri Ayrılması	Eksenel Çekilme	Ek Yeri
Çevresel Çatlak	Eğilme ve Gerilme Kuvvetleri	Boru Gövdesi veya Birleşim Yeri
Boyuna Çatlak	Dış Yükleme ve Yüksek İç Basınçlar	Boru Gövdesi veya Ek Yeri
Boru Duvarının Yerel Kaybı	Korozyon	Boru Duvarının Herhangi Bir Yeri
Boru Duvarının Yerel Yırılması	Basınç Kuvvetleri	Birleşim Yerleri

### 2.3.1.2.1 Ek Yeri Ayrılması

Sismik yükleme boyunca birleşme yerinin eksenel çekilmesinden kaynaklanarak parçalı boruların ek yerinin ayrılmasıdır. Ek yeri ayrılmasının şematik çizimi Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.4:** Ek Yeri Ayrılmasının Şematik Çizimi (Shi 2006)

Bu çatlak türü dökme demirde, düktil demirde, beton borularda ve perçinli çelik borularda meydana gelebilir. Çevre boyunca ek yeri ayrılmasından açıklık meydana gelir ve onun alanı, birleşme yeri biçimi, göreceli çekilme hareketi ve conta ya da dolgu malzemesi tarafından belirlenir. Ek yeri ayrılmasının açıklık alanı, eşdeğer orifis alanı olarak alınmıştır (Denklem 2.3). Maksimum olası dairesel alan bir alan indisi ile ilişkilidir.

$$A = k \times A_{max} \quad (2.3)$$

$A$  eşdeğer orifis alanı  $A_{max}$  maksimum dairesel alan ve  $k$  bir sabittir.  $A_{max}$ 'a ek yerinin şekli ile karar verilirse:

$$A_{max} \approx tD\pi \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 ile hesaplanır.  $D$  boru çapı ve  $t$  maksimum olası dairesel açıklığın kalınlığı Denklem 2.3'de Denklem 2.4 yerine konulursa:

$$A = k \times A_{max} = tkD\pi \quad (2.5)$$

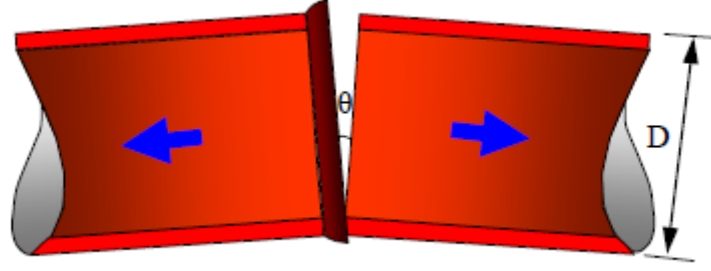
Denklem 2.5 elde edilir. Bir çatlak, hidrolik şebeke analizinde hayali bir boru hattı olarak modellendiğinden dolayı, orifisin eşdeğer orifis alanına eşit kesit alanlı bir boru haline dönüştürülmesi gerekir. Bu çalışmada hayali borunun çapı eşdeğer orifis çapıdır ve

$$d = \sqrt{4A/\pi} = 2\sqrt{tkD} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6 ile hesaplanabilir. GIRAFFE'da maksimum olası dairesel açıklık  $t=10$  mm (0.4 in.) olarak alınmaktadır ve birleşme yeri ayrılmasının meydana gelebildiği boru hatlarının 4 tipi için birleşme yeri yapılandırmasında Shi (2006) tarafından yürütülen çalışmalara dayanmaktadır.  $k$  önceki depremlerdeki gözlemlere dayanarak önerilen asıl çatlak alanının, maksimum olası çatlak alanına oranıdır, varsayılan değeri 0.3'tür. Kullanıcılar GIRAFFE içindeki seçenekler menüsü aracılığıyla  $t$  ve  $k$  için varsayılan değerleri değiştirebilirler.

### 2.3.1.2.2 Çevresel Çatlak

Eğilme ya da eğilme ve gerilme kuvvetlerinin etkisi altında boru gövdesinin veya boru birleşim yerinin çevresel çatlamaşdır. Bir çevresel çatlağın şematik çizimi Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.5:** Yuvarlak Çatlağın Şematik Çizimi (Shi 2006)

Kırılgan malzeme ve birleşimlerden oluşan borularda çevresel çatlaklar meydana gelmektedir. Birleşim noktasına kurşun dökülerek sızdırmazlığı sağlanmış dökme demir borular gibi. Eşdeğer orifis alanına çatlağın açılma açısı ve boru çapı ile karar verilir ve

$$A = 0.5\pi D \times (\theta D) = 0.5\pi\theta D^2 \quad (2.7)$$

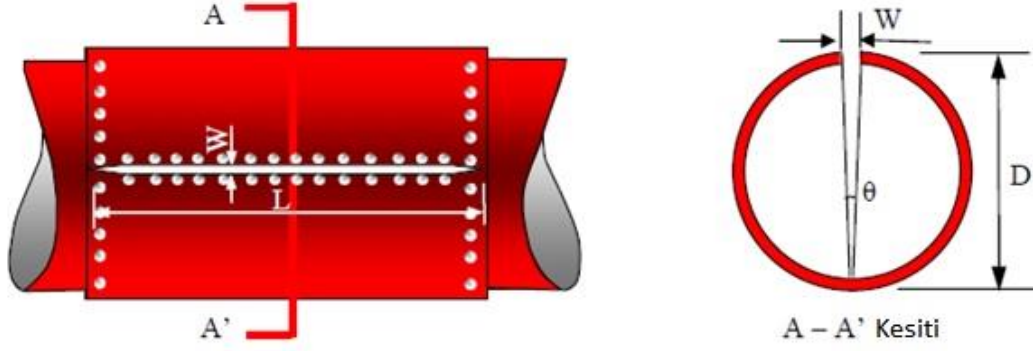
Denklem 2.7 ile hesaplanır.  $\theta$  çatlağın açılma açısı,  $D$  boru çapıdır. Bir yuvarlak çatlağın eşdeğer orifis çapı:

$$d = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4(0.5\pi\theta D^2)/\pi} = \sqrt{2\theta} D \quad (2.8)$$

Denklem 2.8 ile hesaplanır. Saha gözlemlerine dayanarak GIRAFFE’da açılma açısı için önerilen varsayılan değer  $0.5^\circ$ ’dir. Kullanıcılar, GIRAFFE içindeki seçenekler menüsü aracılığıyla açılma açısı  $\theta$  için varsayılan değeri değiştirebilirler.

### 2.3.1.2.3 Boyuna Çatlak

Deprem sırasında, dış yükleme veya yüksek iç basınçların neden olduğu, boru boyunca boru gövdesi ya da ek yerinin çatlamaıdır. Bir boyuna çatlağın şematik çizimi Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Boyuna çatlama, dökme demir, düktil demir ve perçinli çelik gibi metal borularda meydana gelir.



**Şekil 2.6:** Boyuna Çatlağın Şematik Çizimi (Shi 2006)

Boyuna çatlakın eşdeğer orifis alanı:

$$A = L \times W \quad (2.9)$$

Denklem 2.9 ile hesaplanabilir.  $L$  çatlakın uzunluğu,  $W$  çatlakın genişliğidir.  $L$  uzunluğu boru eksenine yönelmiştir ve bir boru parçasının uzunluğu olarak alınabilir.  $W$  genişliği boru dairesel yönelmiştir ve açılma açısının, çatlak ve boru çapı  $D$ 'nin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

$$W = D\theta \quad (2.10)$$

Denklem 2.9'da Denklem 2.10 yerine konulursa

$$A = W \times L = LD\theta \quad (2.11)$$

Denklem 2.11 elde edilir. Boyuna çatlakın eşdeğer orifis çapı:

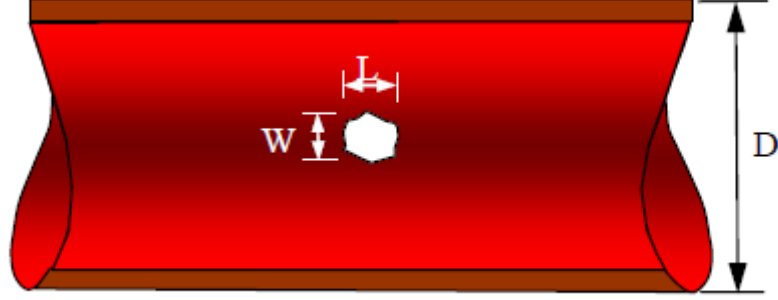
$$d = \sqrt{4A/\pi} = 2\sqrt{LD\theta/\pi} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12 ile hesaplanabilir. Boyuna çatlakın uzunluğu için varsayılan değer 13 metre (40 ft) alınabilir (Shi 2006). Boyuna çatlakın açılma açısı saha gözlemlerine göre  $0.1^\circ$  olarak hesaplanabilir. Kullanıcılar GIRAFFE içindeki seçenekler menüsü aracılığıyla açılma açısı  $\theta$  ve boyuna çatlak uzunluğu  $L$  için varsayılan değerleri değiştirebilirler.



#### 2.3.1.2.4 Boru Duvarının Yerel Kaybı

Bu çatlak deprem yüklemeleri altında korozyon tarafından bozulmuş boru duvarının küçük bir bölümünün kaybıdır. Boru duvarı yerel kaybının şematik çizimi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Boru Duvarı Yerel Kaybının Şematik Çizimi (Shi 2006)

Boru duvarı yerel kaybının eşdeğer orifis alanı:

$$A = L \times W \quad (2.13)$$

Denklem 2.13 ile hesaplanır.  $L$  orifisin uzunluğu ve  $W$  orifisin genişliğidir.  $L$  uzunluğu boru boyuncadır, boru çapı ve  $k_1$  oranı ile hesaplanabilir.

$$L = k_1 \times D \quad (2.14)$$

$W$  genişliği boru çevresi boyuncadır ve boru dairesel uzunluğu ve  $k_2$  oranı ile hesaplanabilir.

$$W = k_2 \pi D \quad (2.15)$$

Denklem 2.13’de Denklem 2.14 ve Denklem 2.15 yerine konulursa:

$$A = \pi k_1 k_2 D^2 \quad (2.16)$$

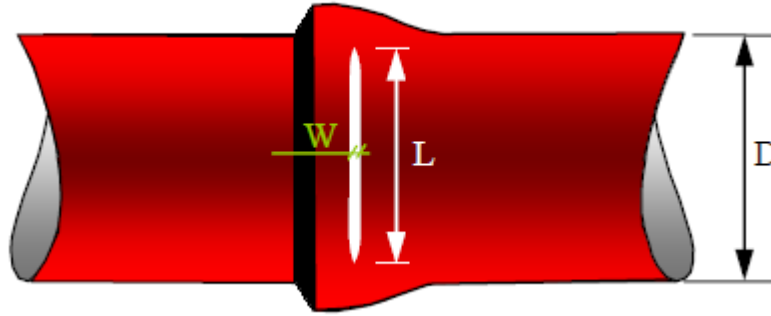
Denklem 2.16 elde edilir. Boru duvarı yerel kaybının eşdeğer orifis çapı:

$$d = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4(\pi k_1 k_2 D^2)/\pi} = 2\sqrt{k_1 k_2} D \quad (2.17)$$

Denklem 2.17 ile hesaplanabilir. Korozyondan dolayı boru duvarı kaybı genellikle küçüktür. GIRAFFE' da  $k_1$  ve  $k_2$  parametrelerinin yaklaşık hesabı olarak %5 önerilir. Kullanıcılar GIRAFFE içindeki seçenekler menüsü yardımıyla  $k_1$  ve  $k_2$  için varsayılan değerleri değiştirebilirler. Ancak daima  $k_1 = k_2$  olduğu varsayılır.

### 2.3.1.2.5 Boru Duvarının Yerel Yırtılması

Genellikle basınç kuvvetlerinin neden olduğu kaynaklı birleşim yerlerinin kaplamasındaki bir yırtık olarak meydana gelir. Kaynak birleşimli bir çelik boru hattının yerel yırtılmasının şematik çizimi Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Boru Duvarı Yerel Yırtılmasının Şematik Çizimi (Shi 2006)

Boru duvarı yerel yırtığının eşdeğer orifis alanı:

$$A = L \times W \quad (2.18)$$

Denklem 2.18 ile hesaplanır.  $L$  yırtığın uzunluğu ve  $W$  yırtığın genişliğidir.  $L$  uzunluğu boru çevresi boyuncadır ve boru çevre uzunluğunun bir oranı olan  $k$  ile hesaplanabilir.

$$L = k\pi D \quad (2.19)$$

Denklem 2.19 Denklem 2.18'de yerine konulursa:

$$A = W \times L = k\pi DW \quad (2.20)$$

Denklem 2.20 elde edilir. Boru duvarı yerel yırtığının eşdeğer orifis çapı:

$$d = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4(k\pi D \times W/\pi)} = 2\sqrt{kWD} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21 ile hesaplanır. GIRAFFE’da boru yırtığının uzunluğu için varsayılan değer boru çevresinin %30’u olarak alınır ve genişliğin Northridge depreminden Shi (2006) elde edilen verilere dayanarak 12 mm (0.5 in.) olduğu varsayılır. Kullanıcılar GIRAFFE içindeki seçenekler menüsü aracılığıyla  $k$  ve  $W$  için varsayılan değerleri değiştirebilirler.

### 2.3.1.3 Çatlak Tiplerinin Olasılığı

Boru hattının her bir türü çoklu çatlak türlerine sahip olabildiği için her bir çatlak tipinin göreceli olasılığı Monte Carlo simülasyonu kullanılarak boru çatlaklarını modellemek için boru hattının her bir tipi için hesaplanmalıdır. Boru hattı malzemesi ve ortak özelliklerine göre boru hattının çeşitli tipleri ile ilişkili beş çatlak tipi için önerilen olasılıklar Tablo 2.5’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.5:** Farklı Boru Malzemeleri için Çatlak Tiplerinin Görülme Olasılığı (Shi 2006)

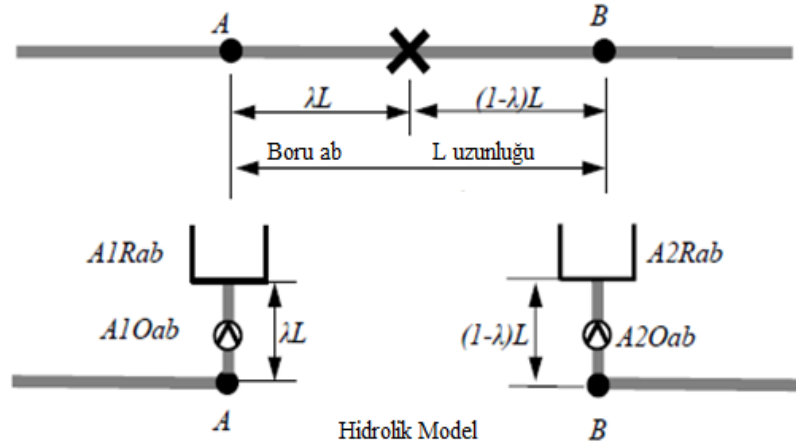
Boru Malzemesi	Tip 1 Ek Yeri Ayrılması	Tip 2 Çevresel Çatlak	Tip 3 Boyuna Çatlak	Tip 4 Boru Duvarının Yerel Kaybı	Tip 5 Boru Duvarının Yerel Yırtılması
Dökme Demir	0.3	0.5	0.1	0.1	Yok
Düktül Demir	0.8	Yok	0.1	0.1	Yok
Perçinli Çelik	0.6	Yok	0.3	0.1	Yok
Kaynaklı Çelik	Yok	Yok	Yok	Yok	1
Beton	1	Yok	Yok	Yok	Yok

GIRAFFE’ın boru hasar olasılıklarında kaynaklı çelik borular için kırık oranı %0 ve çatlak oranı %20 olarak verilmektedir. Bunun sebebi kaynaklı çelik borularda

tamir edilen burkulmaların %80'inin sızıntıya yol açmamalarıdır. Bu nedenle GIRAFFE'da depremden sonra çelik boru hattı performans simülasyonunda çatlakların sayısını tahmin etmek için kullanılan onarım oranı %20'ye indirilir.

### 2.3.2 Boru Kırık Simülasyonu

Kırık terimi boru hattının tam olarak kopukluğunu ifade eder. Su iki uçtan toprağa akar. Şekil 2.9 GIRAFFE'da bir boru kırığının hidrolik modelini göstermektedir.



Şekil 2.9: GIRAFFE'da Boru Kırığının Hidrolik Modeli (Cornell Üniversitesi 2007)

Memba noktası A ve mansap noktası B'ye bağlı olan AB borusunda bir kırık meydana geldiği varsayılır. AB borusunun uzunluğu  $L$ 'dir ve A noktasından bir  $\lambda L$  mesafesinde kırık meydana geldiği varsayılmıştır. GIRAFFE, kırığı aşağıdaki şekillerde simüle eder:

1. Sistemden AB borusunu kaldırır,
2. Düğüm noktası A ve düğüm noktası B'nin yüksekliklerinin doğrusal interpolasyonu tarafından tanımlanan yükseklikte A1Rab ve A2Rab adında iki yeni boş rezervuar ekler,

3. A1Oab ve A2Oab adında AB borusu ile aynı çapa ve aynı pürüzlülüğe sahip iki yeni boru ekler. A1Oab borusu, düğüm noktası A ve rezervuar A1Rab'ye bağlı ve A2Oab borusu, düğüm noktası B ve rezervuar A2Rab'ye bağlıdır. Yersel kayıp katsayısı 1'dir. Enerji kaybını göstermek ve kırık boru hattı içine suyun geri dönüşünü önlemek için A1Oab ve A2Oab borularının her biri için bir kontrol vanası eklenir. Bir boru kırığını simüle etmek için GIRAFFE bir boruyu siler ve iki yeni boru ve iki boş rezervuar ekler.

### 2.3.3 Boru Hasar Modellerinin Uygulanması

Bir su dağıtım sisteminin deprem performansını simüle etmek için kırıkları ve çatlakları içeren boru hasarının şebekeye eklenmesi gerekir. Sonra akış ve basınç dağılımlarını hesaplamak için hasarlı şebeke üzerinde hidrolik simülasyon yapılır. Boru hattı kırık ve çatlak modelleri, bir hidrolik şebeke için hem deterministik hem de probabilistik olarak uygulanabilir. Probabilistik uygulama onarım oranı, uzunluk ve hasarın meydana geldiği boru kırığının  $P_{bk}$  şartlı olasılığına göre sistemdeki rastgele dağıtılmış boru hattı kırık ve çatlaklarını oluşturur. Ek olarak probabilistik uygulama her bir çatlak tipini probabilistik olarak belirler. Probabilistik uygulama üç adımı içerir.

- Boru hasarı oluşturma
- Hasar durumuna karar verme (kırık ya da çatlak)
- Çatlak tipini belirleme

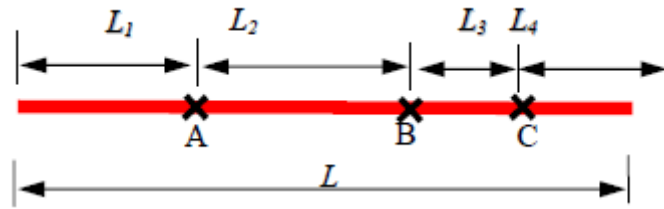
#### 2.3.3.1 Boru Hasarı Oluşturma

Probabilistik olarak boru hasarının yerini oluşturmak için, boru hasarının onarım oranına eşit ortalamaya sahip bir Poisson sürecini takip ettiği varsayılır. Onarım oranı, en yüksek yer hızı ve kalıcı yer deformasyonu gibi sismik risk parametreleri ile ilişkilidir. Her bir boru hattı için onarım oranının belirlenmesi Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla yapılan konumsal manipülasyonu içerir. Ortalaması onarım oranı olan bir Poisson süreci şu şekilde belirlenir. Boru boyunca boru hattının memba noktasından ölçülen hasarın ilk yeri  $L_1$  olsun  $L_k$  hasarın  $(k - 1)$ inci ve  $k$  inci

yerleri arasındaki mesafe olsun.  $\{L_1, L_2, \dots, L_k, \dots\}$ , Poisson metodunda varışlar arası mesafelerin dizilişidir. Boru memba noktasından ölçülen hasarın  $k$  ıncı yerinin asıl mesafesi  $L_1$  'den  $L_k$  'ya birikerek artan mesafedir. Eğer asıl boru hattı uzunluğu  $L$  'de  $L_1 = 0.1L$  ve  $L_2 = 0.5L$  olursa o zaman boru memba noktasından ölçülen boru uzunluğunun 0.1 'inde hasarın ilk yeri meydana gelir ve boru uzunluğu  $0.1+0.5=0.6$  da hasarın meydana geldiği ikinci yerdir.  $L_1, L_2 \dots L_k, 1/00$  'ye eşit bir ortalama ile bağımsız üstel rastgele değişkenler olarak simüle edilebilir ve Monte Carlo simülasyonu ile oluşturulur (Denklem 2.22).

$$L_k = -\frac{1}{00} \ln(1 - u_1) \quad (2.22)$$

$u_1$  rastgele değişkendir, 0 ile 1 arasında üniform olarak dağılır. Varışlar arası mesafe  $L_k$  kümülatif uzunluğa kadar boru uzunluğu  $L$  'yi tekrar tekrar aşar ve boru hattındaki hasarın yerini saptayabilir. Şekil 2.10 boru hasarının nasıl oluşturulduğunu göstermektedir.



Şekil 2.10: Boru Hasarı Oluşturmada Poisson Süreci (Shi 2006)

Bu örnekte boru hattındaki A, B ve C noktalarında üç hasar yeri oluşturulur. Çünkü dört hasar yerinin kümülatif uzunluğu boru uzunluğunu geçer.

### 2.3.3.2 Hasar Durumuna Karar Verme

Hasarın her bir noktası için boru hasarı oluşturduktan sonra üniform dağıtılan rastgele sayı  $\mu_2$  (0.1'den büyük) oluşturulur ve hasarın meydana geldiği boru kırığının şartlı olasılığı  $P_{bk}$  ile karşılaştırılır. Eğer  $\mu_2 P_{bk}$  'yı geçerse hasar bir kırık olarak düşünülür ve aksi takdirde hasar bir çatlaktır. GIRAFFE'ın güncel versiyonu boru hasarı ile ilişkili KYD üzerine odaklanır ve dökme demir, düktil demir, perçin birleşimli çelik, beton ve boru hatlarının diğer malzemesi için boru kırığının şartlı

olasılığı  $P_{bk}$ 'nin varsayılan değeri olan 0.2'yi atar. Kaynak birleşimli çelik boru hatlarının kırılma olasılığı için  $P_{bk}$ 'ya varsayılan değer olan sıfır değeri atanır. Kullanıcılar isterlerse GIRAFFE'daki seçenekler, yapılandırma, boru hasar olasılığını tıklayarak seçenekler menüsü yardımıyla varsayılan değeri değiştirebilirler.

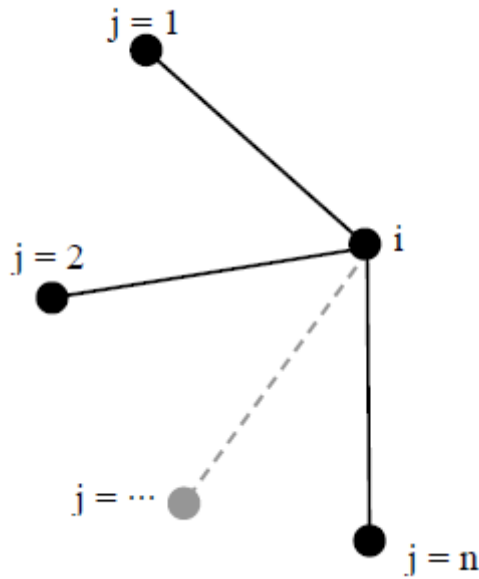
### 2.3.3.3 Çatlak Tipinin Belirlenmesi

Üçüncü adım her bir çatlak tipini olasılığa dayalı olarak belirler ve Bölüm 2.3.1.2'de geliştirilen denklemleri kullanarak her bir çatlağın orifis alanını hesaplar. Çatlağın her bir tipinin varsayılan olasılıkları boru hattının çeşitli tiplerinin yerini tutmaktadır ve Tablo 2.4'de listelenmiştir. Her bir çatlağın tipini belirlemek için uniform olarak dağıtılan rastgele sayı  $\mu_3$  (0.1'den büyük) oluşturulur ve boru hattı ile ilişkili çatlak tiplerinin kümülatif olasılığı ile karşılaştırılır. Örneğin, bir dökme demirdeki çatlak olasılığının, ek yeri ayrılmasında 0.3, çevresel çatlakta 0.5, boyuna çatlakta 0.1 ve boru duvarının yerel kaybında 0.1 olduğu varsayılır. Eğer uniform dağıtılan rastgele sayı 0 ve 0.3 arasında değişiyorsa çatlak bir ek yeri ayrılması olarak sınıflandırılır. Eğer 0.3 ve 0.8 arasında ise çevresel çatlaktır, 0.8 ve 0.9 arasında ise boyuna çatlaktır, 0.9 ve 1.0 arasında ise boru duvarının yerel kaybıdır. Çatlak tipine karar verdikten sonra her bir çatlak için eşdeğer orifis alanı ve eşdeğer orifis çapı hesaplanabilir.

## 2.4 Negatif Basınç Düzeltmesi

Hidrolik şebeke analizi, basınçlı bir boru hattı şebekesindeki sıkıştırılmayan su akışını iki temel yasa olan Kütle ve Enerjinin Korunumu yasalarına göre çözer. Kütle korunumu yasası süreklilik denklemi olarak ifade edilebilir. Sistemdeki bütün taleplerin yerine getirilmesi gerektiğini varsayar. Enerjinin korunumu yasası, suyun sadece yüksek enerjili düğüm noktalarından düşük enerjili düğüm noktalarına akabildiğini gösterir. Suyun enerjisi, bir noktanın kotu ve basınç yüksekliğinin toplamı olan piyezometre kotu olarak ifade edilir. Alışlagelmiş hidrolik şebeke analiz algoritması pozitif ve negatif basınçları ayırmaz ve sadece gerekli talepler için su akışını iletmede toplam yükseklik farkını kullanır. Bütün taleplerin zorunlu olarak

sağlanması, pozitif ve negatif ayrımı olmadan bazı düğüm noktalarındaki hayali olarak yüksek negatif basınçların öngörülmesine yol açabilir. Bu durum deprem hasarlı bir sistemde özellikle önemlidir. Boru hattı kırık ve çatlaklarındaki su kaybından dolayı talepler, buralarda rezervuar ve boru hattı kaynaklarındaki su temininden çok daha yüksek olabilir. Akışlar ve basınçları daha doğru hesaplamak için, iç basınçlar atmosfer seviyelerinin altına düştüğü zaman hava geçirmez olmayan bir su dağıtım şebekesi varsayımına göre hasarlı bir sistemde hidrolik şebeke analizi yapılmalıdır. Atmosfer basıncının sıfır olduğu yerde  $p_i < 0$  basınçlı bir su dağıtım sisteminin Şekil 2.11’de gösterilen düğüm noktası  $i$  göz önüne alınabilir.



**Şekil 2.11:** Negatif Basınç Gösterimi (Cornell Üniversitesi 2007)

Düğüm noktası  $i$ 'nin piyezometre kotu  $H_i = H_{iE} + p_i/\gamma_w$ , Burada,  $H_{iE}$   $i$  noktasının kotu ve  $\gamma_w$  suyun birim ağırlığıdır.  $Q_k$ , düğüm noktası  $i$  ve  $j$  ile bağlantılı boru  $k$ 'daki debi olsun. Fiziksel sistem hava geçirmez olmadığı için, düğüm noktası  $i$  boyunca hava girer ve düğüm noktası  $i$ 'deki basıncın atmosfer basıncına eşit olmasına neden olur.  $p_i = 0$  ve  $H_i = H_{iE}$  olur. Düğüm noktası  $i$ 'nin piyezometre kotu, düğüm noktası  $j$ 'dekinden daha yüksek olursa  $Q_k$  sıfır olacaktır.  $H_{iE} = H_i > H_j$ , eğer bu durum düğüm noktası  $i$  ile bağlı bütün borular için ise düğüm noktası suyun geçemediğinden dolayı akış olmayan nokta olarak düşünülebilir. GIRAFFE'da negatif basınç davranışı için yalıtım yaklaşımı uygulanır. Bu yaklaşım tekrarlanarak EPANET ile çalışır. EPANET kullanılarak hasarlı sistemin hidrolik



şebeke analizinden sonra negatif basınçlı düğüm noktaları tanımlanır ve en yüksek negatif basınçlı düğüm noktası ile başlayarak adım adım sistemden çıkarılır. Düğüm noktasını, bütün bağlı boruları ve inp. uzantılı sistem tanım dosyasından düğüm noktası ve borular ile ilişkili kontrol parametrelerini yok ederek yalıtım simüle edilir. Her bir yok etme işleminden sonra şebekenin bağlantı durumu kontrol edilir. Eğer sistemin bir parçası su kaynakları olmaksızın ana sistemden izole edilirse o parça sistem dışına alınır. Akış analizi ve yok etme işlemi sistemde negatif basınçlı nokta kalmayana kadar devam eder. Kısmi akışlı düğüm noktaları boyunca su iletimi azaltılarak GIRAFFE’da benimsenen yaklaşım atmosfer basıncına yaklaşan geçiş basınçlarının yanı sıra atmosfer basıncı altındaki akışı kaldırır. Böyle bir akış genelde nispeten düşük oranlarda meydana gelir ve bir depremden sonra yangından korunma için güvenli değildir. Bundan dolayı belirsiz veya güvenilmez akışlı boruları sistem yok eder. Böylece acil durum yanıtı boyunca etkili olabilen sistemin üzerine yoğunlaşır. GIRAFFE’da kabul edilen modelleme yaklaşımı, hasarlı bir durumu, hasarlı şebekeyi bütün borulardaki pozitif basınç ve akış gereksinimlerini karşılayan birine dönüştürerek işlevsel bir durum olarak ifade eder. Güvenilmez akışlı boru hatlarını ortadan kaldırarak, artık fonksiyonel olan şebekenin bölümlerinde sistem operatörünü gösteren pratik bir avantaja sahiptir ve böylece en hasar görebilir dağıtım bölümleri ve hafifletme için potansiyel stratejiler hakkında bilgi sağlar. Model, bu şart için doğru şebeke analizleri mevcut olmadığından dolayı su iletimi ve kararsız akım ile ilişkili basınç kayıpları için açık bir tanım değildir. Buna karşılık model, pozitif basınç için gerekli başlangıç servis oranını karşılayan şebekenin kalan parçasını görüntülemek için sistemin su alamayan bölümlerini siler.

### 3. SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN PERFORMANSI

Bir su dağıtım sisteminin deprem performansının belirlenebilmesi için kırık ve çatlakları içeren boru hasarlarının şebekeye eklenmesi gerekir. Daha sonra hidrolik çözüm yapılarak hasarlı sistemin debi ve basınç dağılımları belirlenir. GIRAFFE’da borulardaki kırık ve çatlaklar sisteme deterministik veya olasılıksal olarak uygulanabilir. Deterministik uygulamada kırık ve çatlakların ağ üzerindeki sayı ve yerleri ile çatlağın türü önceden belirlenir. Bu yaklaşım su dağıtım sisteminin belli bir hasar senaryosu altında performansını belirlemek için kullanılır. Ancak gerçekte deprem sonucu oluşacak hasarın yeri ve türü (kırık veya çatlak) ile hasar çatlak ise çatlağın türü rastgele karakterdedir. Olasılıksal yaklaşım sistemde verilen onarım oranına (OO) bağlı olarak rastgele dağılmış hasarlar oluşturur. GIRAFFE programında bu amaçla üç rastgele sayı türetilmektedir. Bunlar hasarın yerini, hasarın türünü (kırık veya çatlak) ve hasar çatlak ise çatlağın türünü belirlemek için kullanılır. HAZUS’da NIBS (1997) sismik dalga etkisiyle GYD sonucu oluşan boru hasarlarının oranı %80 çatlak ve %20 kırık olarak verilmektedir. Tez kapsamında da bu değerler kullanılmıştır. GIRAFFE programı bu oranları varsayılan değer olarak kabul etmekle birlikte kullanıcıların oranları değiştirmesine de imkan vermektedir.

### 3.1 Graf Tabanlı Su Dağıtım Ağı Performans Ölçütleri

Graf teorisi grafları inceleyen bir matematik dalıdır. Graf, düğümler ve bu düğümleri birbirine bağlayan kenarlardan oluşan bir tür ağ sistemidir. Örneğin, kimya bilimindeki kompleks moleküller ve onları birbirine bağlayan bağlar bir graf oluşturur. İnternet ağları, sosyal ağlar bir graf olarak düşünülebilir. Bir graf  $N$  adet düğüm noktası ile  $m$  adet ayrıttan oluşur. Su dağıtım sistemleri söz konusu olduğunda düğüm noktaları, su dağıtımının yapıldığı varsayılan boruların kesişim noktalarıdır, ayrıttar ise borulara karşılık gelmektedir. Su dağıtım sistemleri, graf teorisine göre ağırlıklı ve iki yönlü ağlar olarak tanımlanmalı ise de bu çalışmada kullanılan varsayımsal dağıtım sistemi ağırlıksız ve yönsüz ağ olarak ele alınmıştır (Yazdani ve Jeffrey 2011). Literatürde ağların dayanıklılıklarını belirlemek için çok sayıda graf indisi vardır. Bu indisler grafların sağlamlığını ya da zayıflığını belirlemektedir ve düğüm noktası ile kenarların birbirlerine göre durumunu göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan varsayımsal sistemlerin deprem sonrası su iletebilme kapasitesini (performansını) değerlendirmek için ellibir adet graf indisi kullanılmıştır ve bu indisler istatistiksel bir program olan R programının QuACN ve igraph kütüphanelerinden elde edilirken (g) grafi göstermek üzere kullanılan komutlar Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’ de verilmiştir. Öncelikle indislerin elde edilmesinde gerekli olan bazı matrisler incelenmiştir.

**Tablo 3.1:** QuACN Kütüphanesiyle Hesaplanan İndislerin Komutları

İndis	Komut
Harary	harary(g)
TotalAdjacency	totalAdjacency(g)
Zagreb1	zagreb1(g)
Zagreb2	zagreb2(g)
ModifiedZagreb	modifiedZagreb(g)
VariableZagreb	variableZagreb(g)
Randic	randic(g)
NormalizedEdgeComplexity	normalizedEdgeComplexity(g)
AtomBondConnectivity	atomBondConnectivity(g)
GeometricArithmetic1	geometricArithmetic1(g)
GeometricArithmetic2	geometricArithmetic2(g)
Entropy	topologicalInfoContent(g)\$entropy
Bertz	bertz(g)
VertexDegreeEqualityBased Information	vertexDegree(g)
GraphVertexComplexity	graphVertexComplexity(g)
EdgeEqualityMIC	edgeEqualityMIC(g)
EdgeMagnitudeMIC	edgeMagnitudeMIC(g)
MediumArticulation	mediumArticulation(g)
Efficiency	efficiency(g)
GraphIndexComplexity	graphIndexComplexity(g)
Offdiagonal	offdiagonal(g)
DistanceCodeCentric	distanceCodeCentric(g)
AdjacencyHMs	eigenvalueBased(g,adjacencyMatrix,2)\$HMs
LaplaceHMs	eigenvalueBased(g,laplaceMatrix,2)\$HMs
AugmentedHMs	eigenvalueBased(g,augmentedMatrix,2)\$HMs
ExtendedAdjacencyHMs	eigenvalueBased(g,extendedAdjacencyMatrix,2)\$HMs
VertexConnectHMs	eigenvalueBased(g,vertConnectMatrix,2)\$HMs
RandomWalkHMs	eigenvalueBased(g,randomWalkMatrix,2)\$HMs
AdjacencySMs	eigenvalueBased(g,adjacencyMatrix,2)\$SMs
LaplaceSMs	eigenvalueBased(g,laplaceMatrix,2)\$SMs
AugmentedSMs	eigenvalueBased(g,augmentedMatrix,2)\$SMs
ExtendedAdjacencySMs	eigenvalueBased(g,extendedAdjacencyMatrix,2)\$SMs
VertexConnectSMs	eigenvalueBased(g,vertConnectMatrix,2)\$SMs
RandomWalkSMs	eigenvalueBased(g,randomWalkMatrix,2)\$SMs
AdjacencyISMs	eigenvalueBased(g,adjacencyMatrix,2)\$ISMs
LaplaceISMs	eigenvalueBased(g,laplaceMatrix,2)\$ISMs
AugmentedISMs	eigenvalueBased(g,augmentedMatrix,2)\$ISMs
ExtendedAdjacencyISMs	eigenvalueBased(g,extendedAdjacencyMatrix,2)\$ISMs
VertexConnectISMs	eigenvalueBased(g,vertConnectMatrix,2)\$ISMs
RandomWalkISMs	eigenvalueBased(g,randomWalkMatrix,2)\$ISMs
AugmentedPMs	eigenvalueBased(g,augmentedMatrix,2)\$PMs
AugmentedIPMs	eigenvalueBased(g,augmentedMatrix,2)\$IPMs
Energy	energy(g)
LaplacianEnergy	laplacianEnergy(g)
Estrada	estrada(g)
LaplacianEstrada	laplacianEstrada(g)
SpectralRadius	spectralRadius(g)

**Tablo 3.2:** İgraph Kütüphanesiyle Hesaplanan İndislerin Komutları

İndis	Komut
AveragePathLength	average.path.length(g)
ClusterNo	clusters(g)\$no
Diameter	diameter(g)
GraphDensity	graph.density(g)

**Komşuluk Matrisi (Adjacency Matrix):** Satır ve sütunları grafın düğüm noktalarıyla etiketlenmiş bir matristir (Denklem 3.1). Eğer iki düğüm noktası arasında bir bağlantı (komşuluk) varsa matris 1 değerini, bağlantı yoksa 0 değerini alır. Su dağıtım sistemlerinde bir düğüm noktası kendisi ile kapalı bir bağlantı oluşturmayacağı için Komşuluk matrisinin asal eksen elemanları daima 0 değerini alır (Janezic ve diğ. 2015).

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & i \rightarrow j \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada,  $i$  ve  $j$  sırasıyla matrisin satır ve sütun numarasıdır.

**Derece Matrisi (Degree Matrix):** Satır ve sütunları grafın düğüm noktalarıyla etiketlenmiş bir kare matristir (Denklem 3.2). Bir düğüm noktasının bağlantılı olduğu düğüm noktası sayısını gösterir. Asal ekseninde değerler olan diğer değerleri sıfır olan diyagonal bir matristir (Garas 2016).

$$D_{i,j} := \begin{cases} \text{deg}(v_i) & i = j \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases} \quad (3.2)$$

Burada  $\text{deg}(v_i)$  bir düğüm noktasının (vertex) bağlantılı olduğu düğüm noktası sayısıdır,  $i$  ve  $j$  sırasıyla matrisin satır ve sütun numarasıdır.

**Laplasiyen Matrisi (Laplacian Matrix):** Derece matrisinden komşuluk matrisinin çıkarılmasıyla elde edilen matristir (Janezic ve diğ. 2015).

$$L_{i,j} = D_{i,j} - A_{i,j} \quad (3.3)$$

Laplasiyen matrisinin alabileceği değerler Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'de verilmektedir.

$$L_{i,j} := \begin{cases} \text{deg}(v_i) & i = j \\ -1 & i \neq j \text{ ve } v_i \text{ ile } v_j \text{ bağlantılı ise} \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases} \quad (3.4)$$

**Arttırılmış Dügüm Noktası Derecesi Matrisi (Augmented Vertex Degree Matrix):** Simetrik olmayan köşeler için bütün matris satırlarının toplamına eşittir.  $i$  inci satır toplamı köşe  $i$ 'nin augmented derecesini gösterir (Denklem 3.5). Komşuluk matrisinin satır ve sütun numaraları birbirine eşitken iki düğüm noktası arasındaki değer olarak düğüm noktası derecesi alınarak ve satır ile sütun numarası birbirine eşit değilken iki düğüm noktası arasındaki değer olarak düğüm noktası derecesinin iki üzeri düğüm noktaları arasındaki mesafeye oranı alınarak elde edilen matristir (Janezic ve diğ. 2015).

$$[D(\delta)]_{ij} = \begin{cases} \frac{k_j}{2^{l_{ij}}} & \text{eğer } i \neq j \\ k_i & \text{eğer } i = j \end{cases} \quad (3.5)$$

$k_i$  düğüm noktası derecesidir,  $l_{ij}$  düğüm noktaları arasındaki mesafedir.

**Genişletilmiş Komşuluk Matrisi (Extended Adjacency Matrix):** Kenar ağırlıklı komşuluk matrisinin bir türüdür (Denklem 3.6). Kenar dereceleri üzerine bir matristir. Bir grafın köşe dereceleri grafın kenar derecelerine eşittir (Todeschini ve Consonni 2009).

$$[EA]_{ij} = \begin{cases} \frac{k_i/k_j + k_j/k_i}{2} & \text{eğer } i \text{ ve } j \text{ komşu ise} \\ 0 & \text{eğer } i = j \end{cases} \quad (3.6)$$

$k_i$  ve  $k_j$  düğüm noktalarının dereceleridir.

**Düğüm Noktası Bağlayıcılık Matrisi (Vertex Connectivity Matrix):** Graf ile bağlantısı olmayan kaldırılması gereken düğüm noktalarının minimum sayısını veren matristir. Düğüm Noktası Bağlayıcılık matrisinin alabileceği değerler Denklem 3.7'de verilmiştir (Janezic ve diğ. 2015).

$$[V]_{ij} = \begin{cases} [k(i)k(j)]^{-\frac{1}{2}} & \text{eğer } i \text{ ve } j \text{ komşu ise} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.7)$$

$k_i$  ve  $k_j$  düğüm noktalarının dereceleridir.

**Rastgele Hareket Markov Matrisi (Random Walk Markov Matrix):** Komşuluk matrisinin satırındaki her bir elemanın kendi düğüm noktası derecesinin tersi ile

çarpılması sonucu elde edilen matristir. Rastgele Hareket Markov matrisinin alabileceği değerler Denklem 3.8’de verilmektedir (Klein ve diğ. 2004).

$$M = \rho D^{-1} \quad (3.8)$$

$\rho$ , komşuluk matrisi,  $D$ , köşegen matrisidir ve  $(D_{ii}) = d_i$  ‘dir.

**1. Harary İndisi (Harary Index):** Bir grafın birbiriyle bağlantılı olan tüm düğüm noktası çiftleri arasındaki en kısa mesafelerin terslerinin toplamının yarısı alınarak elde edilen indistir (Denklem 3.9) (Xu ve Das 2011).

$$H(G) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( d(v_i, v_j) \right)^{-1}, i \neq j \quad (3.9)$$

Burada  $v_i, v_j$  düğüm noktaları,  $d$  düğüm noktaları arasındaki mesafe,  $N$ , düğüm noktası sayısıdır.

**2. Toplam Komşuluk İndisi (Total Adjacency Index):** Graf bağlanabilirliğinin bir ölçüsüdür ve komşuluk matrisinin tüm elemanlarının toplamının yarısı alınarak elde edilen indistir (Denklem 3.10) (Todeschini ve Consonni 2009).

$$A(G) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}. \quad (3.10)$$

$a_{ij}$ , komşuluk matrisinin elemanlarıdır.  $N$ , toplam düğüm noktası sayısıdır.

**3. Zagreb-1 İndisi (Zagreb-1 Index):** Her bir düğüm noktasının derecelerinin toplamına eşit olan indistir (Denklem 3.11) (Das ve diğ. 2015).

$$Z_1(G) = \sum_{i=1}^N k_{vi} \quad (3.11)$$

$k_{vi}$ , düğüm noktası  $v_i$  ‘nin derecesidir.  $N$ , düğüm noktası sayısıdır.

**4. Zagreb-2 İndisi (Zagreb-2 Index):** Grafın komşuluk düğüm noktaları çiftlerinin derecelerinin çarpımlarının toplamı ile elde edilen indistir (Denklem 3.12) (Das ve diğ. 2015).

$$Z_2(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} k_{vi} k_{vj} \quad (3.12)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**5. Modifiye Zagreb İndisi (Modified Zagreb Index):** Zagreb-2 indisinin tersidir (Denklem 3.13) (Mueller ve diğ. 2014).

$$MZI(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} \frac{1}{k_{v_i} k_{v_j}} \quad (3.13)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**6. Değişken Zagreb İndisi (Variable Zagreb Index):** Düğüm noktalarının derecelerinin toplamının 2 eksiğinin derecelerinin çarpımına oranının toplam değeri ile elde edilen indistir (Denklem 3.14) (Mueller ve diğ. 2014).

$$VZI(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} \frac{k_{v_i} + k_{v_j} - 2}{k_{v_i} k_{v_j}} \quad (3.14)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**7. Randic Bağlanabilirlik İndisi (Randic Connectivity Index):** Düğüm noktalarından ayrılan kollara yani bağlantılara bir ölçü sağlamak için geliştirilmiş olan indistir (Denklem 3.15) (Caporossi ve diğ. 2003).

$$R(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} [k_{v_i} k_{v_j}]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**8. Normalize Kenar Karmaşıklığı İndisi (Normalized Edge Complexity Index):** Normalize Kenar Karmaşıklığı grafın düğüm noktalarının bağlanabilirliği ile ilişkilidir (Denklem 3.16) (Bonchev ve Rouvray 2005).

$$E_N(G) = \frac{A(G)}{N^2} \quad (3.16)$$

$A(G)$ , toplam kenar sayısıdır.  $N$ , sistemdeki düğüm noktalarının sayısıdır.

**9. Atom Bağlanabilirlik İndisi (Atom Bond Connectivity Index):** Grafların kenarlarının bağlı bulunduğu düğüm noktalarının dereceleri üzerine geliştirilmiş topolojik bir indistir (Denklem 3.17) (Du 2015).



$$ABC(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} \sqrt{\frac{k_{v_i} + k_{v_j} - 2}{k_{v_i} k_{v_j}}} \quad (3.17)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**10. Geometrik Aritmetik İndisi-1 (Geometric Arithmetic Index-1):** Bir grafın kenarlarının bağlı bulunduğu düğüm noktalarının dereceleri ile elde edilen bir indistir (Denklem 3.18) (Zhou ve diğ. 2009).

$$GA1(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} \frac{\sqrt{k_{v_i} k_{v_j}}}{\frac{1}{2}(k_{v_i} + k_{v_j})} \quad (3.18)$$

$k_{v_i}$  ve  $k_{v_j}$ , sırası ile düğüm noktaları  $v_i$  ve  $v_j$ 'nin dereceleridir.

**11. Geometrik Aritmetik İndisi-2 (Geometric Arithmetic Index-2):** Bir grafın kenarlarının bağlı bulunduğu düğüm noktalarının sayısı ile elde edilen bir indistir (Denklem 3.19) (Zhou ve diğ. 2009).

$$GA2(G) = \sum_{(v_i, v_j) \in E} \frac{\sqrt{N_i N_j}}{\frac{1}{2}(N_i + N_j)} \quad (3.19)$$

$$N_i = |\{x \in N(G) : d(x, v_i) < d(x, v_j)\}|$$

$$N_j = |\{x \in N(G) : d(x, v_j) < d(x, v_i)\}|$$

Kenar  $f = \{x, y\}$  ve düğüm noktası  $v$  arasındaki mesafe  $d(f, v) = \min\{d(x, v), d(y, v)\}$  olarak tanımlanır.  $N$  düğüm noktası sayısıdır.

**12. Entropi İndisi (Entropy Index):** Grafda bulunan her bir yörünge için seçilme olasılığı kullanılarak hesaplanan bir indistir. Yörüngeler, birbirinden topolojik olarak farklı olan düğüm noktası gruplarıdır. Düğüm noktalarının topolojik olarak farklı olup olmadıkları kendilerinin ve komşularının dereceleri gözönüne alınarak belirlenir (Denklem 3.20) (Dehmer ve diğ. 2010).

$$I_{orb}^V(G) = - \sum_{i=1}^k \frac{|N_i^V|}{N} \log_2 \left( \frac{|N_i^V|}{N} \right) \quad (3.20)$$

$N_i^V$ ,  $i$  inci yörüngeye ait düğüm noktalarının sayısı;  $N$ , graftaki toplam düğüm noktası sayısı;  $k$ , graftaki yörüngelerin sayısıdır.

**13. Bertz Karmaşıklık İndisi (Bertz Complexity Index):** Grafın yörüngelerinde bulunan düğüm noktalarının sayısı kullanılarak elde edilen bir indistir (Denklem 3.21) (Mueller ve diğ. 2014).

$$C(G) = 2N \log_2(N) - \sum_{i=1}^k |N_i| \log_2(|N_i|) \quad (3.21)$$

$N_i$ ,  $i$  inci yörüngeye ait düğüm noktası sayısı;  $N$ , grafın toplam düğüm noktası sayısı;  $k$ , graftaki yörüngelerin sayısıdır.

**14. Düğüm Noktası Derecesi Eşitliği Tabanlı Bilgi İndisi (Vertex Degree Equality Based Information Index):** Grafda bulunan her bir derece grubunun seçilme olasılığı kullanılarak hesaplanan bir indistir (Denklem 3.22). Bir derece grubu grafdaki derecesi aynı olan düğüm noktalarından oluşur. Entropi indisinden farklı düğüm noktalarının yalnızca kendi derecelerinin dikkate alınıp komşularının derecelerinin dikkate alınmamasıdır (Mueller ve diğ. 2014).

$$I_{deg}(G) = \sum_{i=1}^{\bar{k}} \frac{|N_i^{k_v}|}{N} \log_2 \left( \frac{|N_i^{k_v}|}{N} \right) \quad (3.22)$$

$N_i^{k_v}$ ,  $i$  inci derece grubunda bulunan düğüm noktası sayısı;  $\bar{k}$ , graftaki derece gruplarının sayısıdır.

**15. Graf Düğüm Noktası Karmaşıklığı İndisi (Graph Vertex Complexity Index):** Düğüm noktalarından diğer noktalara olan mesafelerin sayısı ile hesaplanan bir indistir (Denklem 3.23-3.24) (Mueller ve diğ. 2014).

$$I_{VC}^v(G) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^c \quad (3.23)$$

$$v_i^c = - \sum_{j=0}^{\sigma(v_i)} \frac{k_j^{v_i}}{N} \log_2 \left( \frac{k_j^{v_i}}{N} \right) \quad (3.24)$$

$v_i^c$ , düğüm noktası karmaşıklığıdır,  $k_j^{v_i}, V_i \in N(G)$ 'den başlayan mesafelerin sayısıdır.  $N$ , düğüm noktası sayısıdır.

**16. Kenar Eşdeğerliği Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisi (Mean Information Content on the Edge Equality Index):** Graftaki kenarların farklı bağlanabilirlik değerlerinin tümünü gösteren bir indistir. Kenarların iki uç noktasındaki düğüm noktalarının dereceleri kullanılarak kısmi bağlanabilirlik indisi ( $\chi_i$ ), bunların toplamından da moleküler bağlanabilirlik indisi ( $\chi_R$ ) elde edilir (Denklem 3.25). Bunun sonucunda aynı moleküler bağlanabilirlik indisine sahip kenarların sayısı ( $M_i$ ) ve graftaki toplam kenar sayısı ( $M$ ) kullanılarak Kenar Eşdeğerlik MIC İndisi Denklem 3.26'ya göre hesaplanır (Bonchev ve diğ. 1981).

$$\chi_R = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^M (k_i k_j)^{-\frac{1}{2}} = \sum_{i=1}^M \chi_i \quad (3.25)$$

$\chi_R$ , moleküler bağlanabilirlik indisi,  $k_i, k_j$  kenarların iki uç noktasının dereceleridir.  $\chi_i$ , kenar  $i$ 'nin kısmi bağlanabilirlik indisidir.

$$I_{edge}^E = - \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M} \log_2 \left( \frac{M_i}{M} \right) \quad (3.26)$$

$M_i$ , aynı kısmi bağlanabilirlik indisine ( $\chi_i$ ) sahip kenarların sayısı,  $M$ , toplam kenar sayısıdır.

**17. Kenar Büyüklüğü Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisi (Mean Information Content on the Edge Magnitude Index):** Randic bağlanabilirlik indisi ve düğüm noktası dereceleri kullanılarak hesaplanan indistir (Denklem 3.27) (Mueller ve diğ. 2014).

$$I_{\chi}^{E-M} = - \sum_{(i,j) \in E} \frac{(k_i k_j)^{-1/2}}{R(G)} \cdot \log_2 \frac{(k_i k_j)^{-1/2}}{R(G)} \quad (3.27)$$

$R(G)$ , randic bağlanabilirlik indisi,  $k_i$  ve  $k_j$  düğüm noktası dereceleridir.

**18. Ortalama Eklem İndisi (Medium Articulation Index):** Doğru ve yönlü graflar için bir komplekslilik ölçüsüdür (Denklem 3.28-3.36). Şebekeler için bağlantı sayılarının maksimumunu elde eder.  $j > i'$  nin olduğu kenarların sonundaki düğüm noktası dereceleri kullanılarak ve fazlalık (redundancy) ölçütü kullanılarak elde edilir (Kim ve Wilhelm 2007).

$$MA_g(G) = MA_R(G) \cdot MA_I(G) \quad (3.28)$$

$$MA_R(G) = 4 \left( \frac{R(G) - R_{path}(G)}{R_{clique}(G) - R_{path}(G)} \right) \left( 1 - \frac{R(G) - R_{path}(G)}{R_{clique}(G) - R_{path}(G)} \right) \quad (3.29)$$

$$R(G) = \frac{1}{|E|} \sum_{i,j>i} \log_2(k_i k_j) \quad (3.30)$$

$$R_{clique}(G) = 2 \log_2(N - 1) \quad (3.31)$$

$$R_{path}(G) = 2 \frac{N-2}{N-1} \log_2 2 \quad (3.32)$$

$$MA_I(G) = 4 \left( \frac{I(G) - I_{clique}(G)}{I_{path}(G) - I_{clique}(G)} \right) \left( 1 - \frac{I(G) - I_{clique}(G)}{I_{path}(G) - I_{clique}(G)} \right) \quad (3.33)$$

$$I(G) = \frac{1}{|E|} \sum_{i,j>i} \log_2 \left( \frac{2|E|}{k_i k_j} \right) \quad (3.34)$$

$$I_{clique}(G) = \log_2 \frac{N}{N-1} \quad (3.35)$$

$$I_{path}(G) = \log_2(N - 1) - \frac{N-3}{N-1} \log_2 2 \quad (3.36)$$

$N$ , düğüm noktası sayısı,  $E$ , kenar sayısı,  $k_i, k_j$ , bağlantı noktalarının her iki ucundaki düğüm noktalarının derecesidir.

**19. Verimlilik indisi (Efficiency Index):** Bir grafın etkinliği (verimi) bütün ters çevrilmiş en kısa yol uzunluklarının aritmetik ortalaması olarak tanımlanır (Denklem 3.37-3.39) (Kim ve Wilhelm 2007).

$$Ce(G) = 4 \left( \frac{E(G) - E_{path}(G)}{1 - E_{path}(G)} \right) \left( 1 - \frac{E(G) - E_{path}(G)}{1 - E_{path}(G)} \right) \quad (3.37)$$

$$E(G) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_i \sum_{j>i} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3.38)$$

$$E_{path}(G) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{N-i}{i} \quad (3.39)$$

$N$ , düğüm noktası sayısıdır.  $d_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  noktaları arasındaki en kısa mesafedir.

**20. Graf Karmaşıklık İndisi (Graph Index Complexity Index):** Grafın komşuluk matrisinin bütün özdeğerleri gerçektir. Komşuluk matrisinin en büyük özdeğeri  $q$ 'dir. Bu indis,  $q$  ve sistemin bütün düğüm noktaları kullanılarak elde edilir (Denklem 3.40-3.41) (Kim ve Wilhelm 2007).

$$C_r(G) = 4c_r(1 - c_r) \quad (3.40)$$

$$c_r = \frac{q - 2\cos\frac{\pi}{N+1}}{N-1 - 2\cos\frac{\pi}{N+1}} \quad (3.41)$$

$q$ , grafın komşuluk matrisinin en büyük özdeğeridir.  $N$ , sistemin bütün düğüm noktalarının sayısıdır.

**21. Köşegendışı Karmaşıklık İndisi (Offdiagonal Complexity Index):** Düğüm noktalarının sahip olduğu dereceler yazılarak her bir derecenin diğer bir dereceli kaç tane komşusu olup olmadığı köşegen matris şeklinde gösterilerek bu matrisin asal eksenindeki ve asal eksenin sağ tarafındaki elemanlar en sağdan başlanarak sırası ile çapraz olarak toplanıp elde edilen matris diyagonalları ( $\tilde{a}_k$ ) ve bu sonuçla elde edilen diğer veriler kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.42-3.45) (Claussen 2007).

$$\tilde{a}_k = \sum_{i=0}^{k_{max}-k} c_{i,k+i} \quad (3.42)$$

$$T = \sum_{k=0}^{k_{max}} \tilde{a}_k \quad (3.43)$$

$$\forall_k a_k = \frac{\tilde{a}_k}{T} \quad (3.44)$$

$$OdC = - \sum_{k=0}^{k_{max}} \frac{a_k \ln a_k}{\ln(N-1)} \quad (3.45)$$

$k_{max}$ , graftaki en büyük düğüm noktası derecesi,  $k$ , düğüm noktası derecesi,  $c_{ij}$ , bütün düğüm noktalarının  $j \geq i$  dereceli komşularının sayısı,  $\tilde{a}_k$ , matrisin diyagonalı,  $T$ , matrisin diyagonallarının toplamı,  $a_k$ , her bir matris diyagonalının matris diyagonallarının toplamına oranıdır.  $N$  düğüm noktası sayısıdır.

**22. Mesafe Kod Merkezli İndis (Distance Code Centric Index):** Mesafe matrisinde aynı rakamları içeren satırlar aynı satır grubu içinde sayılmaktadır. Her

farklı rakam kombinasyonu düğüm noktası mesafe kodu olarak isimlendirilmektedir (Denklem 3.46). Bu farklı rakam kombinasyonlarının sayısı kullanılarak elde edilen indistir (Mueller ve diğ. 2014).

$$I_{C,code}(G) = - \sum_{i=1}^C \frac{c_i}{N} \log_2 \frac{c_i}{N} \quad (3.46)$$

$c_i$ , aynı düğüm noktası mesafeli düğüm noktalarının sayısıdır,  $C$ , mesafe matrisinde farklı kombinasyonlara sahip farklı satır gruplarının sayısıdır.

**23. Komşuluk HMS İndisi (Adjacency HMS Index):** Komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak hesaplanan indistir (Denklem 3.47) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.47)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  komşuluk matrisinin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**24. Laplasiyen HMS İndisi (Laplacian HMS Index):** Laplasiyen matrisin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.48) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.48)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  laplasiyen matrisin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**25. Arttırılmış HMS İndisi (Augmented HMS Index):** Arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.49) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.49)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**26. Genişletilmiş Komşuluk HMS İndisi (Extended Adjacency HMS Index):** Genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.50) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.50)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**27. Düğüm Noktası Bağlayıcılık HMS İndisi (Vertex Connectivity HMS Index):** Düğüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.51) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.51)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  düğüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**28. Rastgele Hareket Markov HMS İndisi (Random Walk Markov HMS Index):** Rastgele hareket Markov matrisin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.52) (Mueller ve diğ. 2014).

$$H_{Ms}(G) = \sum_{i=1}^k \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \log_2 \left( \frac{|\lambda_i|^{\frac{1}{s}}}{\sum_{j=1}^k |\lambda_j|^{\frac{1}{s}}} \right) \quad (3.52)$$

$\lambda_i$  ve  $\lambda_j$  rastgele hareket Markov matrisin özdeğerleridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**29. Komşuluk SMS İndisi (Adjacency SMS Index):** Komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.53) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.53)$$

$\lambda_k$ , komşuluk matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**30. Laplasiyen SMS İndisi (Laplacian SMS Index):** Laplasiyen matrisin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.54) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.54)$$

$\lambda_k$ , laplasiyen matrisin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**31. Arttırılmış SMS İndisi (Augmented SMS Index):** Arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.55) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.55)$$

$\lambda_k$ , arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**32. Genişletilmiş Komşuluk SMS İndisi (Extended Adjacency SMS Index):** Genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.56) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.56)$$

$\lambda_k$ , genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.



**33. Dügüm Noktası Bağlayıcılık SMS İndisi (Vertex Connectivity SMS Index):** Dügüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.57) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.57)$$

$\lambda_k$  , düğüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğeridir.  $s$  , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**34. Rastgele Hareket Markov SMS İndisi (Random Walk Markov SMS Index):** Rastgele hareket Markov matrisin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.58) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.58)$$

$\lambda_k$ , rastgele hareket Markov matrisin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**35. Komşuluk ISMS İndisi (Adjacency ISMS Index):** Komşuluk matrisinin bütün özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.59) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.59)$$

$\lambda_k$ , komşuluk matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**36. Laplasiyen ISMS İndisi (Laplacian ISMS Index):** Laplasiyen matrisin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.60) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.60)$$

$\lambda_k$ , laplasiyen matrisin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**37. Arttırılmış ISMS İndisi (Augmented ISMS Index):** Arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.61) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.61)$$

$\lambda_k$ , arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**38. Genişletilmiş Komşuluk ISMS İndisi (Extended Adjacency ISMS Index):** Genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.62) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.62)$$

$\lambda_k$ , genişletilmiş komşuluk matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**39. Düğüm Noktası Bağlayıcılık ISMS İndisi (Vertex Connectivity ISMS Index):** Düğüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.63) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.63)$$

$\lambda_k$ , düğüm noktası bağlayıcılık matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**40. Rastgele Hareket Markov ISMS İndisi (Random Walk Markov ISMS Index):** Rastgele hareket Markov matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.64) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IS_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} + |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} + \dots + |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.64)$$

$\lambda_k$ , rastgele hareket Markov matrisin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**41. Arttırılmış PMS İndisi (Augmented PMS Index):** Arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.65) (Mueller ve diğ. 2014).

$$P_{M_s}(G) = |\lambda_1|^{\frac{1}{s}} \cdot |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} \dots |\lambda_k|^{\frac{1}{s}} \quad (3.65)$$

$\lambda_k$ , arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**42. Arttırılmış IPMS İndisi (Augmented IPMS Index):** Arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğerleri kullanılarak elde edilen indistir ve arttırılmış PMS indisinin tersidir (Denklem 3.66) (Mueller ve diğ. 2014).

$$IP_{M_s}(G) = \frac{1}{|\lambda_1|^{\frac{1}{s}} \cdot |\lambda_2|^{\frac{1}{s}} \dots |\lambda_k|^{\frac{1}{s}}} \quad (3.66)$$

$\lambda_k$ , arttırılmış düğüm noktası derecesi matrisinin özdeğeridir,  $s$ , matrisin özdeğerlerinin sayısı çift olduğu zaman 2 alınan, özdeğerlerin sayısı tek olduğu zaman 1 alınan değerdir.

**43. Graf Enerji İndisi (Graph Energy Index):** Komşuluk matrisinin özdeğerlerinin mutlak değerce toplamı alınarak elde edilen indistir (Denklem 3.67) (Zhou ve Gutman 2007).

$$E(G) = \sum_{i=1}^N |\lambda_i| \quad (3.67)$$

$\lambda_i$ , komşuluk matrisinin özdeğeridir.

**44. Laplasiyen Enerji İndisi (Laplacian Energy Index):** Laplasiyen matrisin özdeğerleri ile sistemdeki birbiriyle bağlantısı olan düğüm noktalarının sayısı ve kenar sayısı kullanılarak elde edilen indistir (Denklem 3.68) (Zhou ve Gutman 2007).

$$LE(G) = \sum_{i=1}^N \left| \mu_i - \frac{2|E|}{N} \right| \quad (3.68)$$

$\mu_i$ , laplasiyen matrisin özdeğeridir,  $E$ , kenar sayısıdır,  $N$ , düğüm noktası sayıdır.

**45. Estrada İndisi (Estrada Index):** Grafın komşuluk matrisinin özdeğerleri kullanılarak bulunan indistir (Denklem 3.69). Estrada kompleks şebekelerin merkeziyetini ölçmek için etkili bir metoddur (Du ve Liu 2011).

$$EE(G) = \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \quad (3.69)$$

$\lambda_i$ , komşuluk matrisinin özdeğeridir.

**46. Laplasiyen Estrada İndisi (Laplacian Estrada Index):** Grafın laplasiyen matrisinin özdeğerleri kullanılarak bulunan indistir (Denklem 3.70) (Du ve Liu 2011).

$$LEE(G) = \sum_{i=1}^N e^{\mu_i} \quad (3.70)$$

$\mu_i$ , laplasiyen matrisin özdeğeridir.

**47. Spektral Yarıçap İndisi:** Bir ağın spektral yarıçapı, grafın komşuluk matrisinin sıfırdan farklı en büyük özdeğeridir (Denklem 3.71) (Mueller ve diğ. 2014).

$$S_pRad = \max\{|\lambda_i|\} \quad (3.71)$$

$\lambda_i$ , komşuluk matrisinin özdeğeridir.

**48. Ortalama Yol Uzunluğu İndisi:** Bir ağın tüm düğüm noktası çiftlerini birleştiren mesafelerin ortalama değeridir. Birbiri ile bağlantısı olan düğüm noktalarının sayısı kullanılarak bulunur (Denklem 3.72) (Csardi ve Nepusz 2006).

$$l = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} d_{ij} \quad (3.72)$$

$N$ , düğüm noktası sayısı,  $d_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafedir.

**49. Çap İndisi:** Bir ağın çapı, tüm düğüm noktası çiftleri ele alındığında en kısa mesafelerin en büyük olanıdır. Çap iki düğüm noktasının birbiriyle haberleşebilme yeteneğini gösterir.  $d$  küçüldükçe düğüm noktaları arasındaki mesafelerin daha kısa olması beklenir (Denklem 3.73) (Albert ve diğ. 2000).

$$d = \max(d_{ij}) \quad (3.73)$$

$d_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafedir.

**50. Yoğunluk İndisi:** Bir ağın yoğunluğu, mevcut ayrıtlarının sayısının mümkün olan tüm ayrıtların sayısına oranıdır (Denklem 3.74) (Csardi ve Nepusz 2006).

$$q = \frac{2m}{N(N-1)} \quad (3.74)$$

$m$  ayrıt sayısı ve  $N$  düğüm noktası sayısıdır.

**51. Küme Sayısı İndisi (Cluster No Index):** Birbirine bağlı düğüm noktaları bir grup olarak düşünülürse bu grupların sayısı cluster no'yu verir (Csardi ve Nepusz 2006).

### 3.2 GIRAFFE İle Monte Carlo Simülasyonları

Varsayımsal su dağıtım sistemlerinin sismik performansı GIRAFFE programında yapılan Monte Carlo Simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Bir düğüm noktasının elenmesi için minimum basınç -5 psi (-0.34 atm) olarak kabul edilmiştir. Simülasyon süresi 24 saat alınmıştır. Dağıtım sistemi bir rezervuardan beslendiği ve rezervuarların su miktarında azalma olmadığı kabul edildiği için analiz süresinin artması sonucu değiştirmemektedir. Eğer rezervuar yerine depo kullanılsaydı bu durumda zaman içerisinde depodaki suyun azalması da hesaba katılacaktı. Yani

başlangıçta bir düğüm noktasının talebi karşılanabilirken 24 saat sonra depodaki suyun bitmesiyle talep karşılanamayabilir. GIRAFFE ile yapılan Monte Carlo simülasyonlarının sayısı Tablo 3.3’de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Monte Carlo Simülasyon Sayıları

SİSTEM	ONARIM ORANI			
	0.2	0.5	2.0	4.0
	SİMÜLASYON SAYISI			
<b>H1</b>	2000	2000	2000	1284
<b>H2</b>	2000	2000	754	545
<b>H3</b>	1987	1041	430	340
<b>H4</b>	2000	2000	1419	767
<b>H5</b>	2000	1978	657	425
<b>H6</b>	2000	2000	1115	434
<b>H7</b>	2000	2000	2000	1286
<b>H8</b>	2000	2000	767	545
<b>H9</b>	1996	1085	434	340

### 3.3 Pearson ve Spearman Korelasyonları

Tez kapsamında, her bir Monte Carlo simülasyonu sonucu elde edilen servis oranları ile graf indislerinin ilişkisini incelemek amacıyla pearson korelasyonu ve spearman korelasyonu değerleri hesaplanmıştır.

#### 3.3.1 Pearson Korelasyon Katsayısı

Pearson korelasyon katsayısı ( $r$ ), iki sürekli değişken arasındaki doğrusal ilişkinin kuvveti ve yönü hakkında bilgi verir. Her iki değişkenin normal dağılım veya normal dağılım özelliği gösterdiği durumlarda kullanılır.

##### Özellikleri

1.  $r$ 'nin değeri -1 ile +1 arasında değişir.

2.  $r$ 'nin işareti değişkenlerden biri artarken diğerinin de arttığını (pozitif) veya azaldığını (negatif) gösterir.
3.  $r$ 'nin büyüklüğü saçılım grafiğinde noktaların düz bir hatta ne kadar yakın olduğunu gösterir. +1 veya -1 olması arada mükemmel bir ilişki olduğunu gösterir (pratikte genelde mümkün değil). 0 olması ise arada doğrusal bir ilişki olmadığını gösterir.  $r$ 'nin mutlak değeri arttıkça iki değişken arasındaki ilişki de daha kuvvetli demektir.
4.  $r$  boyutsuzdur.
5.  $r$ 'nin değeri sadece örneklemdeki değişkenlerin küçük ve büyük değerleri arasında geçerlidir. Örneklemden daha küçük veya büyük değerler için bir yorum yapılamaz.
6.  $r^2$ ,  $y$ 'deki değişimin  $x$  ile olan doğrusal ilişkisiyle açıklanabilen kısmını gösterir (Denklem 3.75).

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (3.75)$$

$r$ , korelasyon katsayısı,  $x$  ve  $y$  değişken,  $\bar{x}$  ve  $\bar{y}$  sırası ile  $x$  ve  $y$ 'nin aritmetik ortalamalarıdır (Bonett ve diğ. 2000).

### 3.3.2 Spearman Korelasyon Katsayısı

Her iki değişkenin metrik olmadığı sıralı ölçülerde veya normal dağılım özelliği göstermediği durumlarda sıralamaya dayalı korelasyon değeridir. Doğrudan sıralı olarak elde edilen ya da belli bir kritere göre sıralanmış olan iki değişkenin ilişki miktarını belirlemek amacıyla kullanılır. İki sürekli değişken arasındaki ilişkinin derecesinin hesaplanmasında kullanılır. Spearman korelasyon katsayısı aynı zamanda her iki değişkenin de normal dağılmaması veya değişkenler arasında doğrusal bir ilişkinin olamaması durumlarında kullanılır (Denklem 3.76).

$$r_s = 1 - \frac{6(\sum d_i^2)}{n(n^2-1)} \quad (3.76)$$

$d_i$ ,  $i$ .nci gözlemin sıra numaraları arasındaki fark,  $n$ , iki değişkenli örnekte toplam gözlem sayısıdır (Bonett ve diğ. 2000).



## 4. VARSAYIMSAL SU DAĞITIM SİSTEMLERİ

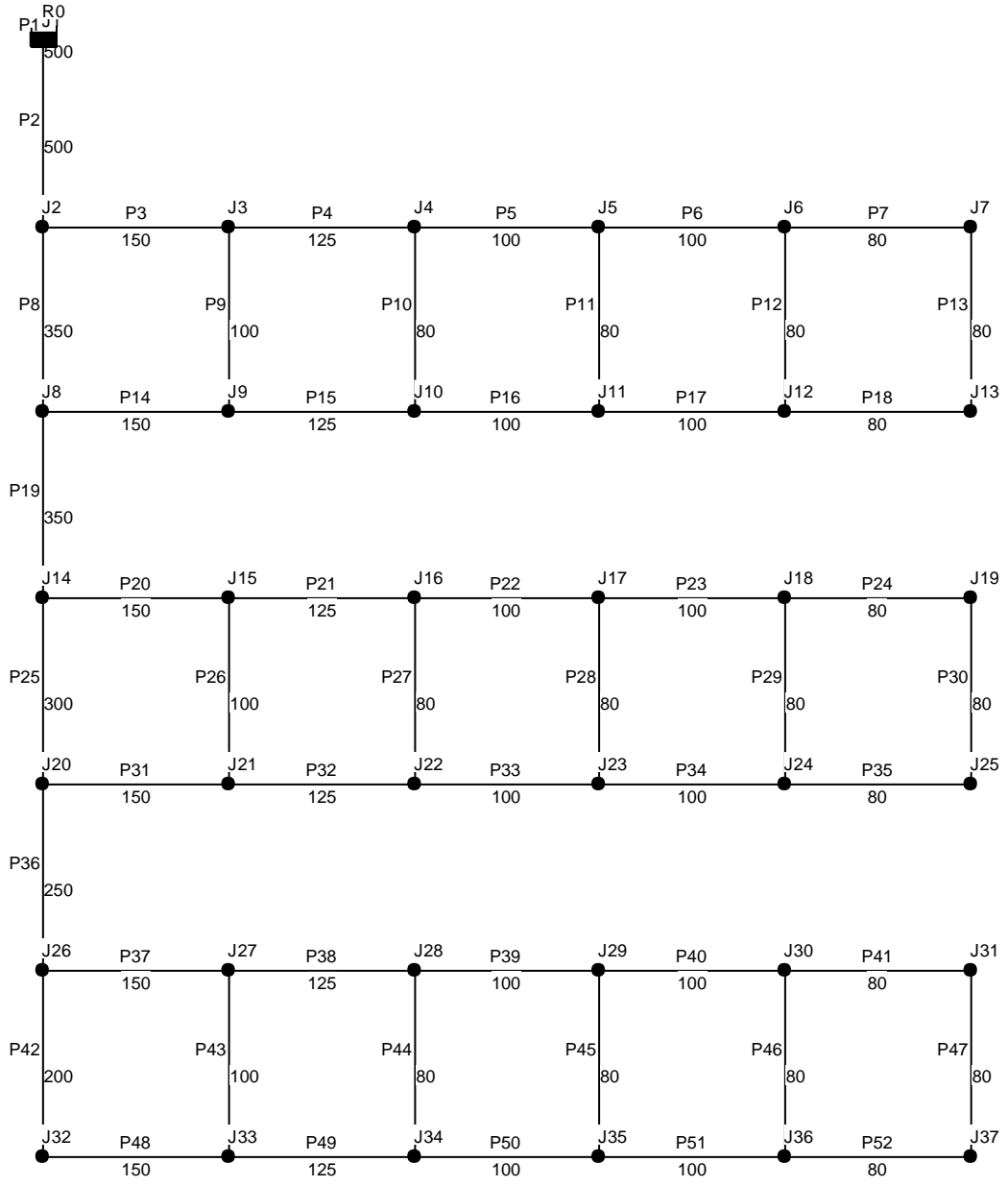
Hasar görmüş su dağıtım sistemlerinin performans göstergeleri varsayımsal sistemler üzerinde incelenmiştir. Bu sistemler küçük sistem, onun iki ve üç katı büyütülmüş hali olan sistemler ve bu sistemlerde rezervuar sayısı artırılarak oluşturulmuş sistemler ile küçük, orta ve büyük sistemlere borular eklenmiş olan sistemlerdir. Varsayımsal su dağıtım sistemlerinin özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Varsayımsal Su Dağıtım Sistemlerinin Özellikleri

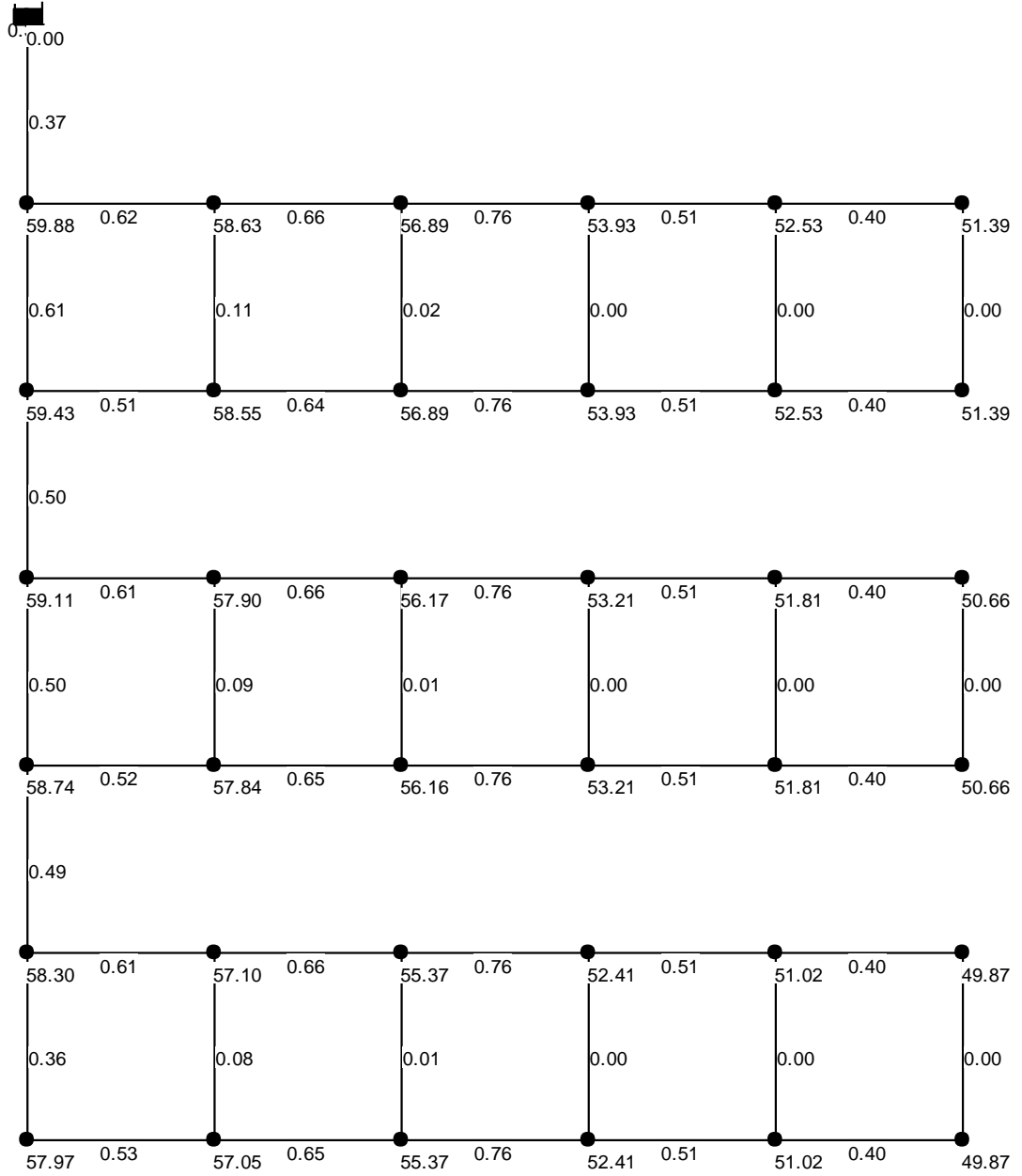
Varsayımsal Su Dağıtım Sistemleri	Boru Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Rezervuar Sayısı
H1	52	37	1
H2	103	73	1
H3	154	109	1
H4	105	74	2
H5	156	110	2
H6	158	111	3
H7	54	37	1
H8	108	73	1
H9	166	109	1

### 4.1 H1 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

İlk varsayımsal sistem olan H1 varsayımsal sistemi 52 adet boru, 37 adet düğüm noktası ve bir tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.1). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre onun dışındaki diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metre ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre, diğer 51 adet borunun uzunluğu 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğer bütün düğüm noktalarında 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Rezervuarın su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 500 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.1). Su dağıtım sistemi varsayımsal bir sistem olsa da yönetmeliklerdeki hız ve basınç kısıtlarına uygun değerler seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.2’ de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



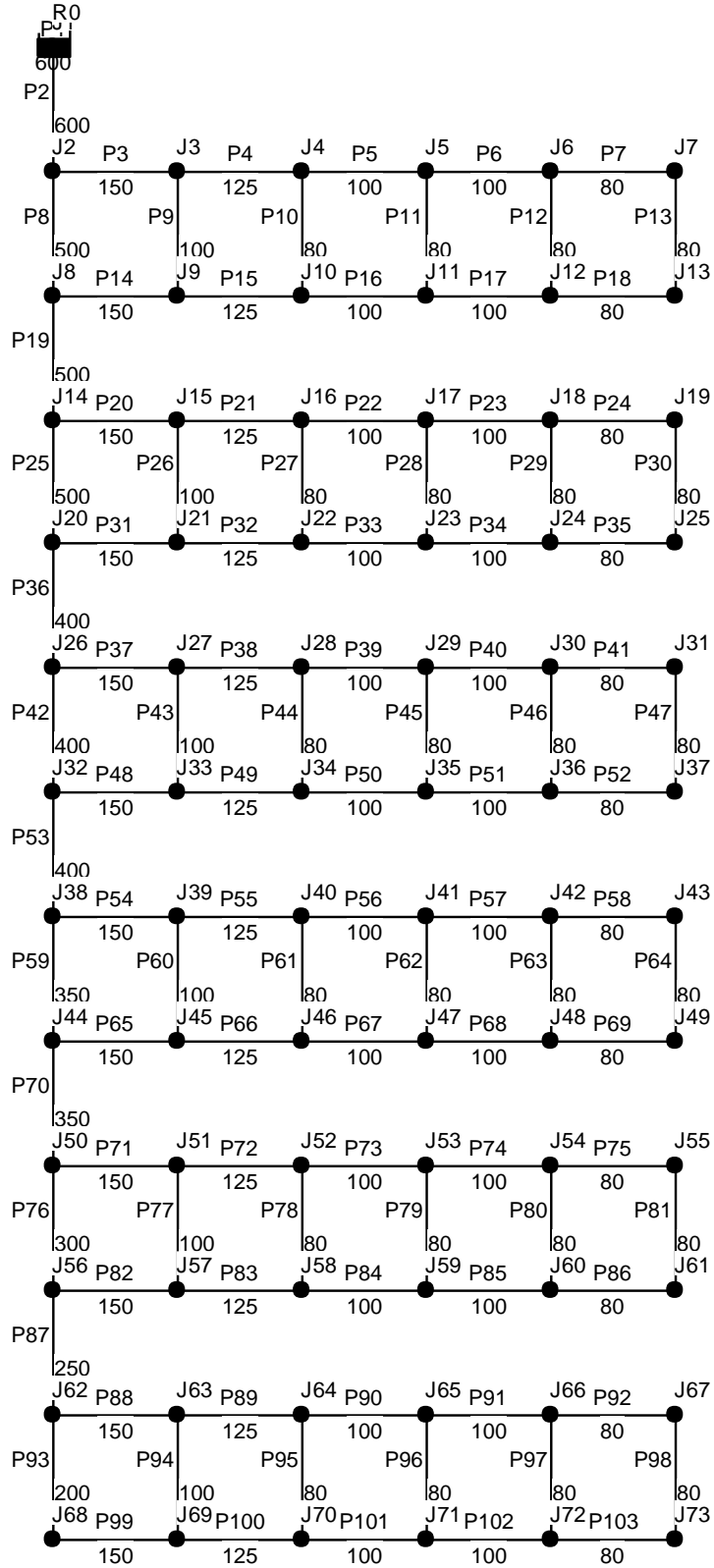
Şekil 4.1: H1 Sisteminin Şebeke Planı



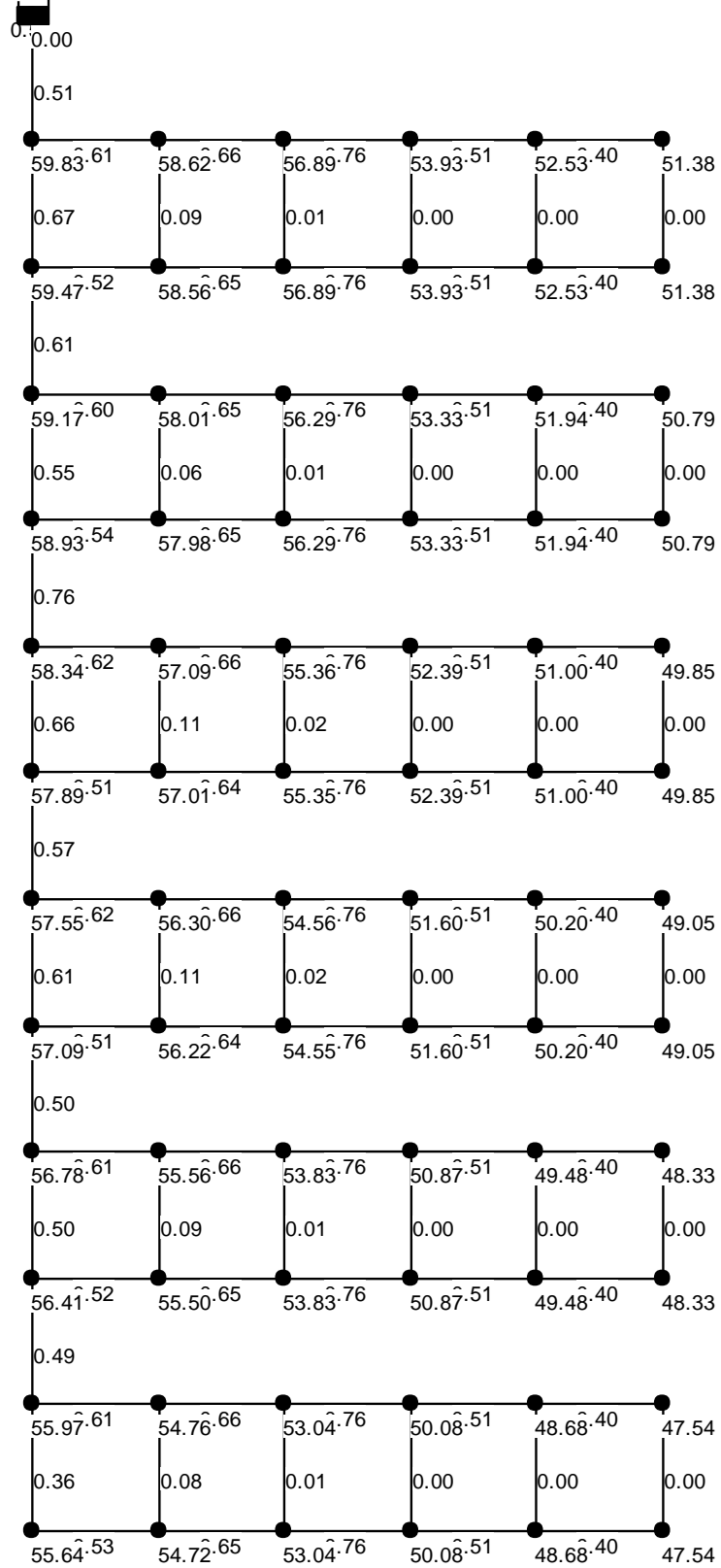
Şekil 4.2: H1 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

## 4.2 H2 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

Bu sistem ilk varsayımsal sistemin iki kat büyütölmüş halidir. Sistem 103 adet boru, 73 adet düğüm noktası ve 1 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.3). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre, diğör bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre, diğör boruların hepsinin uzunluğu da 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğör düğüm noktalarında 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Boru çapları 80 mm ile 600 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.3). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.4’de verilmiştir. EPANET simölasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



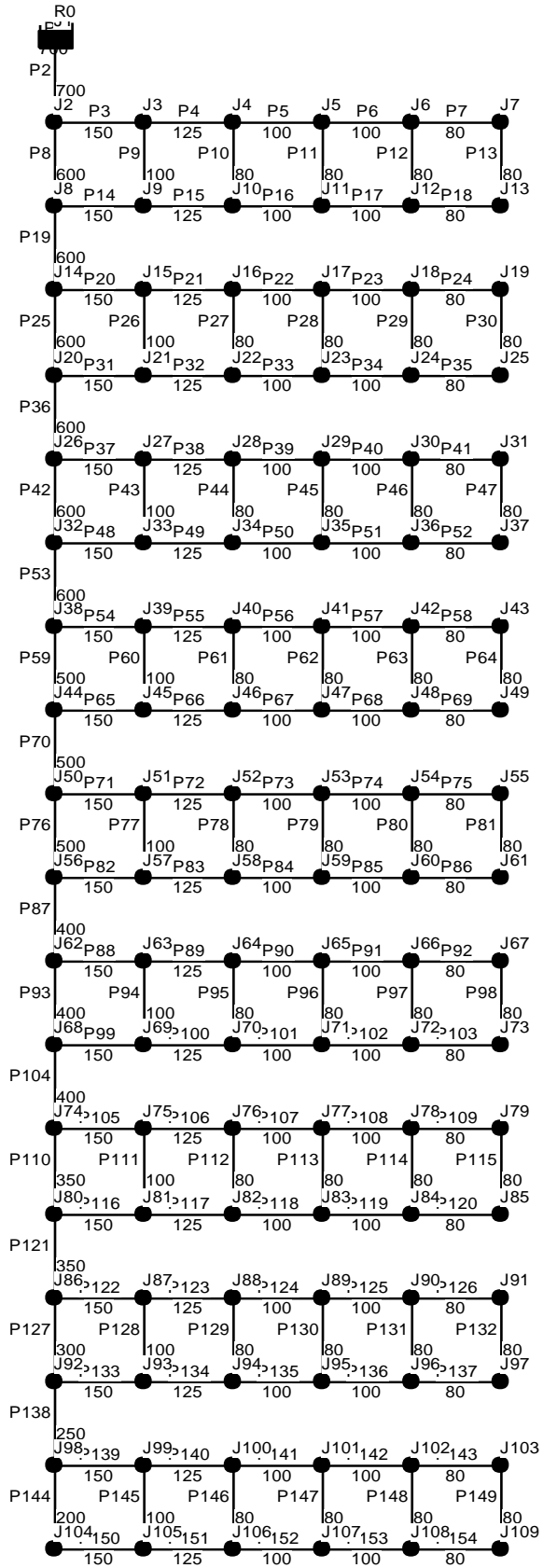
Şekil 4.3: H2 Sisteminin Şebeke Planı



Şekil 4.4: H2 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

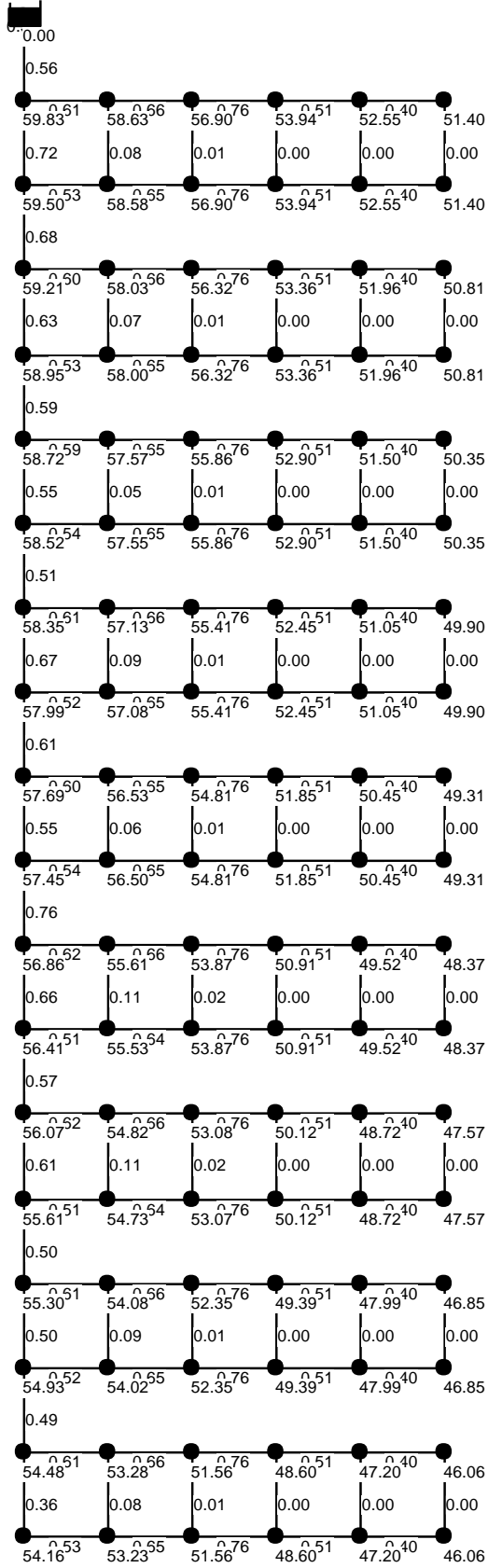
### 4.3 H3 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

Bu sistem ilk varsayımsal sistemin üç kat büyütülmüş yani H1 ve H2 sistemlerinin uç uca eklenmiş halidir. Sistem 154 adet boru, 109 adet düğüm noktası ve 1 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.5). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre diğer bütün boruların uzunluğu 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğer düğüm noktalarının hepsinde 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Rezervuarın su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktül demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 700 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.5). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.6'da verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.5: H3 Sisteminin Şebeke Planı

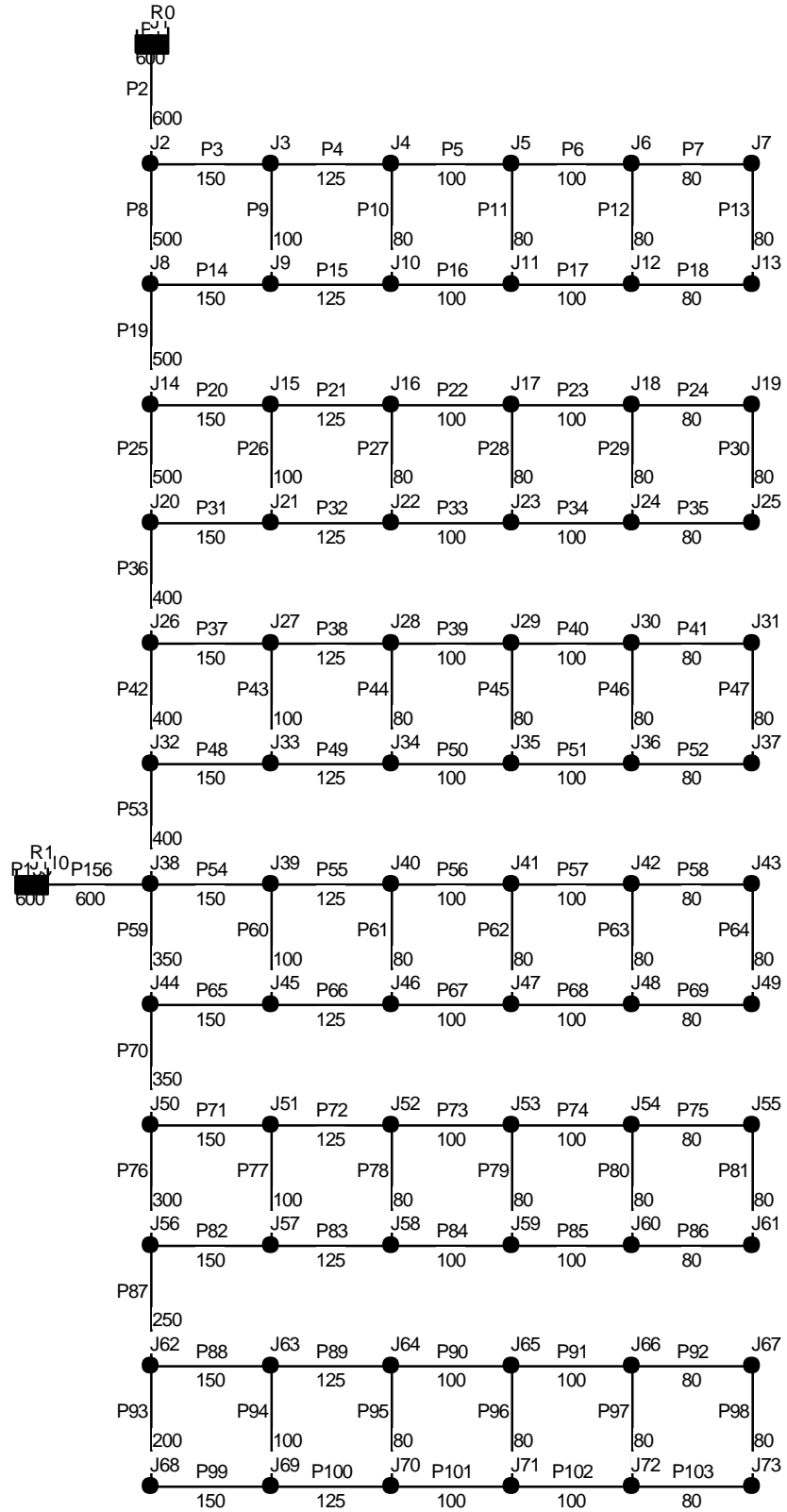




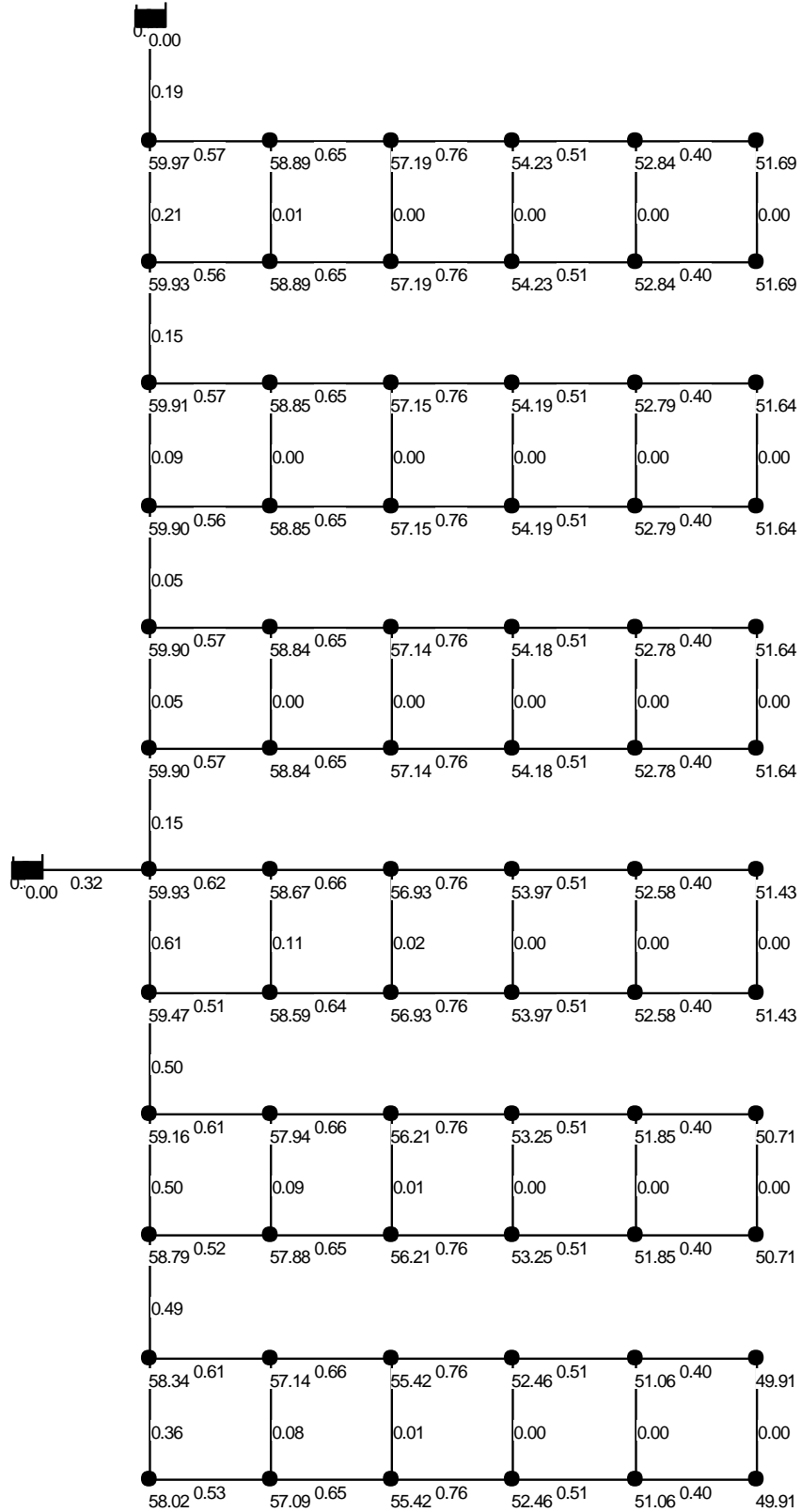
Şekil 4.6: H3 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

#### 4.4 H4 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

Bu sistem H2 varsayımsal sistemine bir tane rezervuar eklenmiş sistemdir ve 105 adet boru, 74 adet düğüm noktası ve 2 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.7). J1 ve J110 düğüm noktalarının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 ve P155 borularının uzunlukları 1 metre, diğer bütün boruların uzunlukları 400 metredir. J1 ve J110 düğüm noktalarında 0 diğer düğüm noktalarının hepsinde 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. R0 ve R1 rezervuarlarının su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 600 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.7). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.8’de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



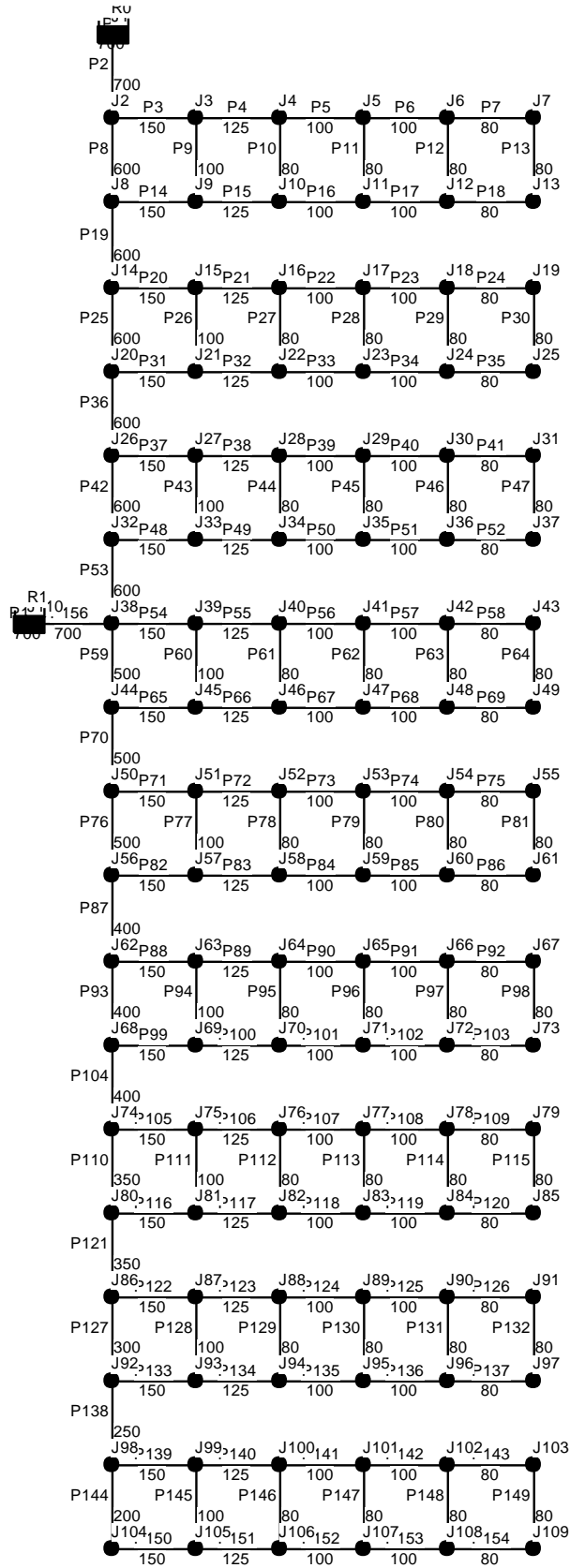
Şekil 4.7: H4 Sisteminin Şebeke Planı



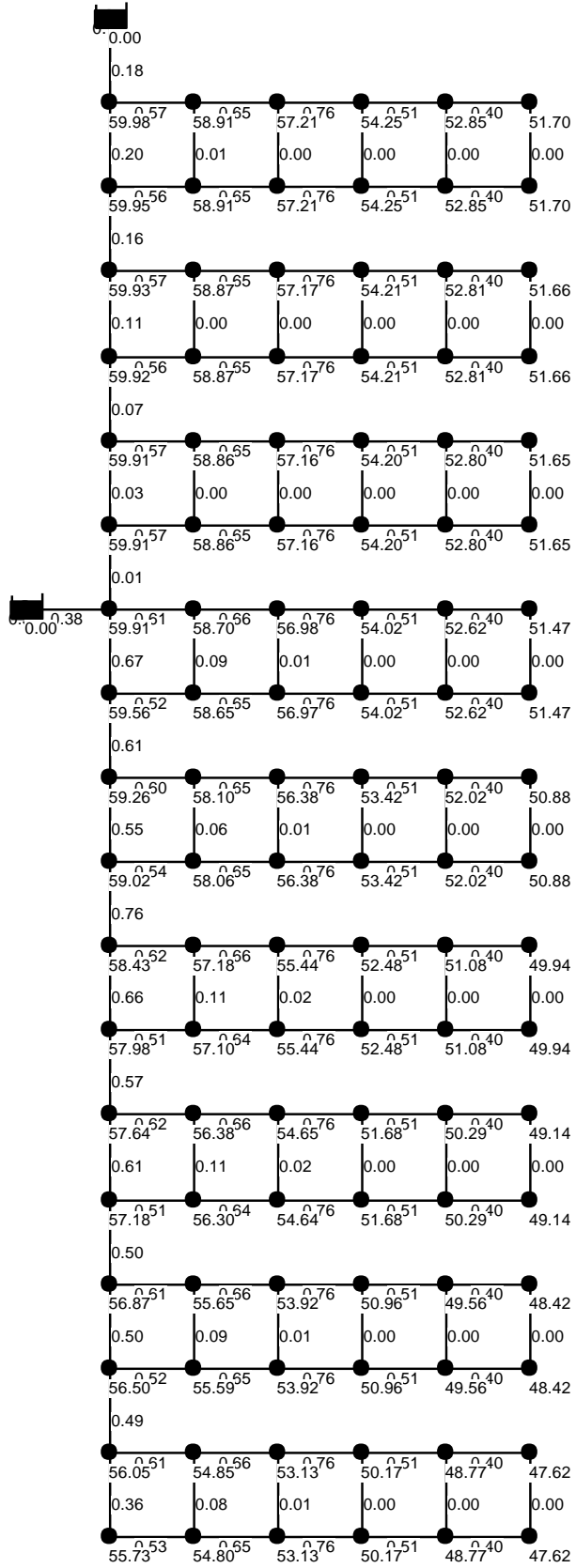
Şekil 4.8: H4 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

#### 4.5 H5 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

Bu sistem H3 varsayımsal sistemine bir tane rezervuar eklenmiş sistemdir ve 156 adet boru, 110 adet düğüm noktası ve 2 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.9). J1 ve J110 düğüm noktalarının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 ve P155 borularının uzunlukları 1 metre, diğer bütün boruların uzunlukları 400 metredir. J1 ve J110 düğüm noktalarında 0 diğer düğüm noktalarının hepsinde 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. R0 ve R1 rezervuarlarının su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 700 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.9). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.10'da verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.9: H5 Sisteminin Şebeke Planı

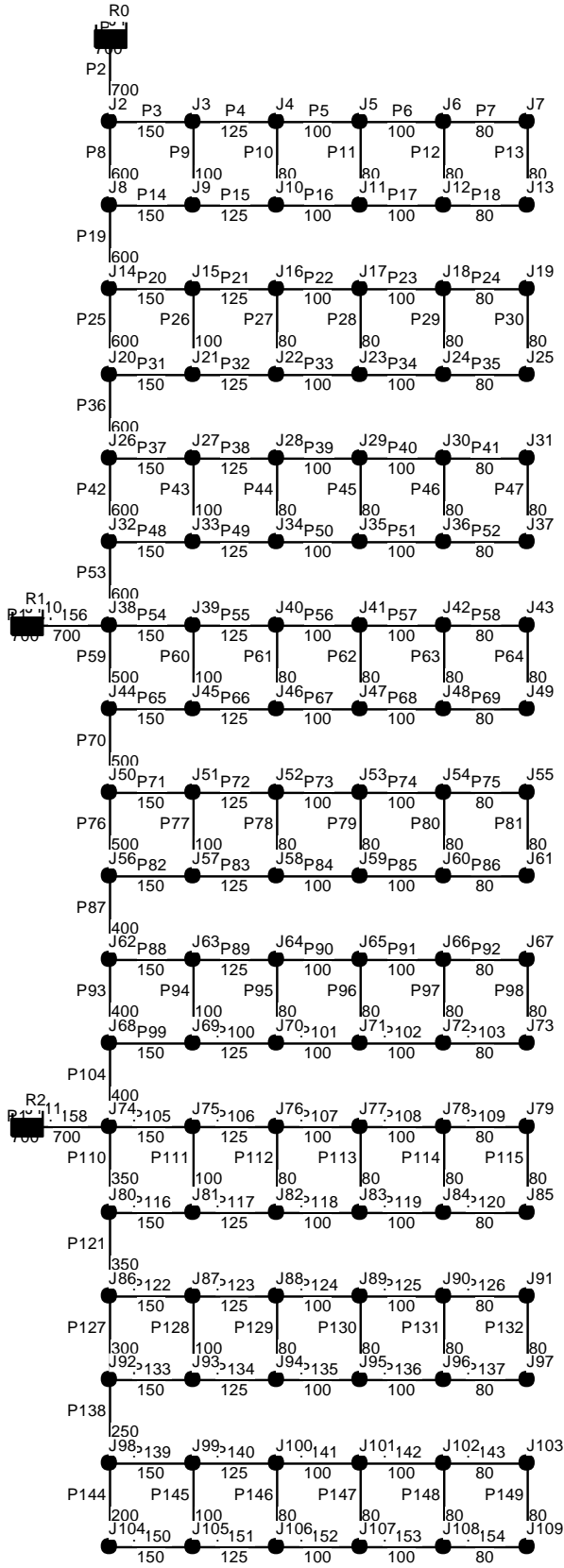


Şekil 4.10: H5 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

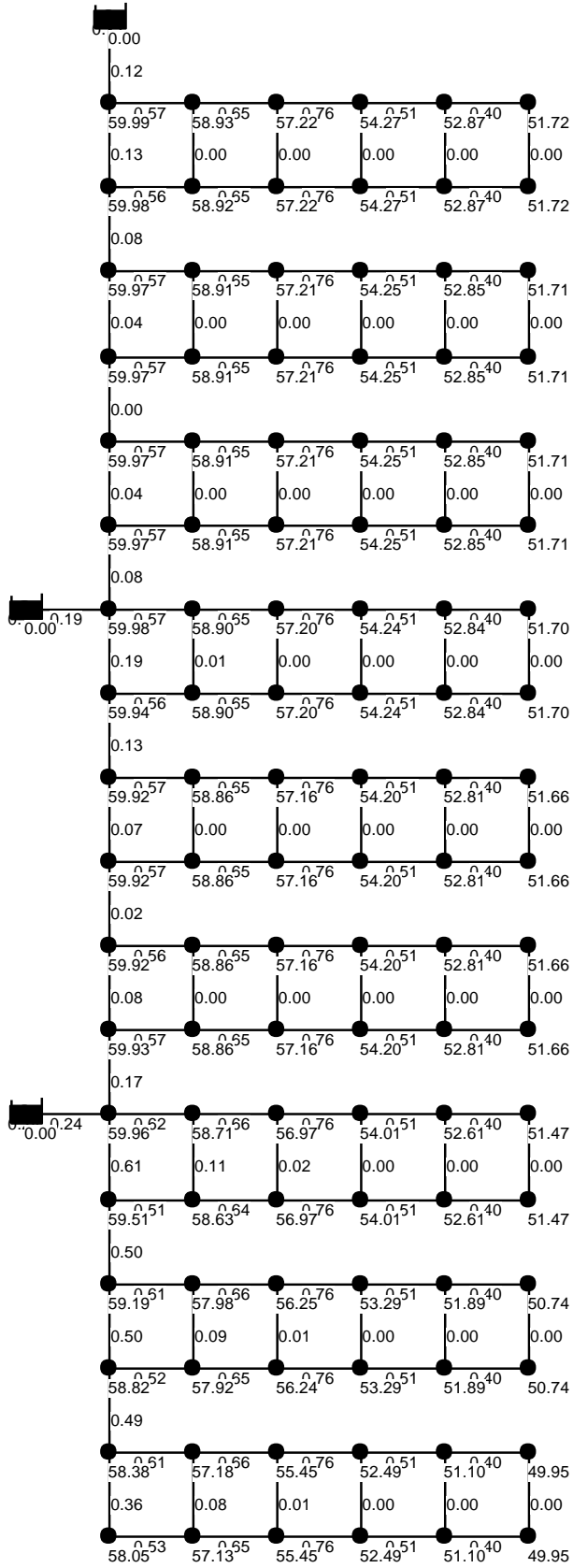
#### 4.6 H6 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

Bu sistem H3 varsayımsal sistemine 2 tane rezervuar eklenmiş sistemdir ve 158 adet boru, 111 adet düğüm noktası ve 3 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.11). J1, J110 ve J111 düğüm noktalarının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1, P155 ve P157 borularının uzunlukları 1 metre, diğer bütün boruların uzunlukları 400 metredir. J1, J110 ve J111 düğüm noktalarında 0 diğer düğüm noktalarının hepsinde 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. R0, R1 ve R2 rezervuarlarının su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 700 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.11). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.12’de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.





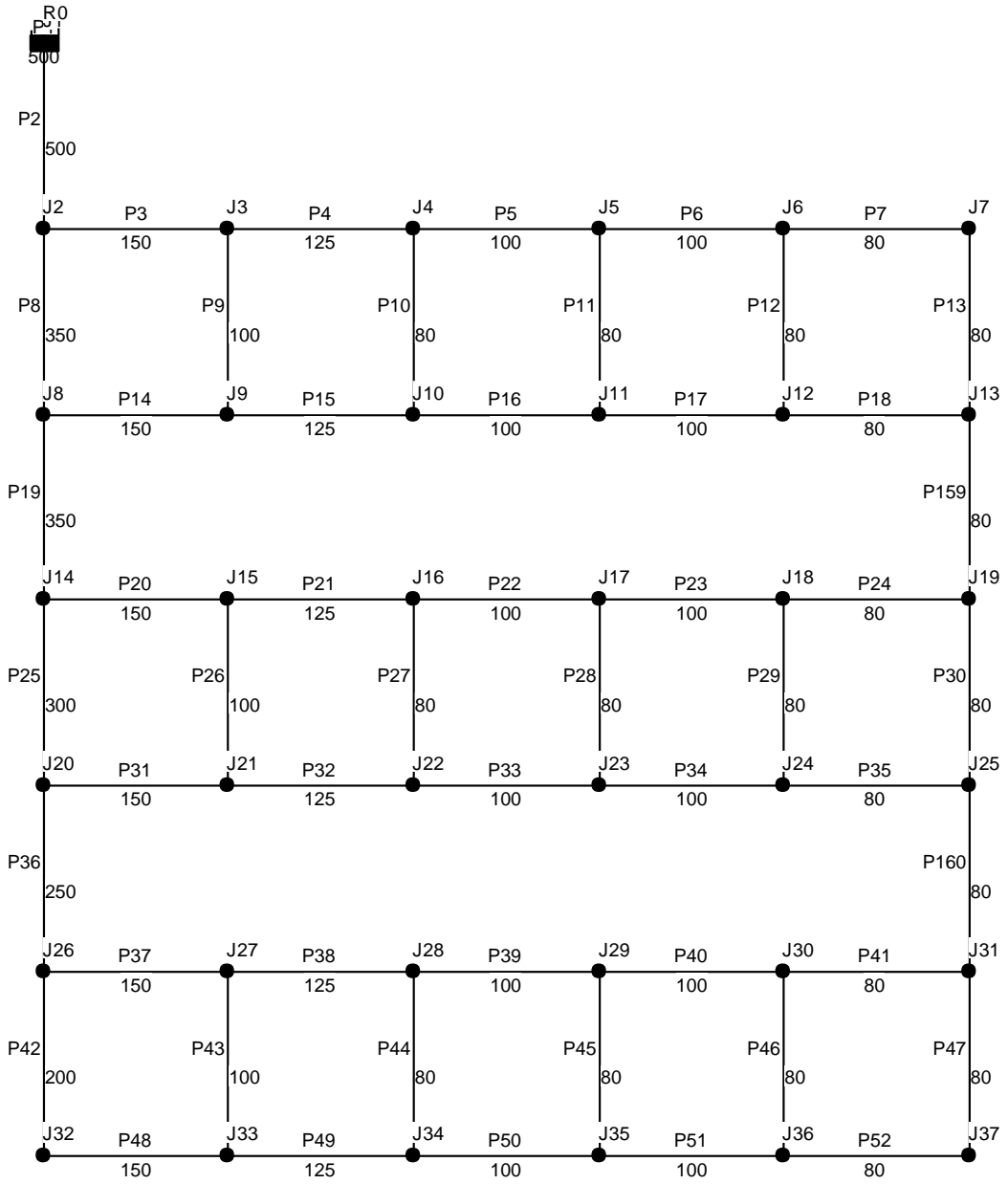
Şekil 4.11: H6 Sisteminin Şebeke Planı



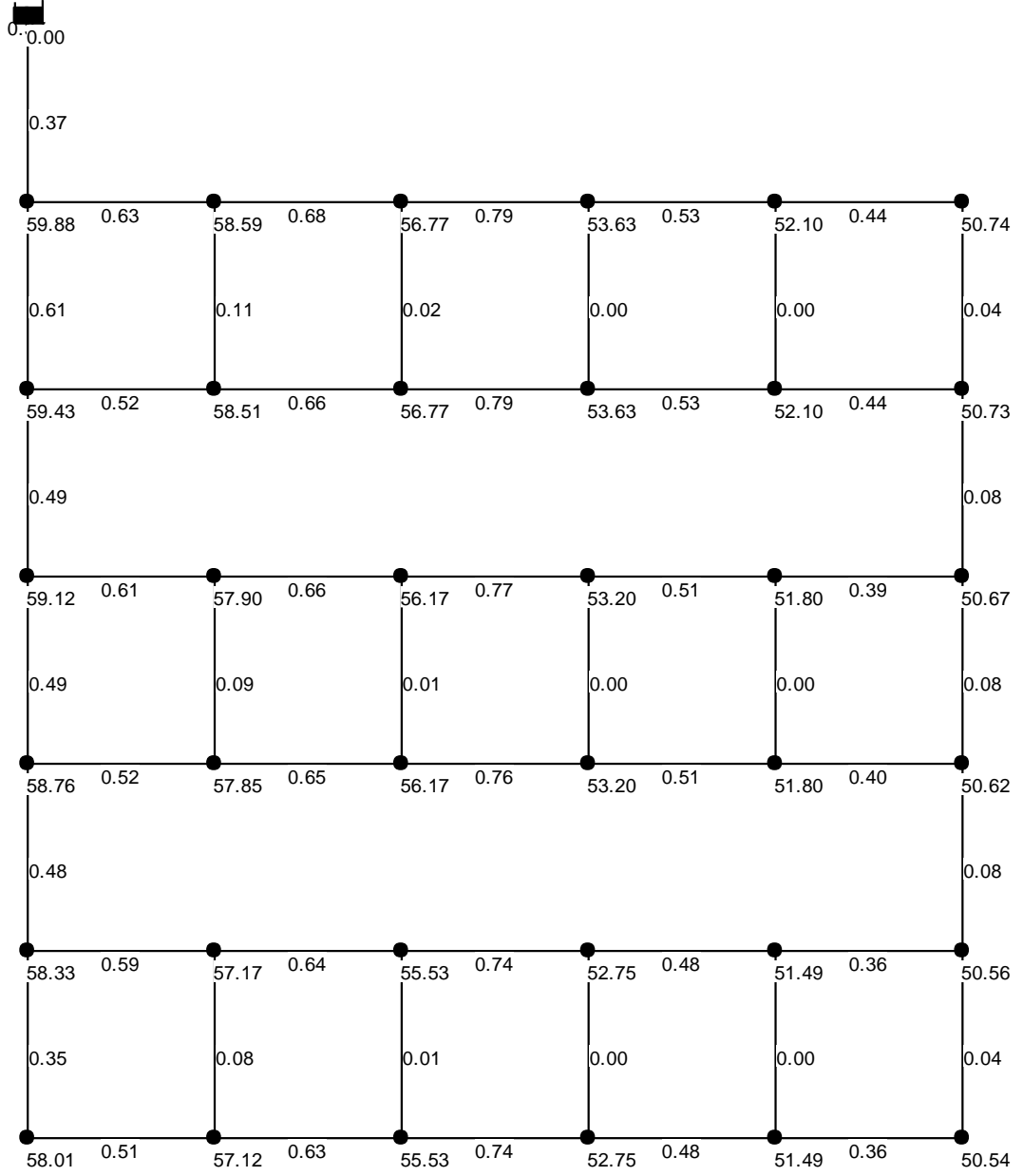
Şekil 4.12: H6 Sisteminin Akım Hızları ve Basınçları

#### 4.7 H7 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

H1 su dağıtım sisteminin ayrıık bölgelerinin uç kısımlarından birer boruyla birleştirilerek rezervuardan sistemin uç noktalarına giden alternatif bir güzergâh oluşturulmuş halidir. Sistem 54 adet boru, 37 adet düğüm noktası ve bir tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.13). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre onun dışındaki diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metre ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre, diğer 53 adet borunun uzunluğu 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğer bütün düğüm noktalarında 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Rezervuarın su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 500 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.13). Su dağıtım sistemi varsayımsal bir sistem olsa da yönetmeliklerdeki hız ve basınç kısıtlarına uygun değerler seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.14’de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



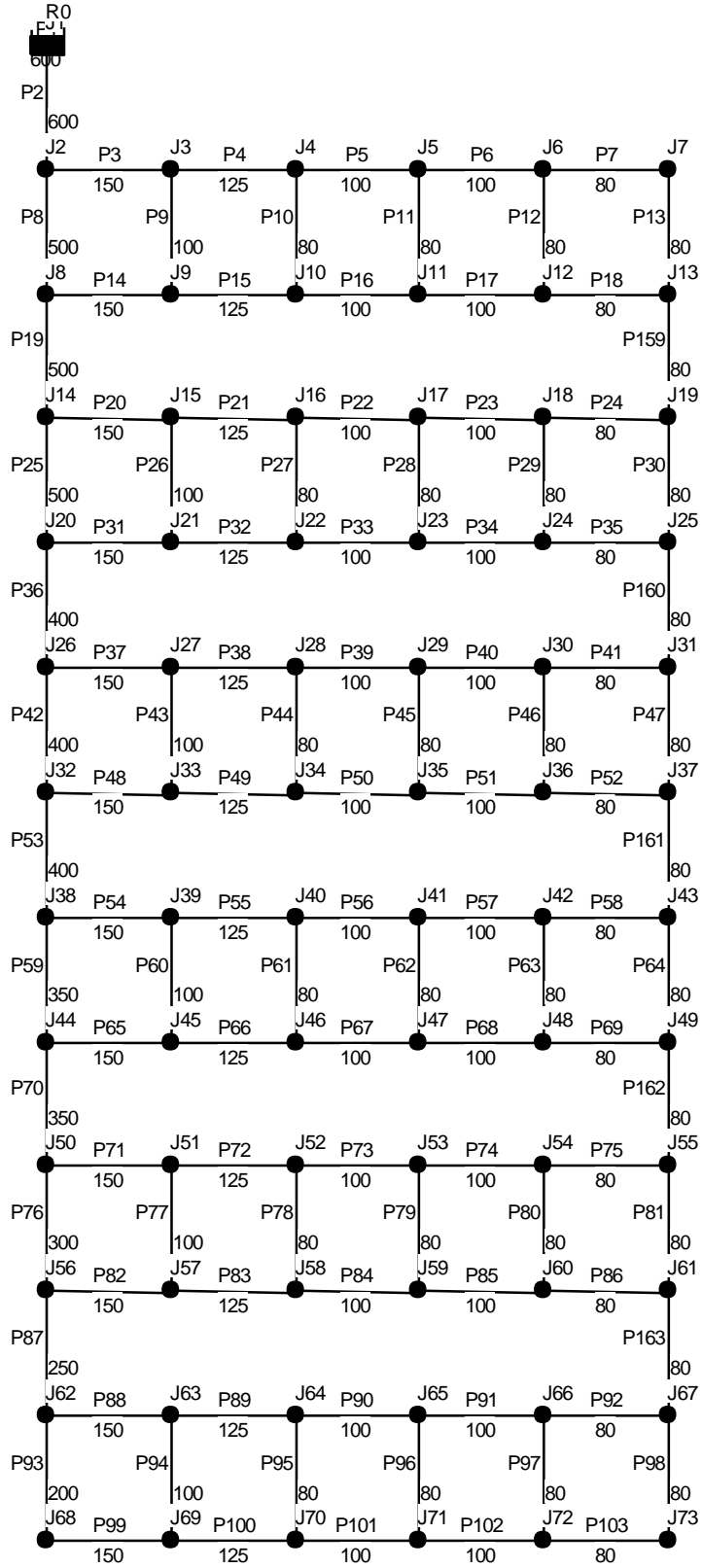
Şekil 4.13: H7 Sisteminin Şebeke Planı



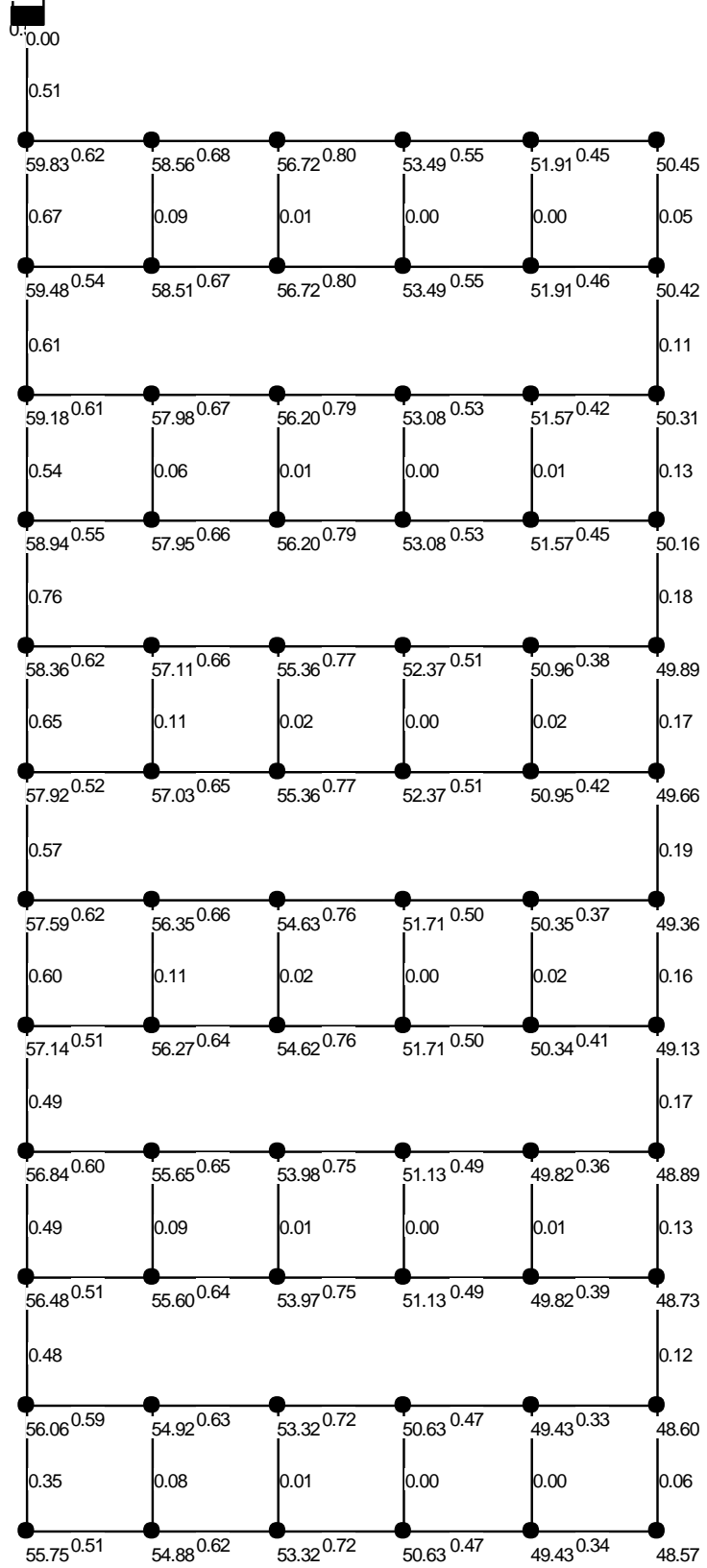
Şekil 4.14: H7 Sisteminin Akım Hızları ve Basıncıları

#### 4.8 H8 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

H2 su dağıtım sisteminin ayrıık bölgelerinin uç kısımlarından birer boruyla birleştirilerek rezervuardan sistemin uç noktalarına giden alternatif bir güzergâh oluşturulmuş halidir. Sistem 108 adet boru, 73 adet düğüm noktası ve 1 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.15). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre, diğer boruların hepsinin uzunluğu da 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğer düğüm noktalarında 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Boru çapları 80 mm ile 600 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.15). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.16'da verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.15: H8 Sisteminin Şebeke Planı

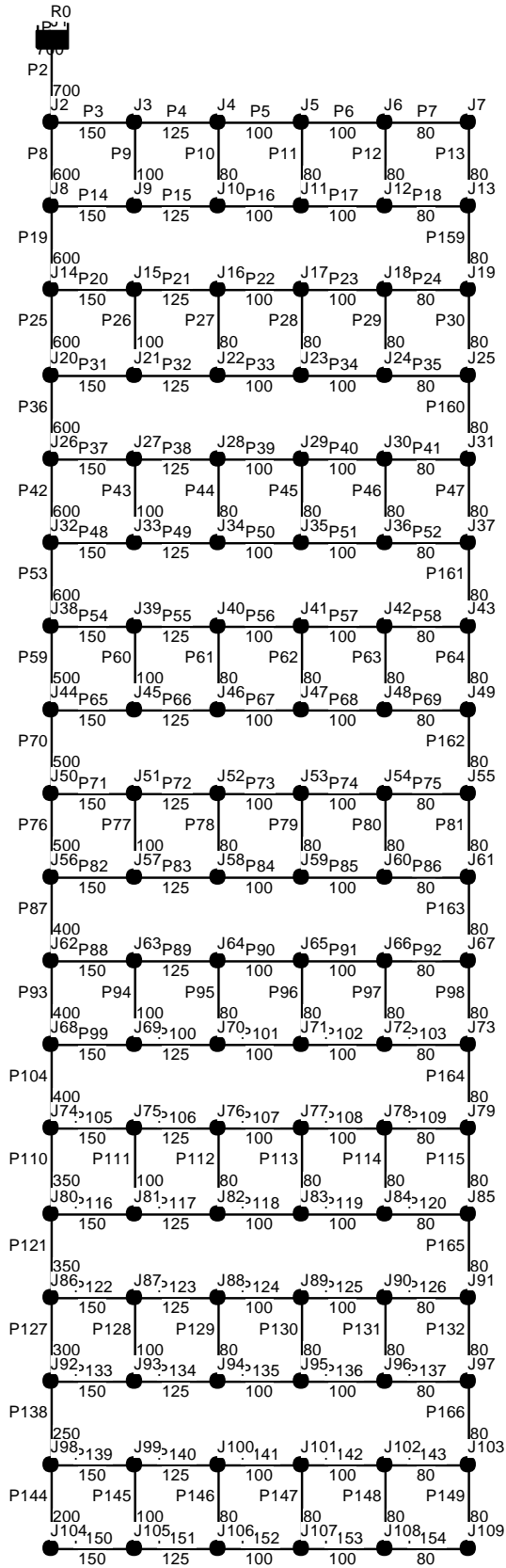


Şekil 4.16: H8 Sisteminin Akım Hızları ve Basıncı

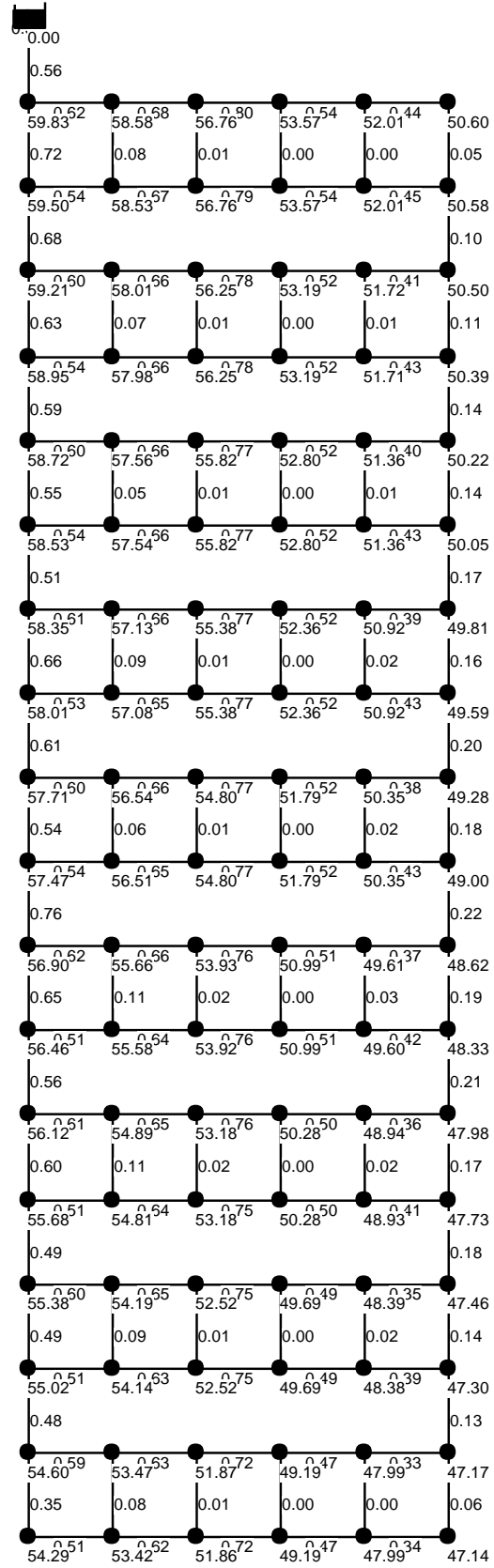


#### 4.9 H9 Varsayımsal Su Dağıtım Sistemi

H3 su dağıtım sisteminin ayrıık bölgelerinin uç kısımlarından birer boruyla birleştirilerek rezervuardan sistemin uç noktalarına giden alternatif bir güzergâh oluşturulmuş halidir. Sistem 166 adet boru, 109 adet düğüm noktası ve 1 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 4.17). J1 düğüm noktasının kotu 160 metre, diğer bütün düğüm noktalarının kotu 100 metredir ve P1 borusunun uzunluğu 1 metre diğer bütün boruların uzunluğu 400 metredir. J1 düğüm noktasında 0, diğer düğüm noktalarının hepsinde 2 litre/s debi talep edildiği varsayılmıştır. Rezervuarın su yüzeyi kotu 160 metre ve tüm borular Williams Hazaen pürüzlülük katsayısı 130 olan düktil demir borulardır. Boru çapları 80 mm ile 700 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.17). Sistemdeki hız ve basınç değerleri yönetmeliklerdeki kısıtlara uygun olarak seçilmiştir. Su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki hızlar Şekil 4.18'de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.17: H9 Sisteminin Şebeke Planı



Şekil 4.18: H9 Sisteminin Akım Hızları ve Basıncıları

## 5. SONUÇLAR

Çalışma sonuçlarına göre bütün sistemlerde onarım oranı arttıkça servis oranı azalmaktadır (Şekil 5.1). Bir rezervuardan beslenen sistem büyüdükçe (H1, H2, H3) bütün onarım oranlarında servis oranı azalmaktadır. Bunun nedeninin çalışmada kullanılan varsayımsal sistemlerin bir hat boyunca büyümesi olduğu düşünülmektedir. Ana hat üzerinde hasar gören bir boru sistemin kalan kısmının su almasını engellemektedir. Böylece sistem büyüdükçe aynı onarım oranı için daha düşük bir servis oranı elde edilmektedir.

Rezervuar sayısı arttıkça bütün onarım oranlarında servis oranı artmaktadır (H3, H5, H6) ve (H2, H4). Bunun nedeni bir rezervuardan su getiren boru hasara uğradığı zaman diğer rezervuarın ihtiyacı karşılayabilmesidir.

Ayrık bölgeleri birleştiren borular eklenmesi bütün onarım oranlarında servis oranını arttırmaktadır (H1-H7, H2-H8, H3-H9). Bunun nedeni suyun iletimi için alternatif bir güzergah bulunmasıdır.

Rezervuar eklenmesinin servis oranını boru eklenmesinden daha fazla arttırdığı gözlenmiştir (H2, H4, H8). Sistemin büyümesi, rezervuar eklenmesi, boru eklenmesi graf indislerini artış ya da azalış şeklinde değiştirmektedir. Şekil 5.2' de Harary indisi değerlerinin grafiği verilmiştir. Bu değerler her bir Monte Carlo simülasyonu sonucunda elde edilen ortalama indis değerleridir.

Harary indisinin değeri grafin büyüklüğü arttıkça artmaktadır yani su dağıtım sistemi büyüdükçe Harary indisi değeri artmaktadır. Sistem hasar gördüğü zaman bazı düğüm noktalarının bağlantıları kopmakta ve sistemin dışında kalmaktadırlar böylece Harary indisi değeri de küçülmektedir. Şekil 5.2' de her bir varsayımsal sistem için OO arttıkça Harary indis değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak sistem büyüdükçe (H1-H2-H3) Harary indisi değeri artacağı için sanki büyük sistemler depremden daha az etkileniyormuş gibi bir izlenim vermektedir. Bunun önüne geçmek için her bir onarım oranı (OO) için Monte Carlo simülasyonları sonucunda elde edilen ortalama Harary indisi değerleri o sistemin hasar görmeden önceki Harary indisi değerlerine bölünerek hasar gören sistemin sağlam duruma göre indis değerindeki azalma (Göreceli Harary İndisi) elde edilmiştir (Şekil 5.3). Bu şekilde elde edilen göreceli

Harary indisinin Şekil 5.1’de verilen Servis Oranı ile benzer karakterde olduğu gözlenmiştir. Harary indisinde olduğu gibi farklı sistemleri birbiriyle karşılaştırabilmek amacıyla hasar gördükten sonraki ortalama graf indisi değeri o sistem için hesaplanmış hasar görmemiş sistemin graf indisine bölünerek graf indisinin oranı elde edilmiştir ve servis oranında gözlenen ilişkilerin graf indisi oranında da görülüp görülmediği araştırılmıştır ve bu doğrultuda servis oranı ile aynı şekilde davranan ve davranmayan indislerden bazılarının grafikleri ile servis oranı ile aynı şekilde davranan ve aynı şekilde davranmayan indisler Tablo 5.1’de verilmiştir ve diğer bütün indislerin göreceli değerlerinin grafikleri EK.A’da gösterilmiştir.

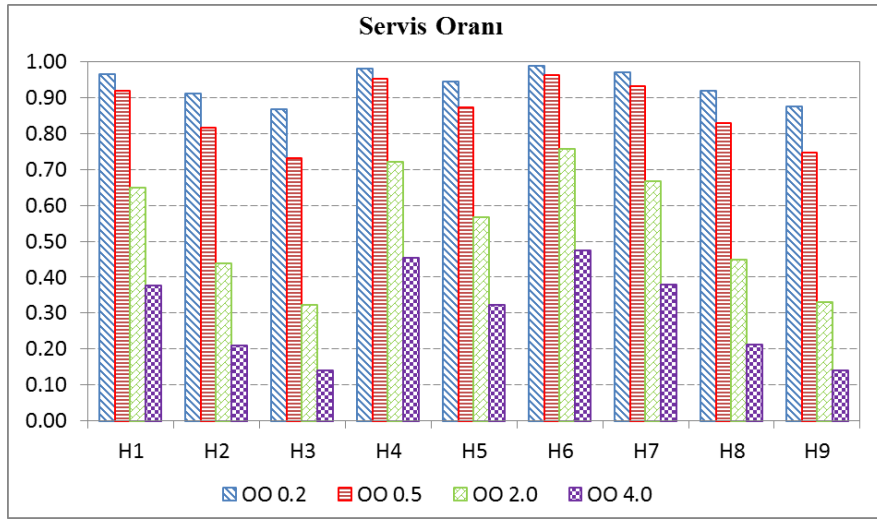
**Tablo 5. 1:** Graf İndislerinin Servis Oranı ile Karşılaştırılması

Sıra	Servis oranı ile aynı şekilde davranan graf indisleri	Servis oranı ile aynı şekilde davranmayan graf indisleri
1	Harary indisi	Düğüm noktası derecesi eşitliği tabanlı bilgi indisi
2	Toplam komşuluk indisi	Kenar eşdeğerliği üzerine ortalama bilgi içeriği indisi
3	Zagreb-1 indisi	Ortalama eklem indisi
4	Zagreb-2 indisi	Graf karmaşıklık indisi
5	Modifiye Zagreb indisi	Köşegen dışı karmaşıklık indisi
6	Değişken Zagreb indisi	Komşuluk ISMS indisi
7	Randic bağlanabilirlik indisi	Laplasiyen ISMS indisi
8	Normalize kenar karmaşıklığı indisi	Arttırılmış ISMS indisi
9	Atom bağlanabilirlik indisi	Genişletilmiş komşuluk ISMS indisi
10	Geometrik aritmetik indisi-1	Düğüm noktası bağlayıcılık ISMS indisi
11	Geometrik aritmetik indisi-2	Rastgele hareket Markov ISMS indisi
12	Entropi indisi	Arttırılmış IPMS indisi
13	Bertz karmaşıklık indisi	Laplasiyen enerji indisi
14	Graf düğüm noktası karmaşıklığı indisi	Spektral yarıçap indisi
15	Kenar büyüklüğü üzerine ortalama bilgi içeriği indisi	Küme sayısı indisi
16	Verimlilik indisi	
17	Mesafe kodu merkez indisi	
18	Komşuluk HMS indisi	
19	Laplasiyen HMS indisi	
20	Arttırılmış HMS indisi	
21	Genişletilmiş komşuluk HMS indisi	
22	Düğüm noktası bağlayıcılık HMS indisi	
23	Rastgele hareket Markov HMS indisi	
24	Komşuluk SMS indisi	
25	Laplasiyen SMS indisi	
26	Arttırılmış SMS indisi	
27	Genişletilmiş komşuluk SMS indisi	
28	Düğüm noktası bağlayıcılık SMS indisi	
29	Rastgele hareket Markov SMS indisi	
30	Arttırılmış PMS indisi	

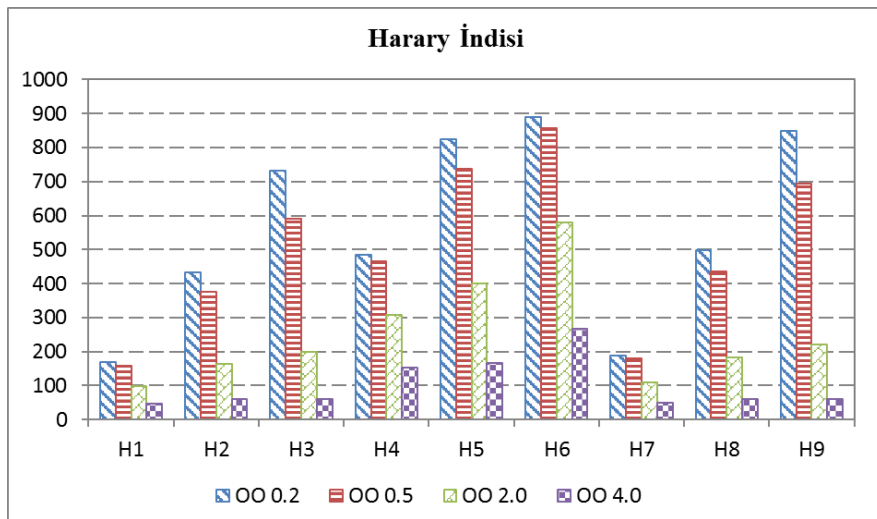
**Tablo 5. 1 (Devam):** Graf İndislerinin Servis Oranı ile Karşılaştırılması

31	Graf enerji indisi	
32	Estrada indisi	
33	Laplasiyen Estrada indisi	
34	Ortalama yol uzunluğu indisi	
35	Çap indisi	
36	Yoğunluk indisi	

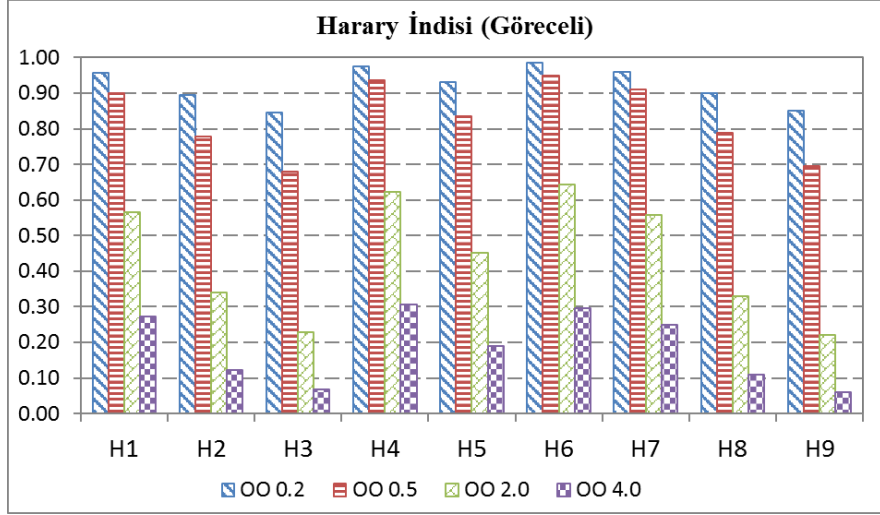
Grafikleri verilen indislerden servis oranı ile aynı şekilde davrananlar Harary indisi ve Ortalama Yol Uzunluğu indisidir. Servis oranı ile aynı şekilde davranmayanlar Köşegendişi Karmaşıklık ve Laplasiyen Enerji indisleridir.



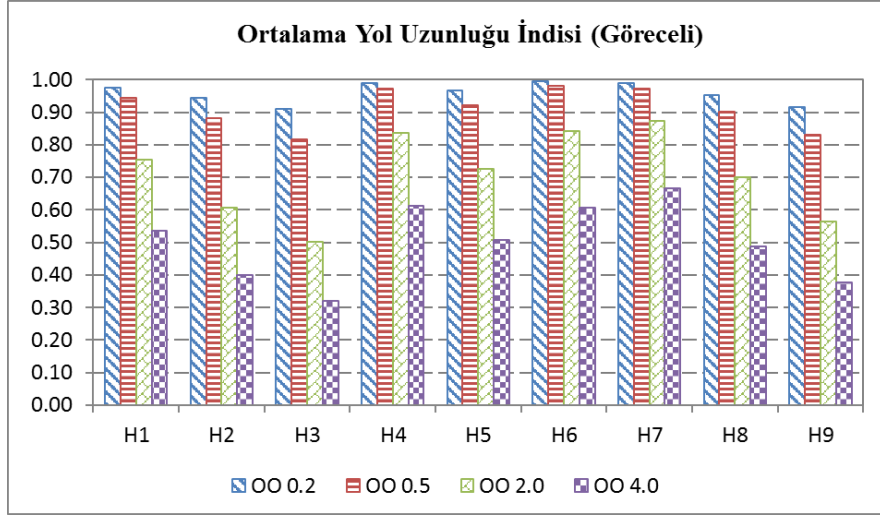
**Şekil 5.1:** Servis Oranının Onarım Oranları ile Değişimi



**Şekil 5.2:** Harary İndisi Değerleri

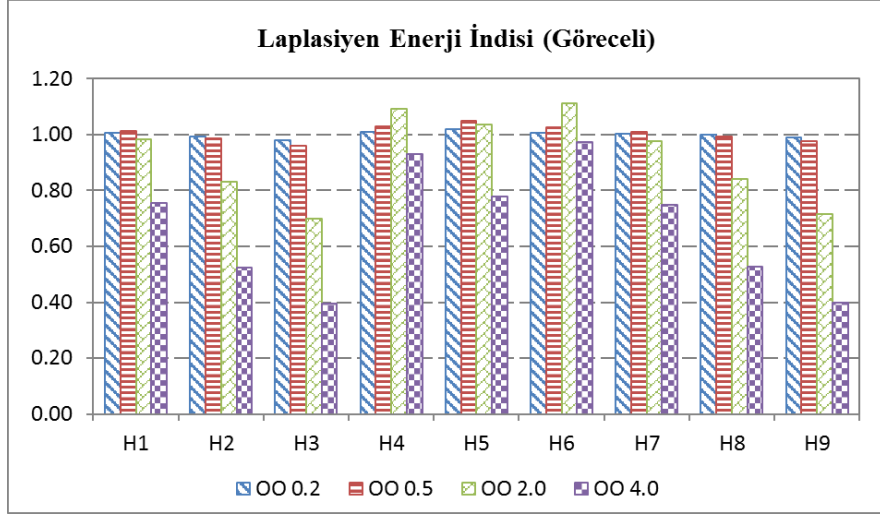


**Şekil 5.3:** Göreceli Harary İndisleri

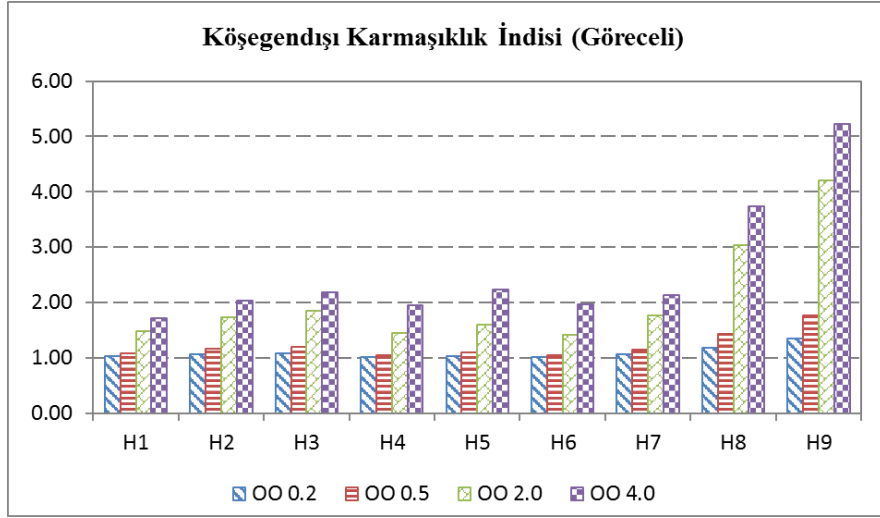


**Şekil 5.4:** Göreceli Ortalama Yol Uzunluğu İndisleri

Aynı şekilde ortalama yol uzunluğu indisinin göreceli durumu da onarım oranı arttıkça azalmaktadır ve bu nedenle servis oranıyla aynı şekilde davranmaktadır (Şekil 5.4). Laplasiyen enerji indisi ise kararlı bir davranış izlememektedir (Şekil 5.5). Bazı sistemlerde OO arttıkça Laplasiyen Enerji indisi azalmakta iken bazı sistemlerde OO arttıkça artmaktadır.



Şekil 5.5: Göreceli Laplasiyen Enerji İndisleri



Şekil 5.6: Göreceli Köşegendışı Karmaşıklık İndisleri

Köşegendışı karmaşıklık indisinde ise bütün sistemlerde onarım oranı arttıkça indis değeri de artmaktadır. Bu şekilde bu indis servis oranı ile zıt şekilde davranmaktadır (Şekil 5.6). Tablo 5.2 ve Tablo 5.3' de Harary, Ortalama Yol Uzunluğu, Laplasiyen Enerji, Köşegendışı Karmaşıklık indislerinin varsayımsal sistemler için tüm onarım oranlarında servis oranı ile aralarında olan Pearson ve Spearman korelasyon katsayısı değerleri verilmektedir. Tablo 5.2 ve Tablo 5.3' den görüleceği gibi Harary indisi ve Ortalama Yol Uzunluğu indisi ile servis oranı arasında her iki korelasyon katsayısı için de %90'dan yüksek değerler görülmektedir. Laplasiyen Enerji ve Köşegendışı Karmaşıklık indisleri ile servis oranı arasında ise daha düşük korelasyon katsayısı değerleri gözlenmektedir. Bu durum Harary, Ortalama Yol Uzunluğu indislerinin servis oranı ile aynı karakterde davrandığının, Laplasiyen Enerji, Köşegendışı Karmaşıklık indislerinin ise servis oranı ile aynı karakterde davranmadığının göstergesidir.



**Tablo 5.2:** İndisler ile Servis Oranı Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

Sistem	Onarım Oranı	Harary İndisi	Ortalama Yol Uzunluğu İndisi	Laplasiyen Enerji İndisi	Köşegendişi Karmaşıklık İndisi
H1	0.2	0.9975	0.9923	0.0276	-0.7825
	0.5	0.997	0.9905	0.1501	-0.7565
	2	0.9932	0.9843	0.7017	-0.3712
	4	0.9877	0.9822	0.9075	0.2319
H2	0.2	0.9976	0.9897	0.5256	-0.8508
	0.5	0.9971	0.9877	0.5872	-0.7842
	2	0.9923	0.9773	0.8392	-0.4326
	4	0.9845	0.9752	0.9541	0.1506
H3	0.2	0.9974	0.9929	0.6218	-0.8319
	0.5	0.9964	0.9907	0.6566	-0.7478
	2	0.9903	0.9772	0.8828	-0.3807
	4	0.9806	0.9746	0.9701	0.1573
H4	0.2	0.9946	0.9623	-0.9806	-0.8025
	0.5	0.9937	0.9595	-0.939	-0.6834
	2	0.9827	0.8844	0.2648	-0.6211
	4	0.9668	0.878	0.9124	-0.4895
H5	0.2	0.9989	0.9954	-0.8517	-0.9234
	0.5	0.998	0.9942	-0.7071	-0.8389
	2	0.9917	0.9507	0.693	-0.6337
	4	0.9748	0.8987	0.9497	-0.496
H6	0.2	0.9886	0.9263	-0.9938	-0.7282
	0.5	0.9826	0.8887	-0.9871	-0.6601
	2	0.9498	0.7556	-0.1749	-0.6246
	4	0.9396	0.756	0.9256	-0.4643
H7	0.2	0.995	0.9235	0.0174	-0.8825
	0.5	0.994	0.9144	0.1544	-0.8638
	2	0.9856	0.8966	0.6849	-0.4938
	4	0.9837	0.9673	0.9046	0.2124

**Tablo 5.2 (Devam):** İndisler ile Servis Oranı Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

Sistem	Onarım Oranı	Harary İndisi	Ortalama Yol Uzunluğu İndisi	Laplasiyen Enerji İndisi	Köşegendişi Karmaşıklık İndisi
H8	0.2	0.9973	0.9837	0.4218	-0.9142
	0.5	0.9965	0.9784	0.5017	-0.8876
	2	0.9876	0.9443	0.8215	-0.5745
	4	0.9831	0.9699	0.9534	0.1389
H9	0.2	0.9974	0.9938	0.5168	-0.89
	0.5	0.9962	0.9912	0.5741	-0.8606
	2	0.9875	0.9632	0.8653	-0.5009
	4	0.9791	0.9702	0.9692	0.1465

**Tablo 5.3:** İndisler ile Servis Oranı Arasındaki Spearman Korelasyon Katsayıları

Sistem	Onarım Oranı	Harary İndisi	Ortalama Yol Uzunluğu İndisi	Laplasiyen Enerji İndisi	Köşegendişi Karmaşıklık İndisi
H1	0.2	1	0.9911	-0.5454	-0.9988
	0.5	0.9999	0.9557	-0.5243	-0.9894
	2	0.9993	0.9861	0.3892	-0.7594
	4	0.9991	0.9851	0.9742	-0.5558
H2	0.2	1	0.9772	-0.1962	-0.997
	0.5	0.9998	0.9687	-0.0803	-0.9682
	2	0.9997	0.9927	0.9056	-0.7747
	4	0.9993	0.9873	0.9953	-0.5774
H3	0.2	1	0.977	-0.1178	-0.9958
	0.5	0.9997	0.9787	0.091	-0.9456
	2	0.9997	0.994	0.9782	-0.7981
	4	0.9993	0.9889	0.9957	-0.5318
H4	0.2	0.9999	0.9659	-0.9999	-0.9965
	0.5	0.999	0.9408	-0.9911	-0.9313
	2	0.9853	0.921	-0.1895	-0.6028

**Tablo 5.3 (Devam):** İndisler ile Servis Oranı Arasındaki Spearman Korelasyon Katsayıları

Sistem	Onarım Oranı	Harary İndisi	Ortalama Yol Uzunluğu İndisi	Laplasiyen Enerji İndisi	Köşegendişi Karmaşıklık İndisi
H4	4	0.9738	0.8715	0.9752	-0.5201
H5	0.2	0.9999	0.9622	-0.9874	-0.9964
	0.5	0.9991	0.9589	-0.9099	-0.9392
	2	0.9917	0.9588	0.7328	-0.6529
	4	0.9814	0.9107	0.9925	-0.4991
H6	0.2	0.9998	0.9309	-0.9998	-0.9946
	0.5	0.9977	0.9018	-0.9982	-0.9098
	2	0.9513	0.8323	-0.5388	-0.6103
	4	0.9449	0.7328	0.9809	-0.4632
H7	0.2	1	0.8497	-0.4319	-0.9996
	0.5	1	0.7689	-0.3872	-0.9967
	2	0.9987	0.8196	0.3669	-0.8404
	4	0.9991	0.9791	0.9733	-0.578
H8	0.2	1	0.9852	-0.0917	-0.9994
	0.5	1	0.9228	0.0266	-0.9919
	2	0.999	0.9628	0.883	-0.8324
	4	0.9993	0.9855	0.9954	-0.5836
H9	0.2	1	0.9838	-0.0038	-0.9959
	0.5	0.9999	0.9638	0.1398	-0.9795
	2	0.9993	0.9792	0.9714	-0.8363
	4	0.9993	0.987	0.9957	-0.5492

Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda elde edilen sonuçlar doğrultusunda Graf indisleri ve sayısı artırılan onarım oranları kullanılarak servis oranını veren bir denklem elde etmek amaçlanmaktadır. Graf indisleri kendi içinde gruplandırılarak hangi grubun su dağıtım sisteminin hangi özelliğini temsil ettiği belirlenecek hangi indisin su dağıtım sisteminin deprem sonrası performansını belirlemede daha uygun olduğu incelenecektir.

## 6. KAYNAKLAR

Adachi, T., Ellingwood, B. R., “Serviceability of earthquake damaged water systems effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability”, *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 78-88, (2008).

Albert, R., Jeong, H., Barabasi, A. L., “Error and attack tolerance of complex networks”, *Nature*; 406: 378-382, (2000).

Applied Technology Council (ATC), “Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States (ATC-25), Redwood City, CA, (1991).

Awumah, K., Goulter, I., “Assesment of reliability in water distribution networks using entropy based measures”, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 309-320,(1990).

Bentes, I., Afonso, L., Varum, H., Pinto, J., Varajao, J., Duarte, A., Agarwal, J., “A new tool to assess water pipe networks vulnerability and robustness”, *Engineering Failure Analysis*, 18(7), 1637-1644, (2011).

Bonchev, D., Rouvray, D. H., “*Complexity in chemistry, biology and ecology*”, Springer, New York, NY, (2005).

Bonchev, D., Mekenyan, O., Trinajstic, N., “Isomer discrimination by topological information approach”, *Journal of Computational Chemistry*, vol. 2, pp. 127-148, (1981).

Bonett, D. G., Wright, T. A., “Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations”, *Psychometrika*, vol. 65, pp. 23-28, (2000).

Caporossi, G., Gutman, I., Hansen, P., Pavlovic, L., “Graphs with maximum connectivity index”, *Computational Biology and Chemistry*, 27, 85-90, (2003).

Chou, K. W., Liu, G. Y., Yeh, C. H., Huang, C. W., “Taiwan water supply network’s seismic damage simulation applying negative pressurre treatment”, *5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, Taipei, Taiwan, (2013).

Claussen, J. C., “Offdiagonal complexity: A computationally quick complexity measure for graphs and networks”, *Physica A: Statistical Mechanics and its applications*, (2007).

Cornell Üniversitesi, GIRAFFE user’s manual (Version 4.1), *School of Civil and Environmental Engineering*, Cornell University, Ithaca, NY, (2007).

Csardi, G., Nepusz, T., “The igraph software package for complex network research”, *Interjournal, Complex Systems*, 1695, (2006).

- Das, K. C., Xu, K., Nam, J., “Zagreb indices of Graphs”, *Frontiers of Mathematics in China*, 10 (3), 567-582, (2015).
- Dehmer, M., Streib, F. E., Tsoy, Y. R., Varmuza, K., “Quantifying structural complexity of graphs: Information measures in mathematical chemistry”, *Quantum Frontiers of Atoms and Molecules*, M.Putz,Ed. Nova Publishing, ch. 18, pp. 479-497, (2010).
- Du, Z., “On the atom bond connectivity index and Radius of connected graphs”, *Journal of Inequalities and Applications*, doi:10.1186/s13660-015-0714-4, (2015).
- Du, Z., Liu, Z., “On the estrada and laplacian estrada indices of graphs”, *Linear Algebra and Its Applications*, 435 (8), 2065-2076, (2011).
- Dziedzic, R. M., Karney, B. W., “Water distribution system performance metrics”, *16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA*, Italy, (2014).
- Environmental Protection Agency (EPA), EPANET 2 Users Manual, EPA/600/R-00/057, Cincinnati, OH, (2000).
- Fragiadakis, M., Vamvatsikos, D., Christodoulou, S. E., “Reliability assesment of urban water networks”, *15th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE*, Lisbon, (2012).
- Garas, A., *Interconnected Networks*, Springer, Switzerland, (2016).
- Gupta, R., Prasad, T. D., “Extended use of linear graph theory for analysis of pipe networks”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (1), 56-62, (2000).
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., Loucks, D. P., “Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation”, *Water Resources Research*, 18 (1), 14-20, (1982).
- Hawick, K. A., “Water distribution network robustness and fragmentation using graph metrics”, *Computational Science Technical Note, CSTN-158*, (2012).
- Hwang, H. M., Lin, H., Shinozuka, M., “Seismic performance assesment of water delivery systems”, *Journal of Infastructure Systems*, 4 (3), 118-125, (1998).
- Janezic, D. Milicevic, A. Nikolic, S. Trinajstic, N., *Graph theoretical matrices in chemistry*, NW: CRC Press, (2015).
- Javanbarg, M. B., Takada, S., “Redundancy model for water supply systems under earthquake environments”, *5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran, (2007).
- Javanbarg, M. B., Takada, S., “Seismic reliability assesment of water supply systems”, *Safety Reliability and Risk of Structures, Infastructures and*

*Engineering Systems, Furuta, Frangopol&Shinozuka (eds), Taylor&Francis Group, London, (2010).*

Kameda, H., Goto, H., Kasuga, T., “System reliability and serviceability of water supply pipelines under seismic environment”, *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, 7, 491-498, California, (1984).*

Kawakami, H., “Earthquake physical damage and serviceability of lifeline networks”, *10th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE, Balkema, Rotterdam, (1992).*

Kim, J., Wilhelm, T., “What is a complex graph”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 387 (11), 2637-2652, (2008).*

Klein, D., Palacios, J. L., Randic, M., Trinajstić, N., “Random walks and chemical graph theory”, *Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 44, 1521-1525, (2004).*

Koç, A. C., Toprak, S., Sarı, M., Nacaroğlu, E., Yıldırım, Ü. S., Helva, V., “Hasar görmüş su dağıtım sistemlerinin performans analizi”, *Yedinci Kentsel Altyapı Sempozyumu, Trabzon, (2015).*

Mueller, L. A. J., Schutte, M., Kugler, K. G., Dehmer, M., “Quantitative analyze of complex networks”, *User Manual of R package QuACN, (2014).*

Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A, Marques, A. S., “Technical performance evaluation of water distribution networks based on EPANET”, *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI, (2013).*

Nardo, A. D., Natale, M. D., “A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks”, *Engineering Optimization, 43 (2), 193-211, (2011).*

National Institute of Building Sciences (NIBS), Earthquake loss estimation methodology HAZUS 97: technical manual. *Prepared for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (1997).*

Osorio, D. O., Craig, J. I., Goodno, B. J., “Seismic response of critical interdependent networks”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 285-306, (2007).*

Osorio, D. O., Vemuru, S. M., “Cascading failures in complex infrastructure systems”, *Structural Safety, 31 (2), 157-167, (2009).*

Perez, J. A. G., Herrera, M., Garcia, R. P., Martinez, E. R., “Application of graph spectral methods in the vulnerability assesment of water supply networks”, *Mathematical and Computer Modelling, 57 (7-8), 1853-1859, (2013).*

- Romero, N., O'Rourke, T. D., Nozick, L. K., Davis, C. A., "Seismic hazards and water supply performance", *Journal of Earthquake Engineering*, 14 (7), 1022-1043, (2010).
- Shi, P., "Seismic response modelling of water supply systems", *Ph. D. Dissertation, School of Civil & Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.* (2006).
- Shi, P., O'Rourke, T. D., "Seismic response modeling of water supply systems", *MCEER-08-0016, Technical Reports, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.* (2008).
- Shoji, G., Tabata, M., "Evaluation of system reliability of lifeline networks in views of a seismic hazard", *12th East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC, Hong Kong,* (2011).
- Todeschini, R., Consonni V., *Molecular descriptors for chemoinformatics,* Wiley-WCH, (2009).
- Toprak, S., Taskin, F., Koc, A. C., "Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, Turkey", *Bull. Eng. Geol. Environ.*; 68:499-510, (2009).
- Toprak, S., Yoshizaki, K., "Boru hatlarına deprem yüklerinin etkisi", *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı UDMK, İstanbul,* (2003).
- Wagner, J. M., Shamir, U., Marks, D. H., "Water distribution reliability: analytical methods", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114 (3), 253-275, (1988).
- Wang, Y., Au, S. K., "Spatial distribution of water supply reliability and critical links of water supply to crucial water consumers under an earthquake", *Reliability Engineering and System Safety*, 94 (2), 534-541, (2009).
- Xu, K., Das, K. C., "On harary Index of graphs", *Discrete Applied Mathematics*, 159 (15), 1631-1640, (2011).
- Yazdani, A., Jeffrey, P., "Applying network theory to quantify the redundancy and structural robustness of water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138 (2), 153-161, (2012a).
- Yazdani, A., Jeffrey, P., "Water distribution system vulnerability analysis using weighted and directed network models", *Water Resources Research*, 48, W06517, doi: 10.1029/2012WR011897, (2012b).
- Yazdani, A., Jeffrey, P., "Complex network analysis of water distribution systems", *Chaos*; 21: 016111, doi: 10.1063/1.3540339, (2011).

Yoo, D. G., Kang, D. S., Kim, J. H., “Seismic reliability assesment model of water supply networks”, *World Environmental and Water Resources Congress*, Cincinnati, Ohio, (2013).

Zhou, B., Gutman, I., Furtula, B., Du, Z., “On two types of geometric arithmetic index”, *Chemical Physics Letters*, 482 (1-3), 153-155, (2009).

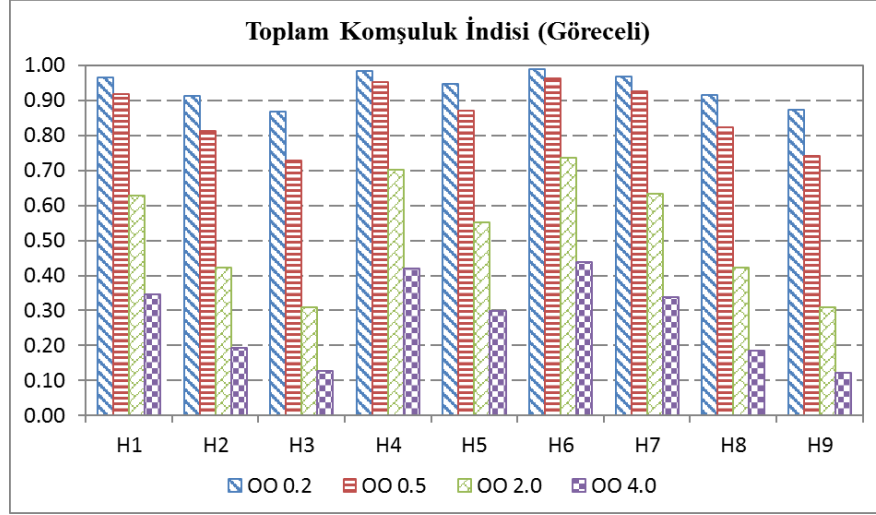
Zhou, B., Gutman, I., “On laplacian energy of graphs”, *Match Commun. Math. Chem.* 57, 211-220, (2007).



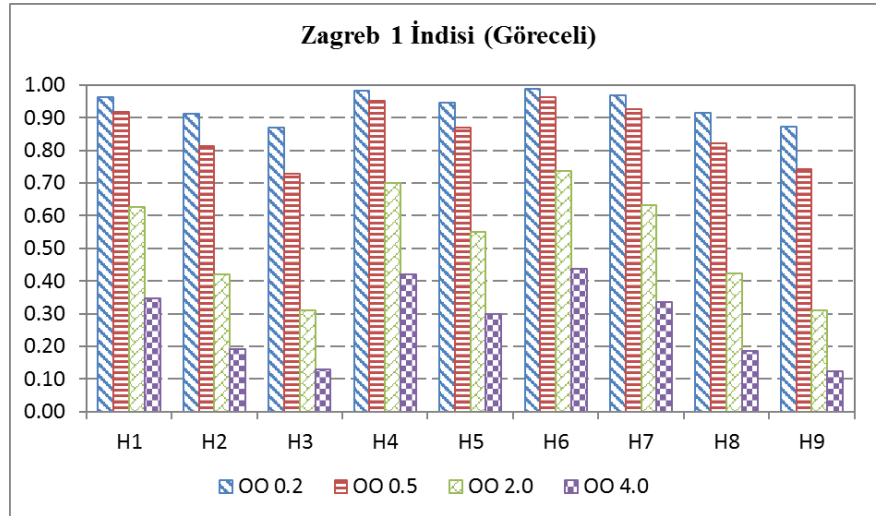
# **EKLER**

## 7. EKLER

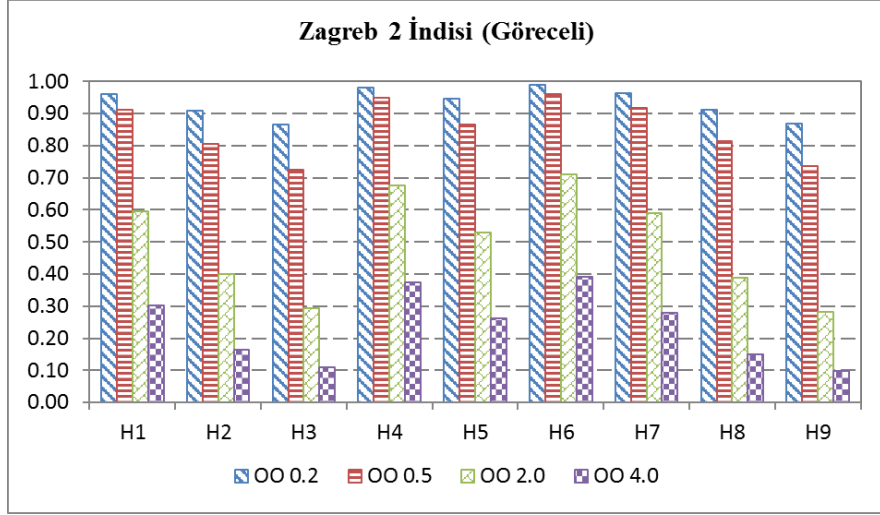
### EK A Varsayımsal Sistemlerin Farklı Onarım Oranları İçin Göreceli İndis Değerleri



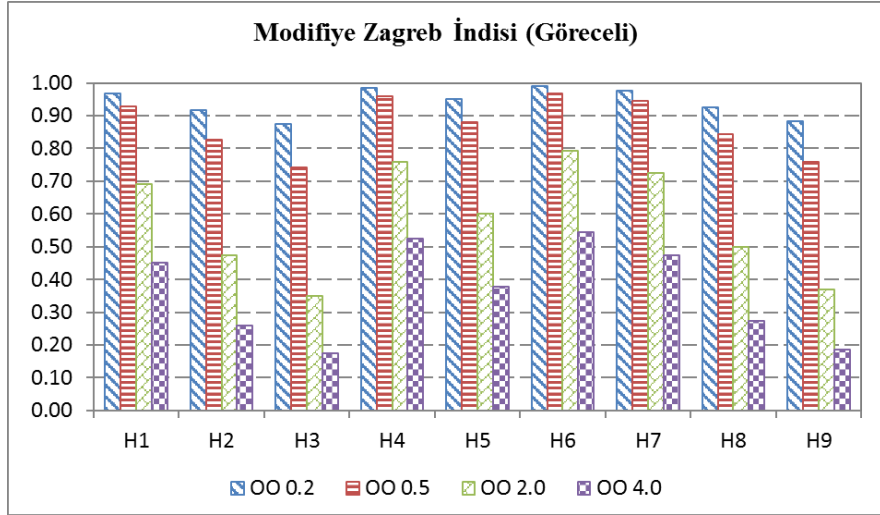
Şekil A.1: Göreceli Toplam Komşuluk İndisleri



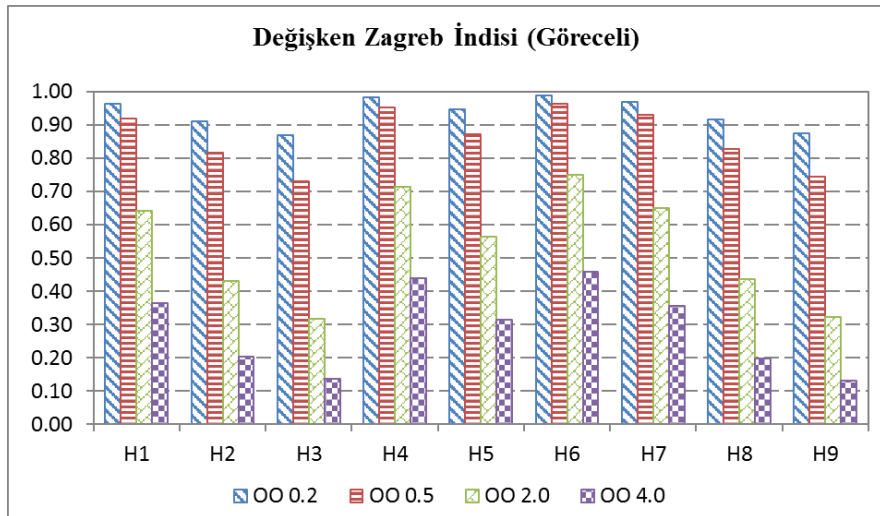
Şekil A.2: Göreceli Zagreb 1 İndisleri



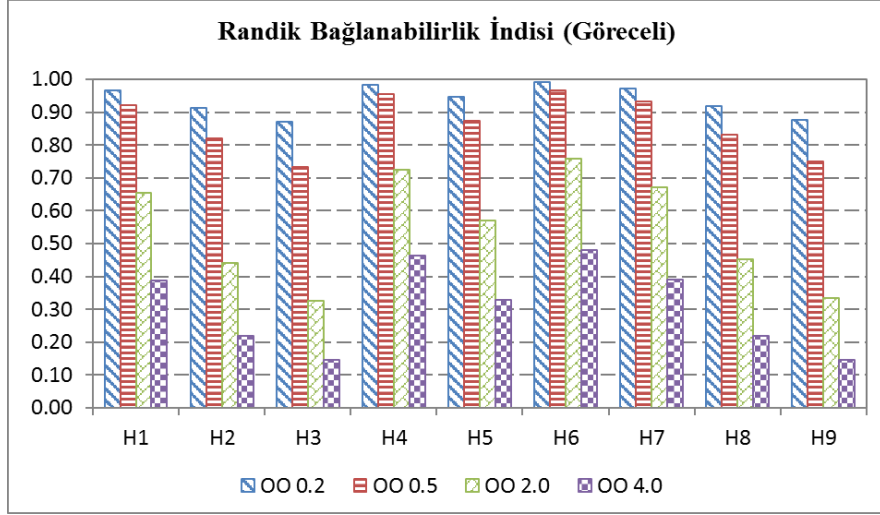
**Şekil A.3:** Göreceli Zagreb 2 İndisleri



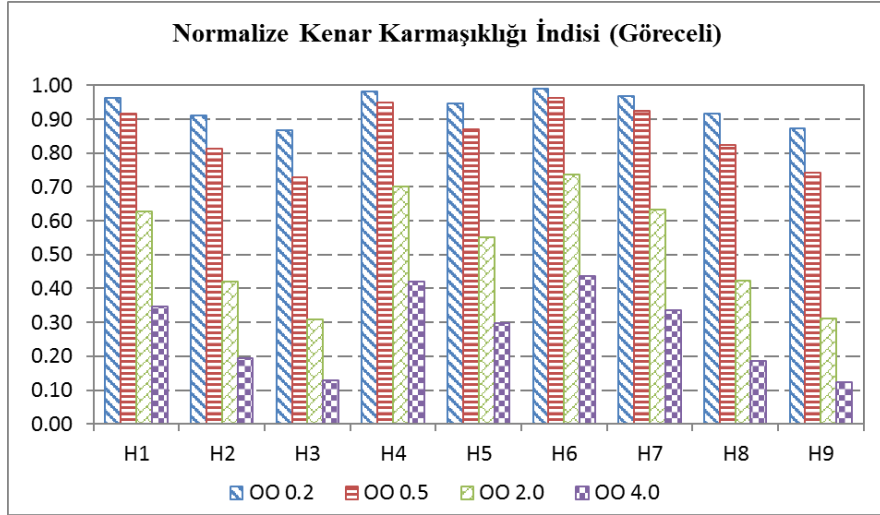
**Şekil A.4:** Göreceli Modifiye Zagreb İndisleri



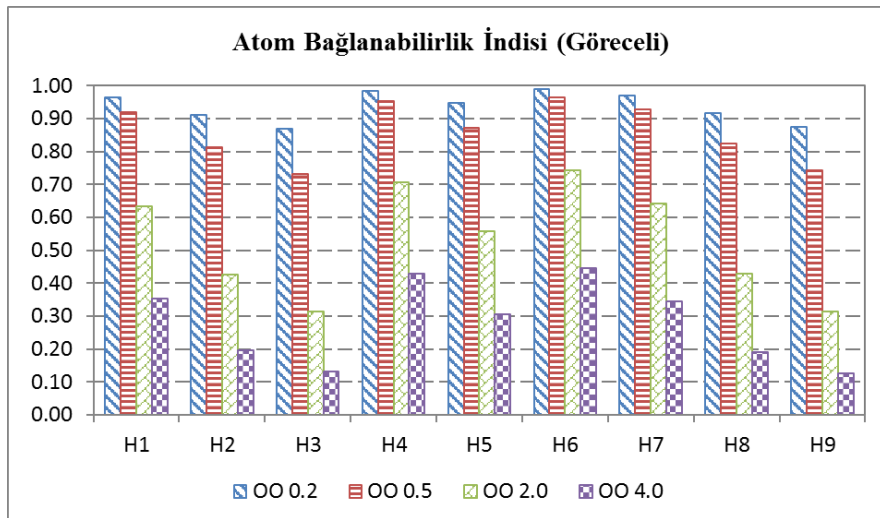
**Şekil A.5:** Göreceli Değişken Zagreb İndisleri



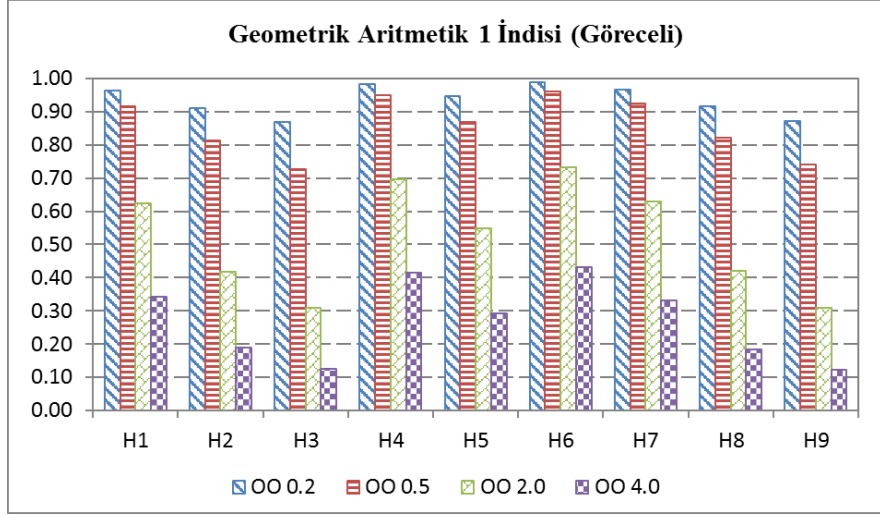
**Şekil A.6:** Göreceli Randik Bağlanabilirlik İndisleri



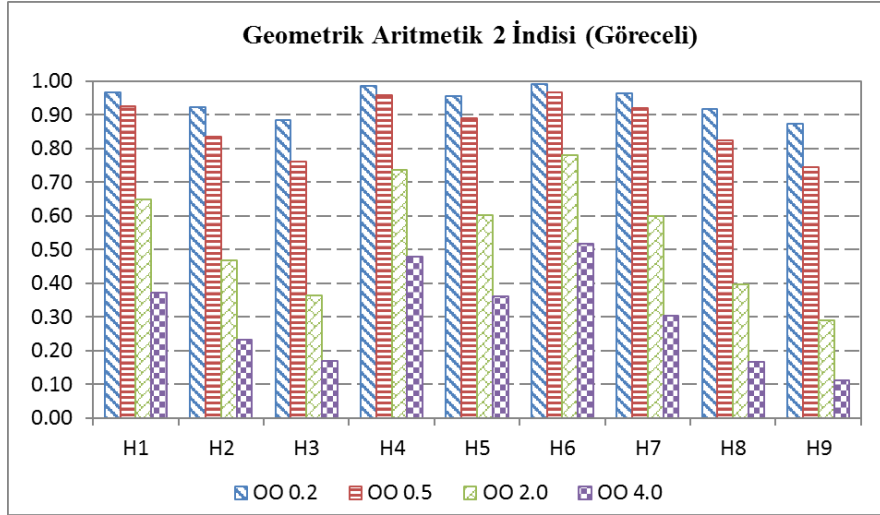
**Şekil A.7:** Göreceli Normalize Kenar Karmaşıklığı İndisleri



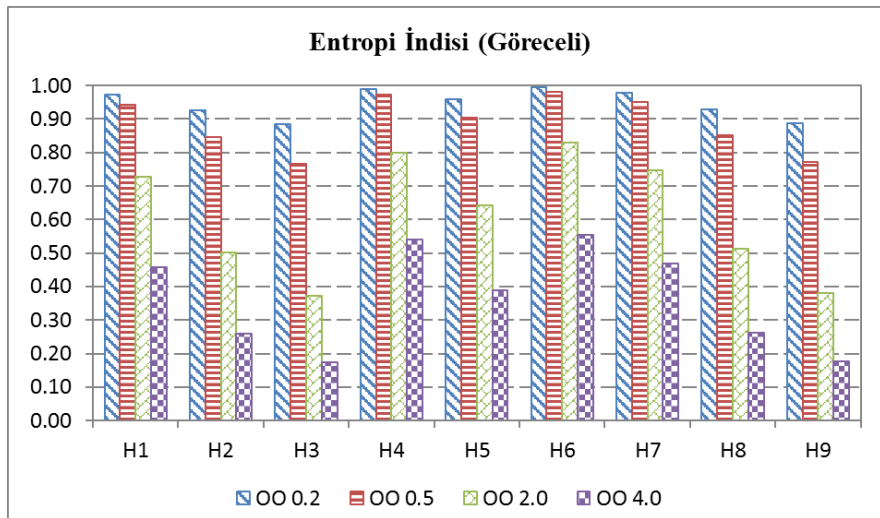
**Şekil A.8:** Göreceli Atom Bağlanabilirlik İndisleri



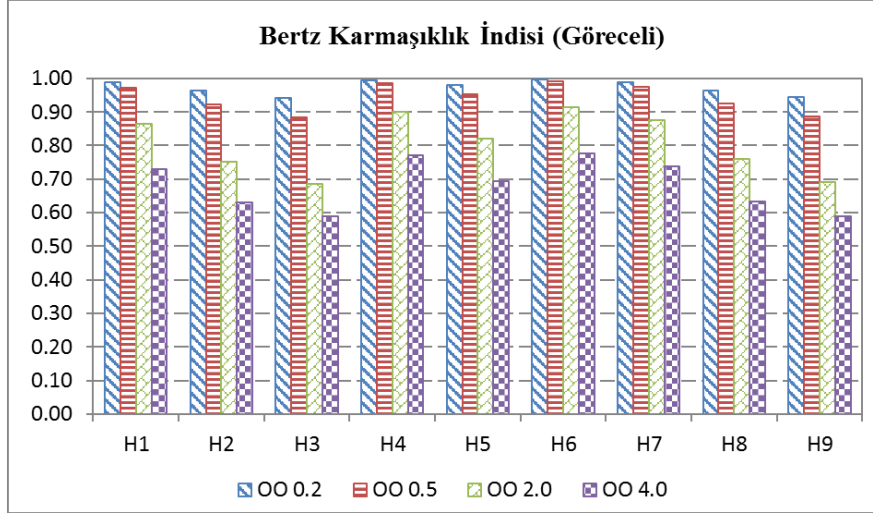
**Şekil A.9:** Göreceli Geometrik Aritmetik 1 İndisleri



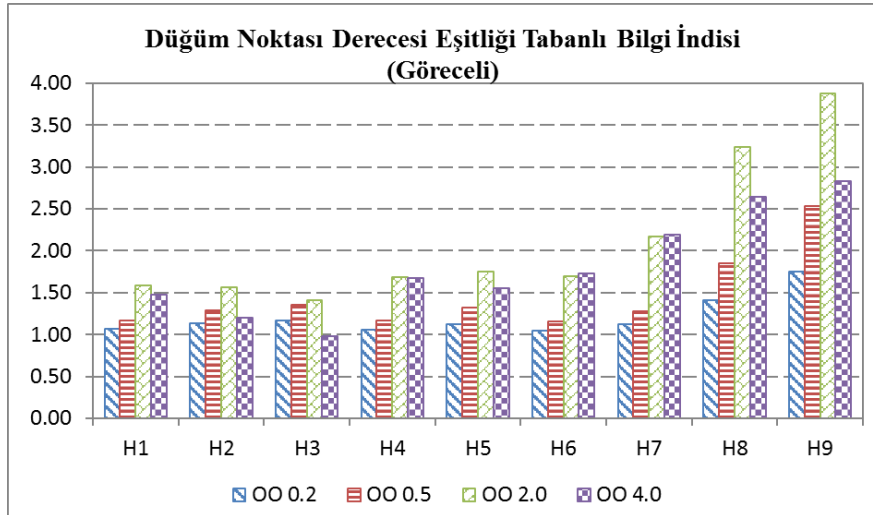
**Şekil A.10:** Göreceli Geometrik Aritmetik 2 İndisleri



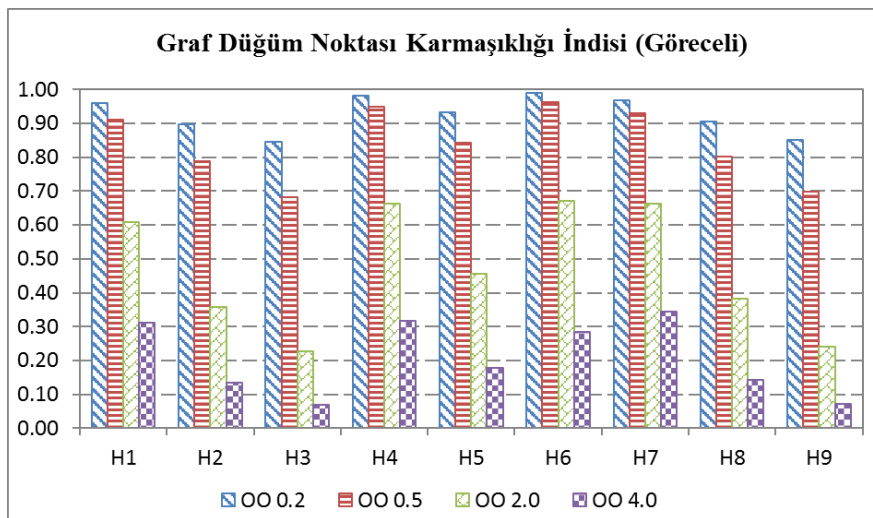
**Şekil A.11:** Göreceli Entropi İndisleri



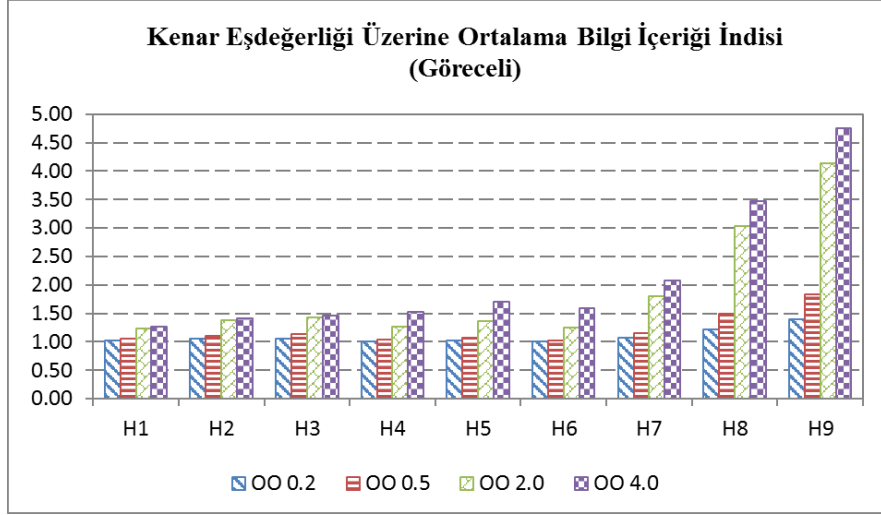
Şekil A.12: Göreceli Bertz Karmaşıklık İndisleri



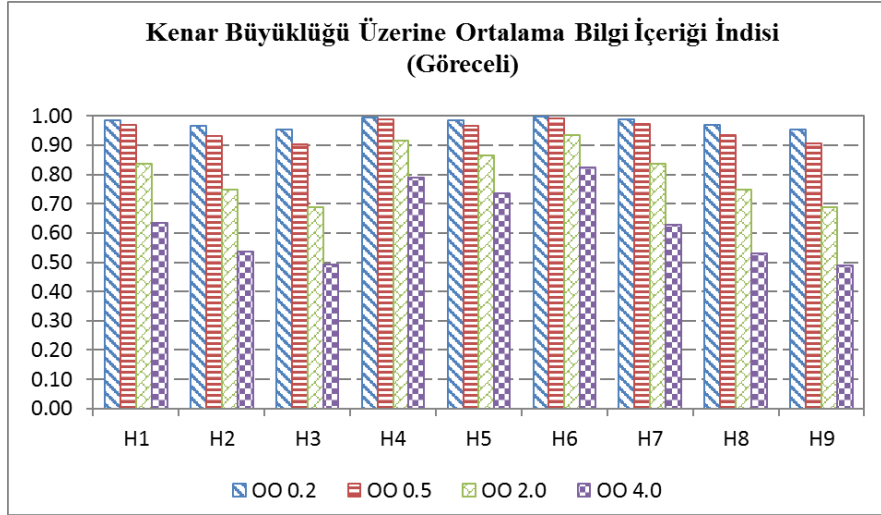
Şekil A.13: Göreceli Düğüm Noktası Derecesi Eşitliği Tabanlı Bilgi İndisleri



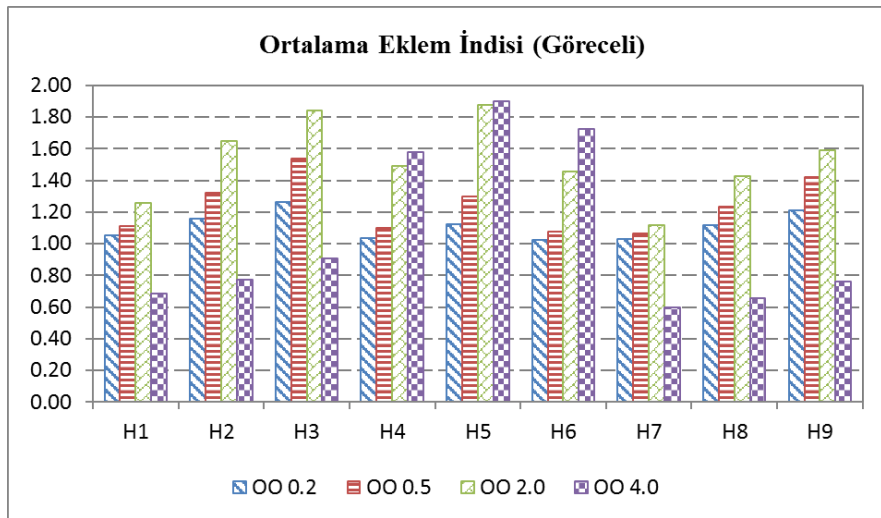
Şekil A.14: Göreceli Graf Düğüm Noktası Karmaşıklık İndisleri



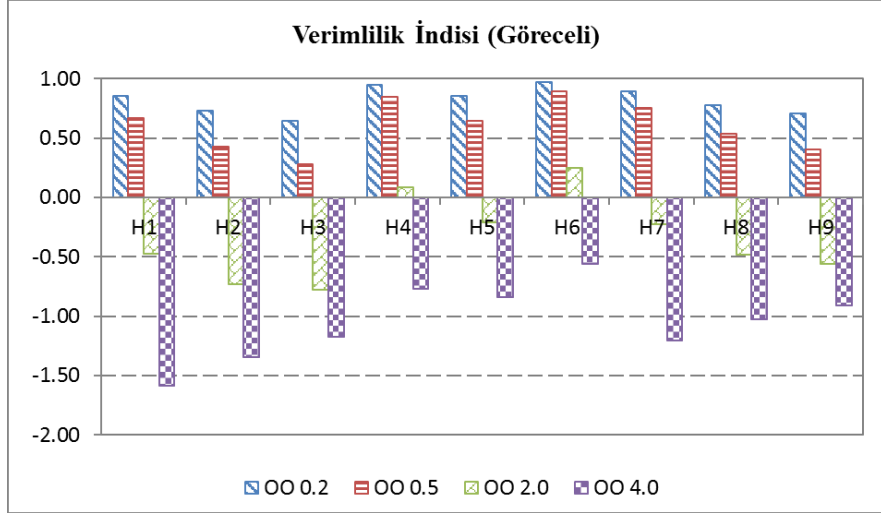
Şekil A.15: Göreceli Kenar Eşdeğerliği Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisleri



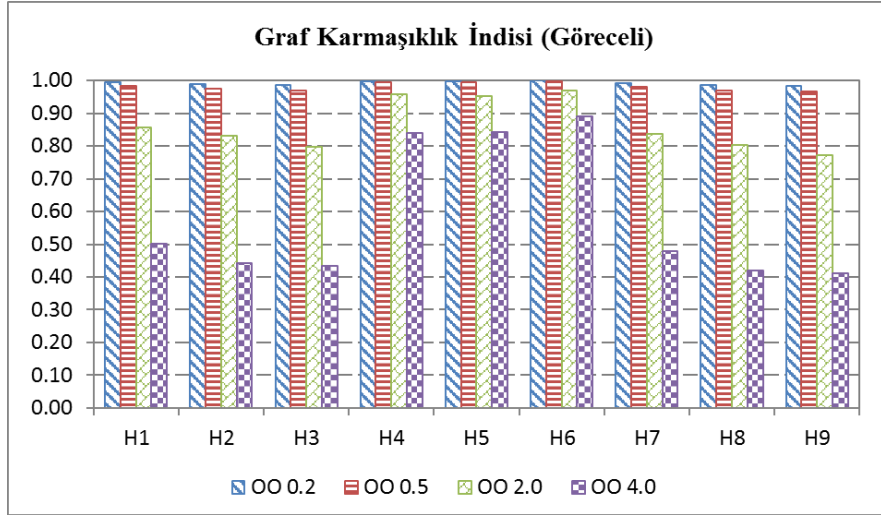
Şekil A.16: Göreceli Kenar Büyüklüğü Üzerine Ortalama Bilgi İçeriği İndisleri



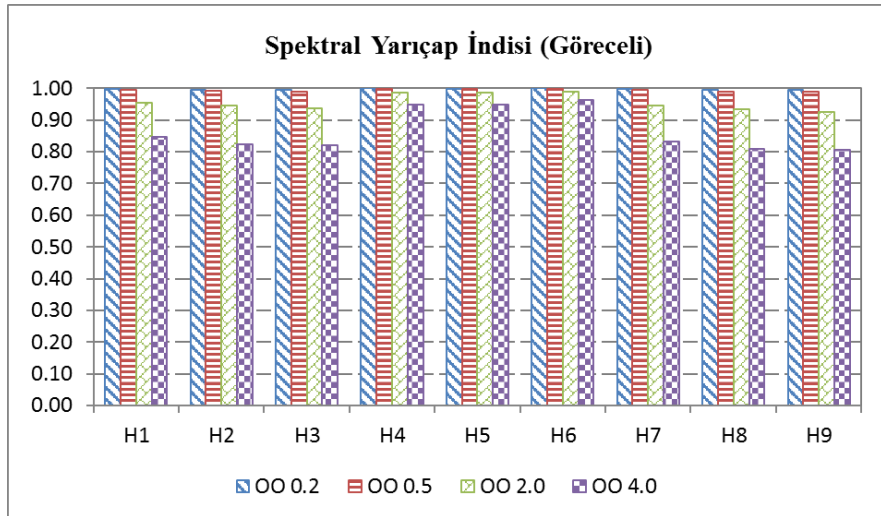
Şekil A.17: Göreceli Ortalama Eklem İndisleri



**Şekil A.18:** Göreceli Verimlilik İndisleri

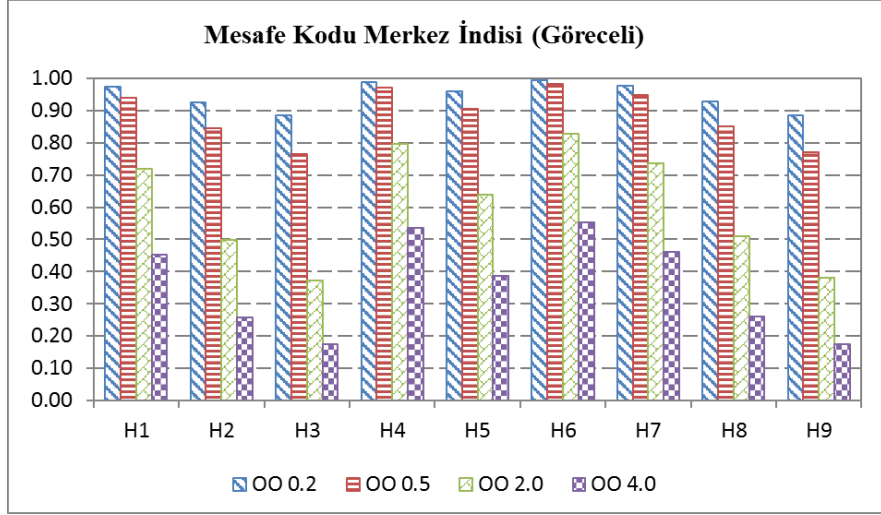


**Şekil A.19:** Göreceli Graf Karmaşıklık İndisleri

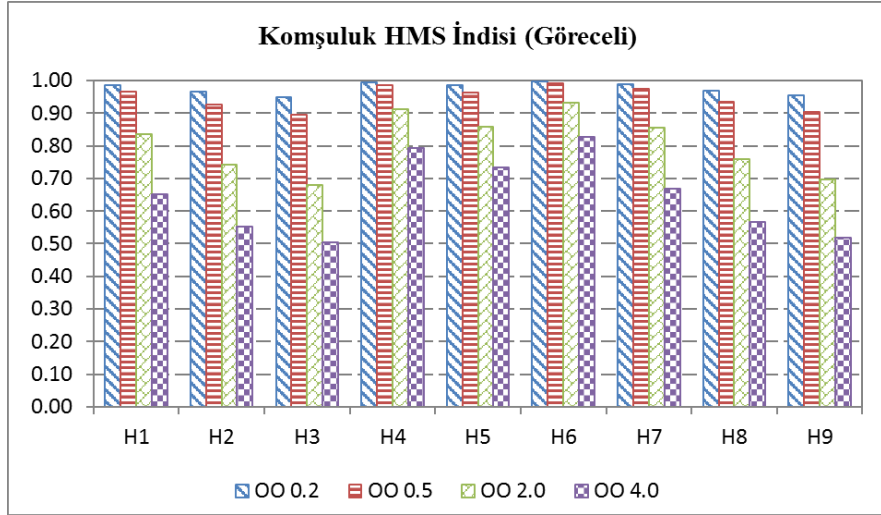


**Şekil A.20:** Göreceli Spektral Yarıçap İndisleri

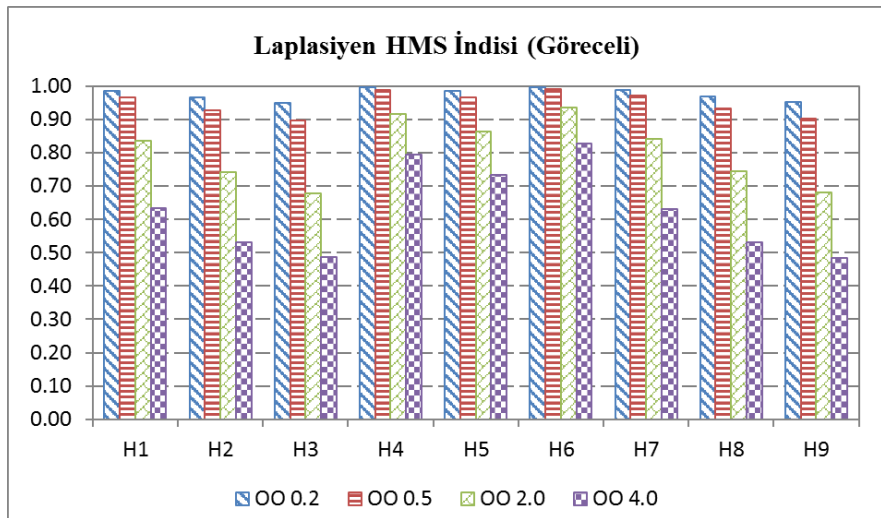




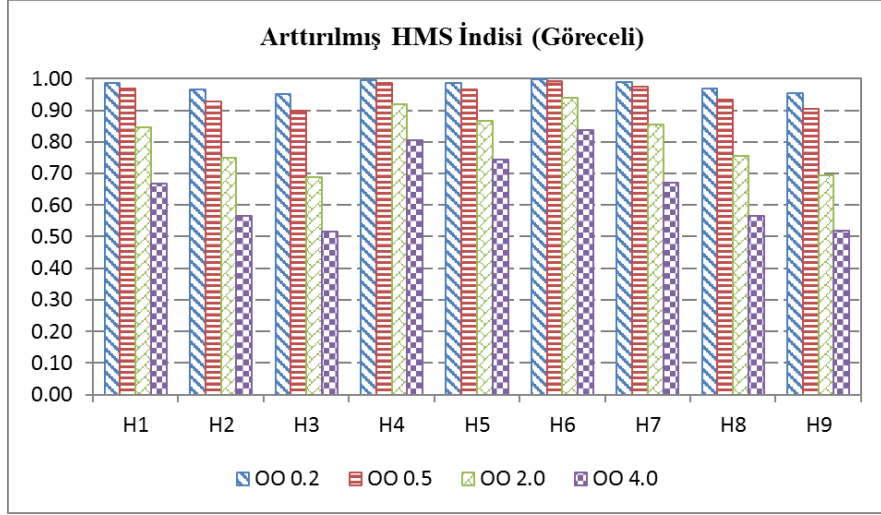
**Şekil A.21:** Göreceli Mesafe Kodu Merkez İndisleri



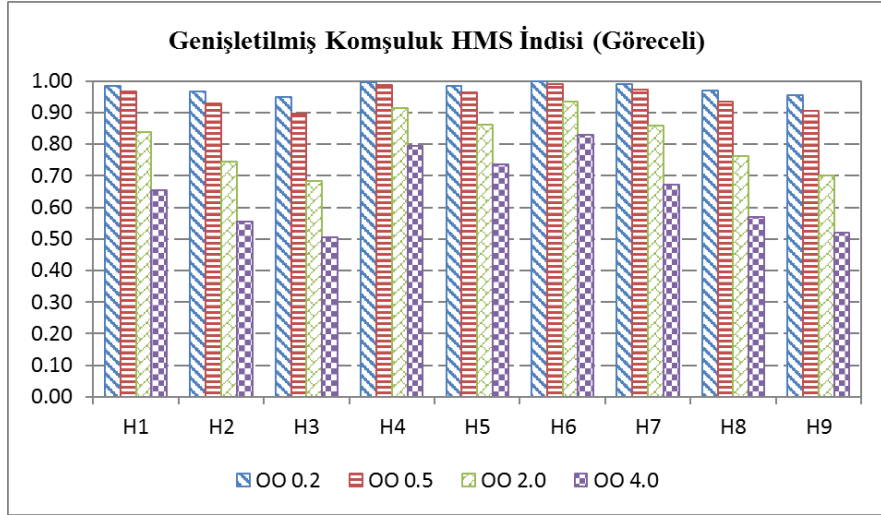
**Şekil A.22:** Göreceli Komşuluk HMS İndisleri



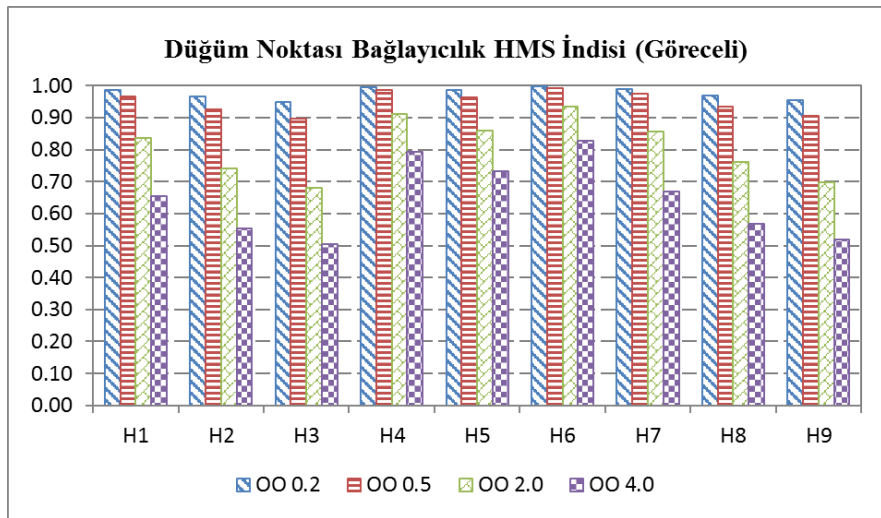
**Şekil A.23:** Göreceli Laplasien HMS İndisleri



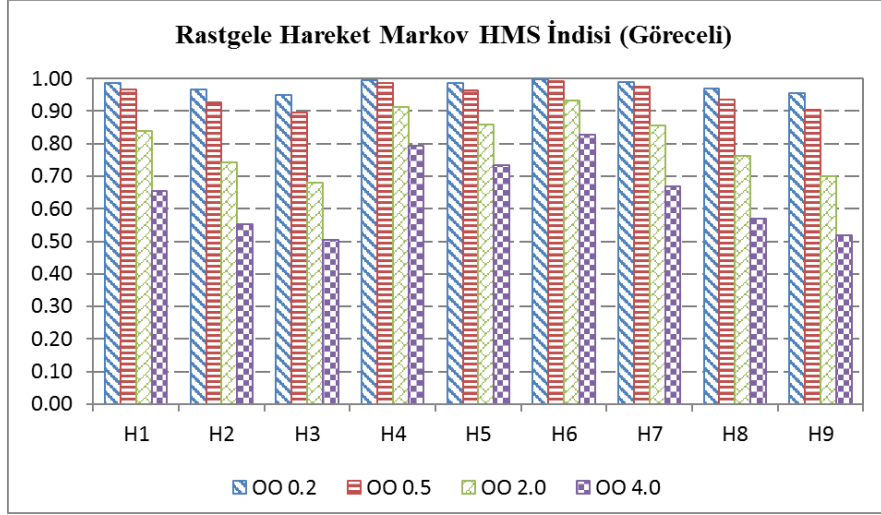
**Şekil A.24:** Göreceli Arttırılmış HMS İndisleri



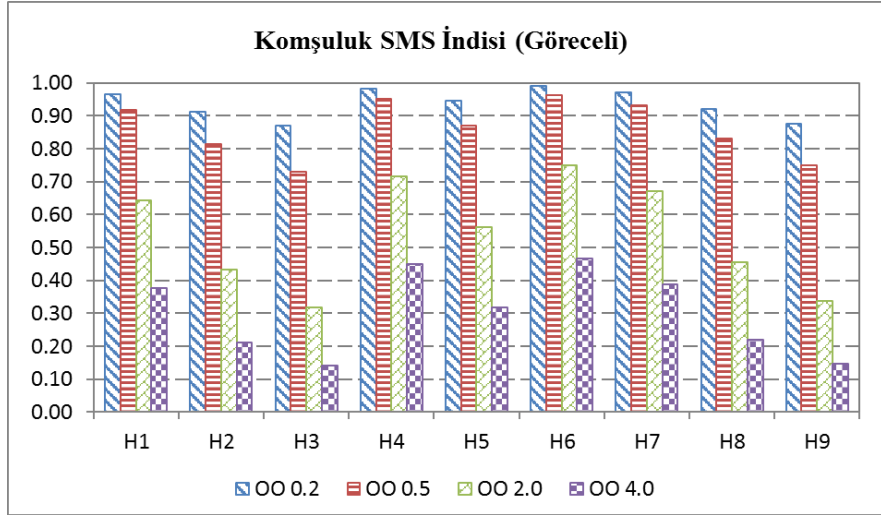
**Şekil A.25:** Göreceli Geniştirilmiş Komşuluk HMS İndisleri



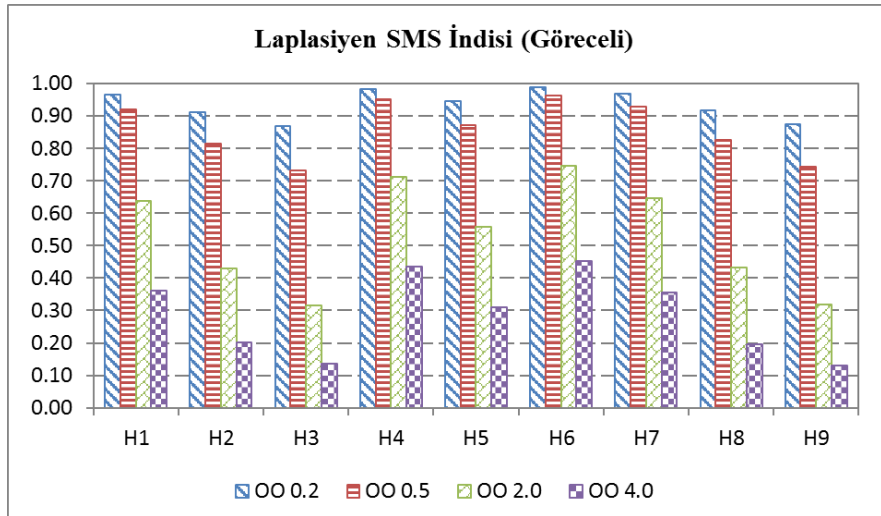
**Şekil A.26:** Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık HMS İndisleri



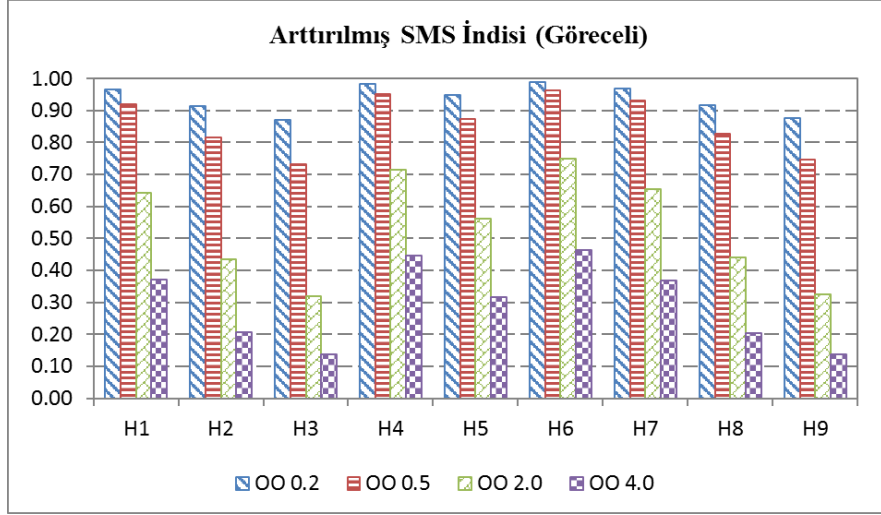
Şekil A.27: Göreceli Rastgele Hareket Markov HMS İndisleri



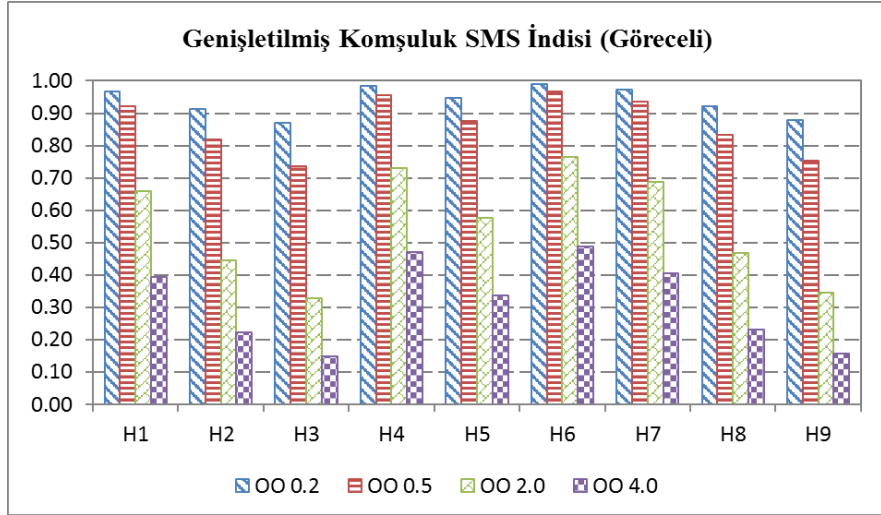
Şekil A.28: Göreceli Komşuluk SMS İndisleri



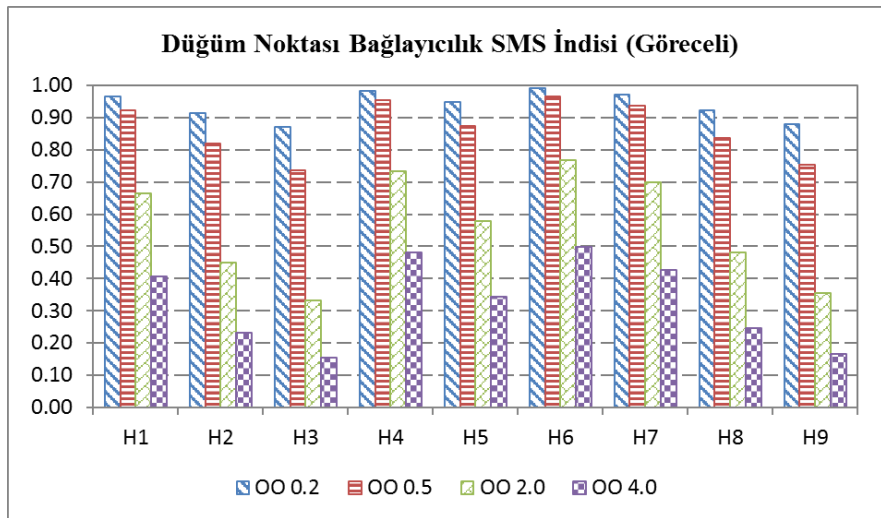
Şekil A.29: Göreceli Laplasien SMS İndisleri



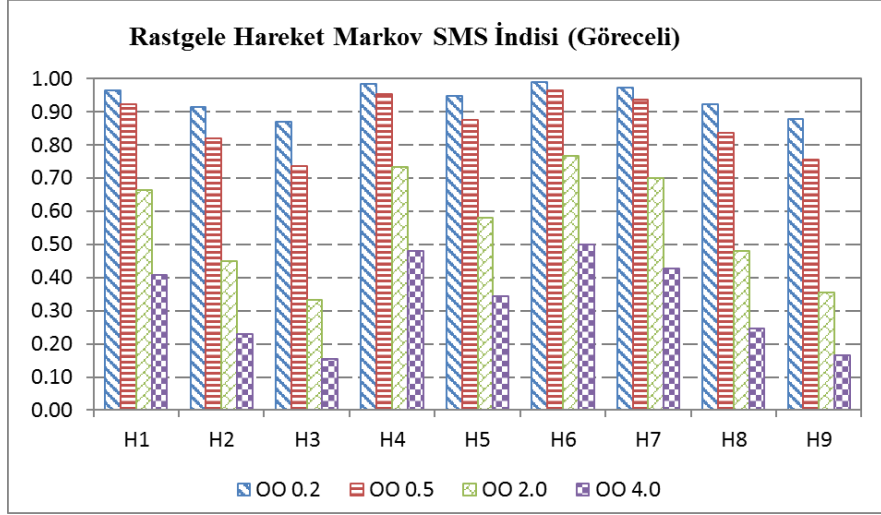
**Şekil A.30:** Göreceli Arttırılmış SMS İndisleri



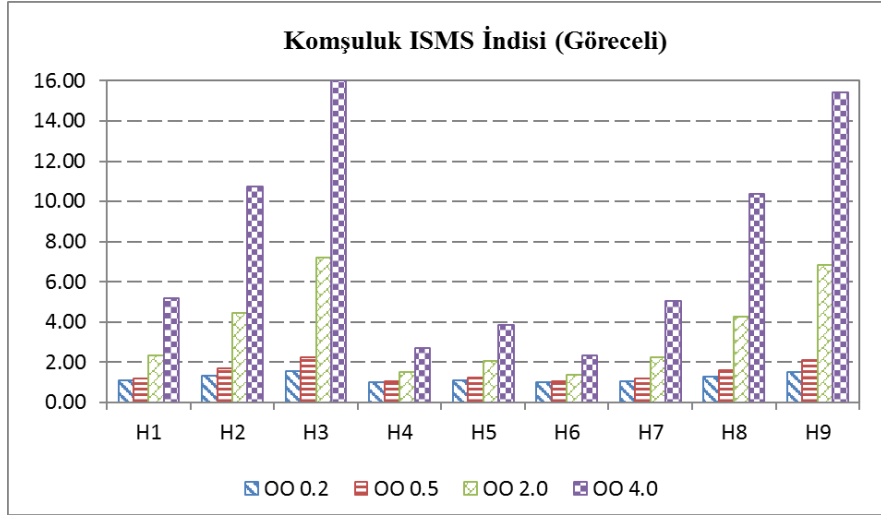
**Şekil A.31:** Göreceli Genişletilmiş Komşuluk SMS İndisleri



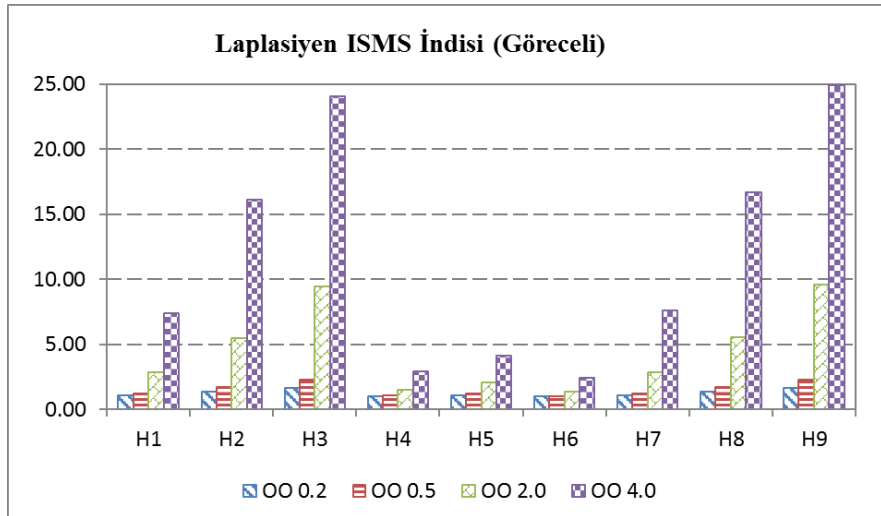
**Şekil A.32:** Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık SMS İndisleri



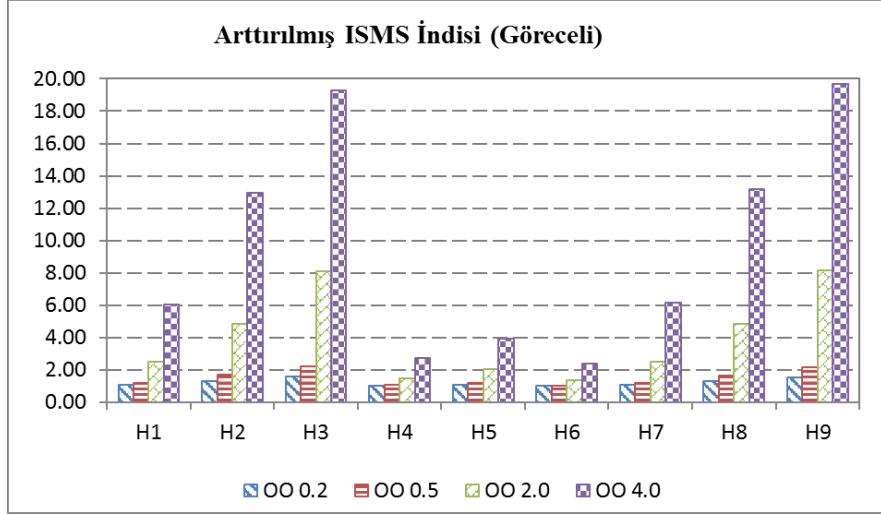
**Şekil A.33:** Göreceli Rastgele Hareket Markov SMS İndisleri



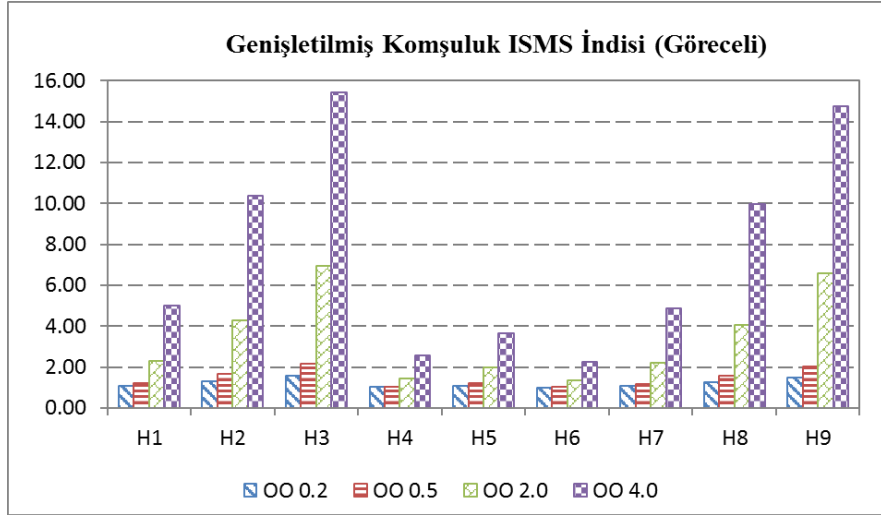
**Şekil A.34:** Göreceli Komşuluk ISMS İndisleri



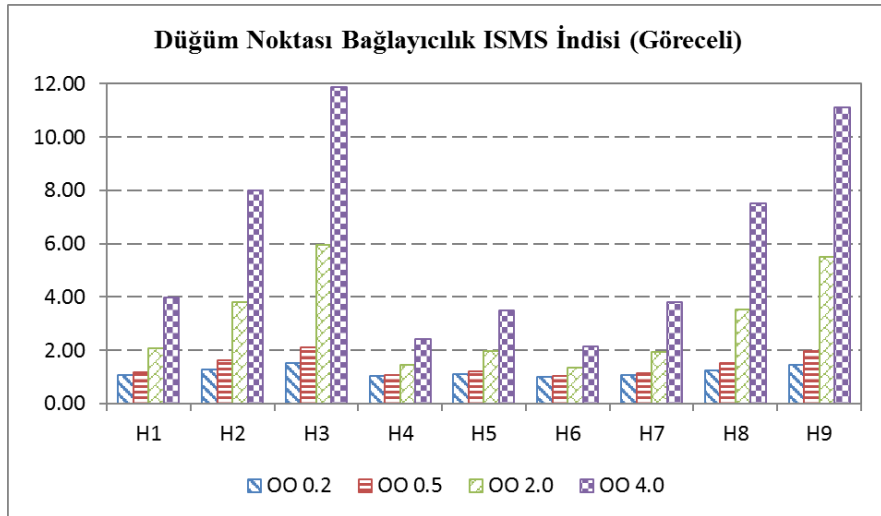
**Şekil A.35:** Göreceli Laplasien ISMS İndisleri



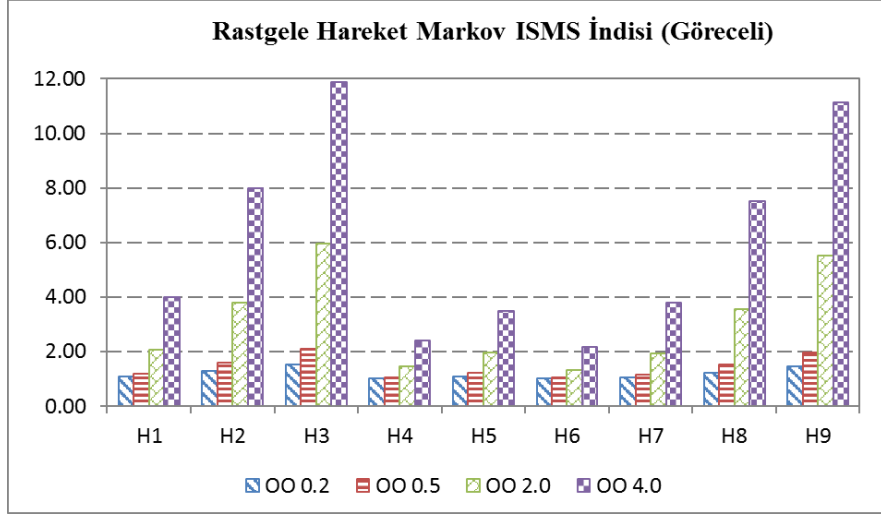
**Şekil A.36:** Göreceli Arttırılmış ISMS İndisleri



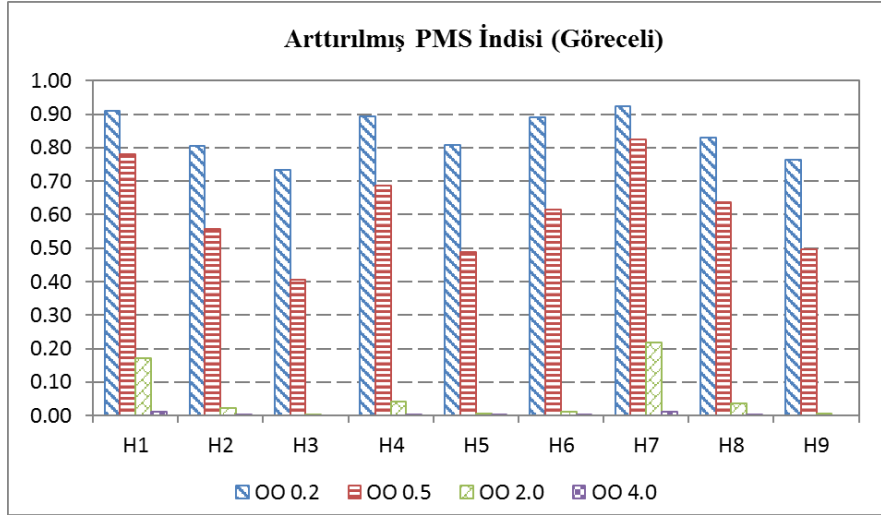
**Şekil A.37:** Göreceli Genişletilmiş Komşuluk ISMS İndisleri



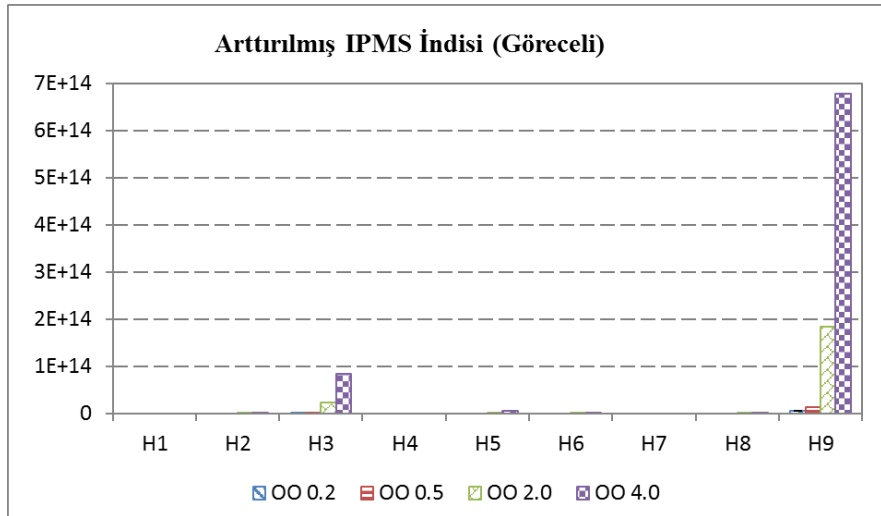
**Şekil A.38:** Göreceli Düğüm Noktası Bağlayıcılık ISMS İndisleri



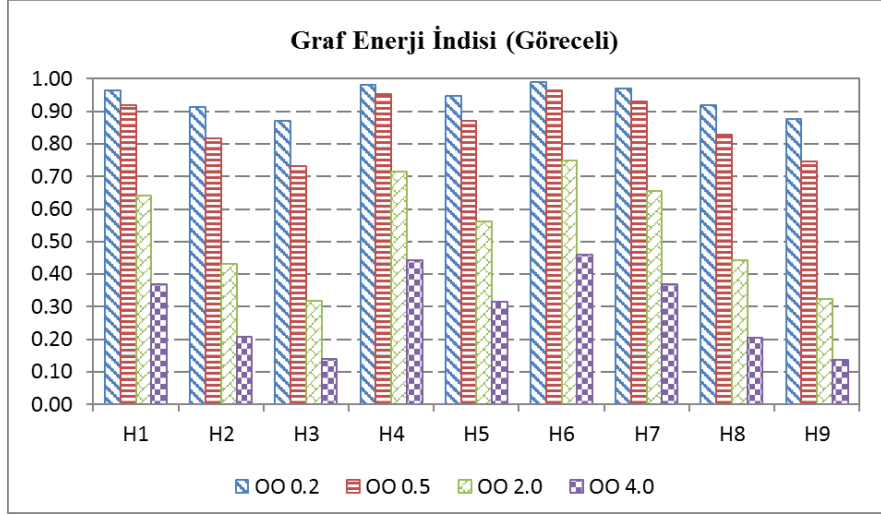
**Şekil A.39:** Göreceli Rastgele Hareket Markov ISMS İndisleri



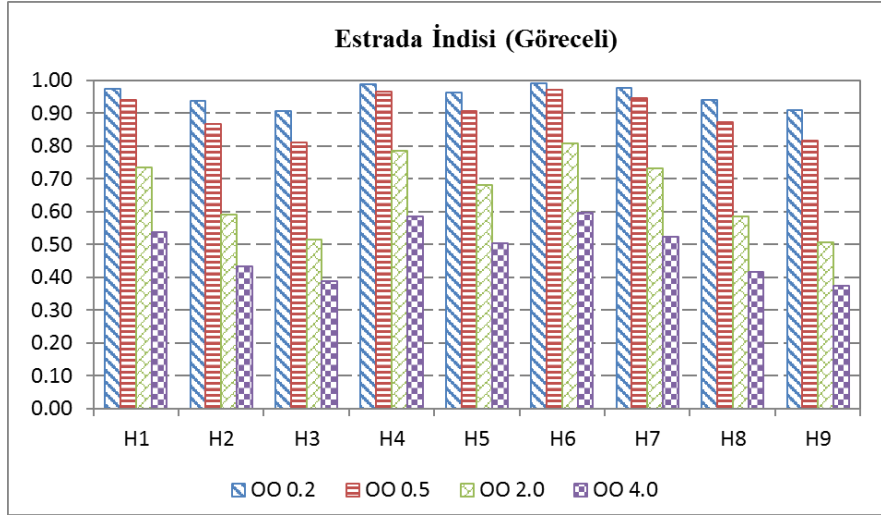
**Şekil A.40:** Göreceli Arttırılmış PMS İndisleri



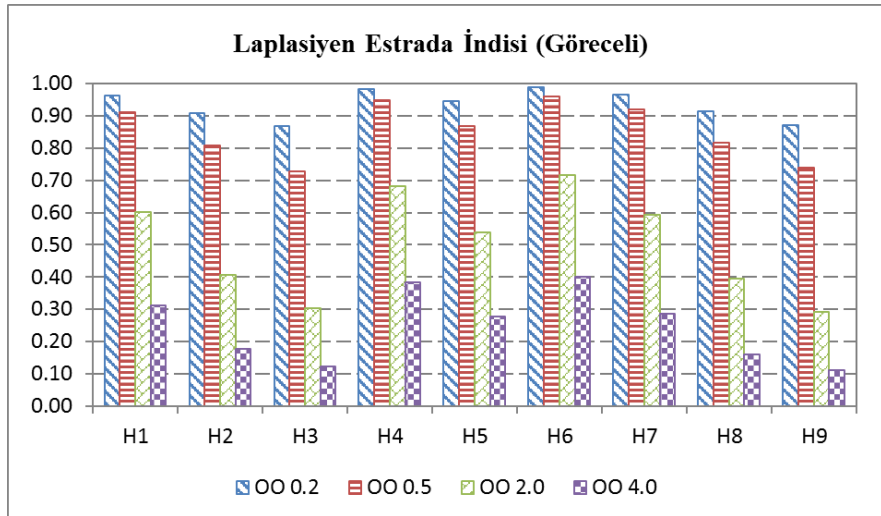
**Şekil A.41:** Göreceli Arttırılmış IPMS İndisleri



**Şekil A.42:** Göreceli Graf Enerji İndisleri

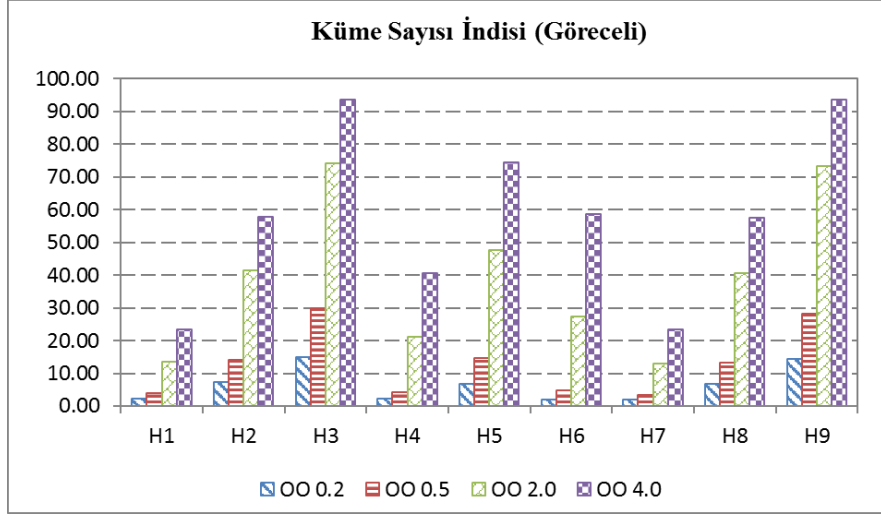


**Şekil A.43:** Göreceli Estrada İndisleri

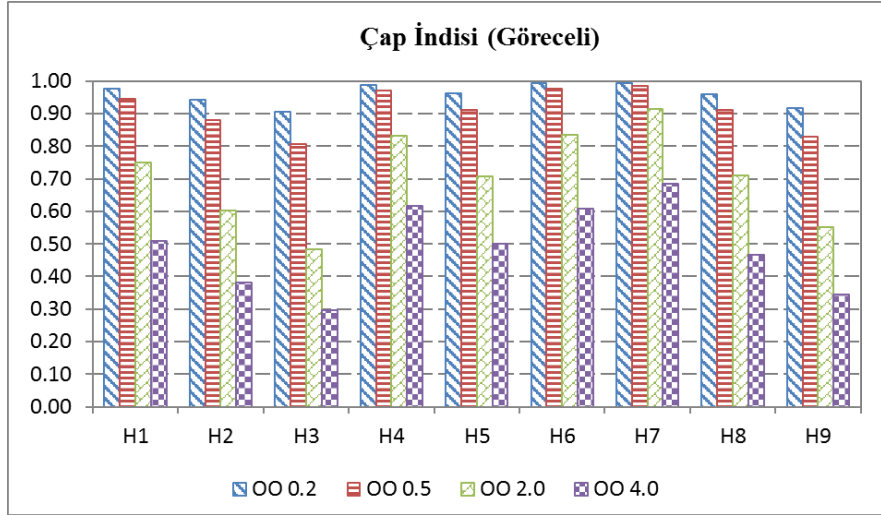


**Şekil A.44:** Göreceli Laplasiyen Estrada İndisleri

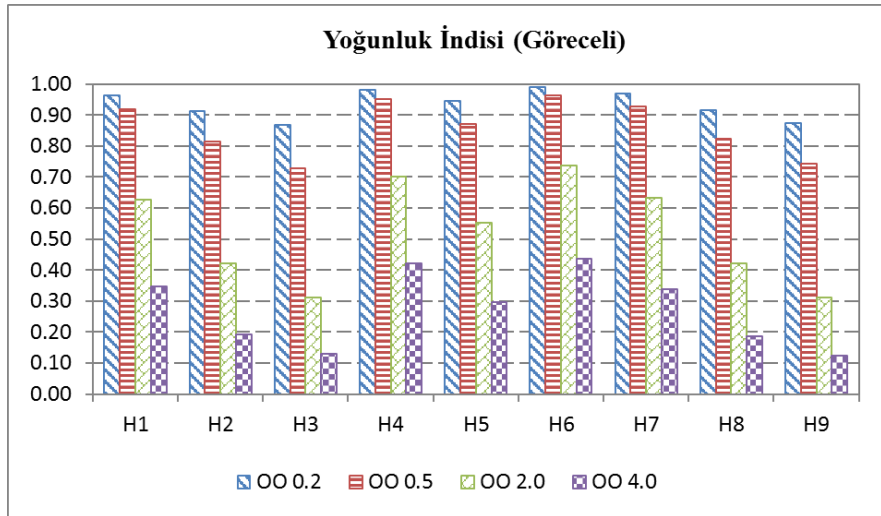




**Şekil A.45:** Göreceli Küme Sayısı İndisleri



**Şekil A.46:** Göreceli Çap İndisleri



**Şekil A.47:** Göreceli Yoğunluk İndisleri

## 8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ümüt Sakine DEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi : Aksaray 26/05/1990

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : udemir@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
B Blok İnşaat Mühendisliği Bölümü

### Yayın Listesi :

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A.C., Sarı, Murat., Yıldırım, Ü.S., ve Helva,V., “Christchurch Yeni Zelanda Depreminin Avonside Bölgesindeki Gömülü Borular Üzerine Etkisi”, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, (2015).

Koc, A. C., Toprak, S., Yıldırım, Ü. S., Nacaroglu, E., “Performance Indicators for Damaged Water Distribution Systems”, The 9th European Water Resources Association (EWRA), İstanbul, Türkiye, (2015).

Toprak, S., Nacaroglu, E., Koc, A. C., Sarı, M., Yıldırım, Ü. S., “Seismic Damages in Pipelines in The Light of Preventive Maintenance”, The 9th European Water Resources Association (EWRA), İstanbul, Türkiye, (2015).

Koc, A. C., Toprak, S., Sarı, M., Nacaroglu, E., Yıldırım, Ü. S., Helva, V., “Hasar Görmüş Su Dağıtım Sistemlerinin Performans Analizi”, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, (2015).

Koc, A. C., Demir, Ü. S., Toprak, S., “Earthquake vulnerability of water distribution systems from topology perspective”, 3rd International Conference Water Across Time in Engineering Research, Romanya, (2016).