

Hasar Görmüş Su Dağıtım Sistemlerinin Performans Analizi

**Doç. Dr. Abdullah Cem Koç¹, Prof. Dr. Selçuk Toprak²,
Doç. Dr. Murat Sarı³, Araş. Gör. Engin Nacaroğlu⁴,
Ümüt Sakine Yıldırım⁵, Volkan Helva⁶**

¹Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, a_c_koc@pau.edu.tr

²Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, stoprak@pau.edu.tr

³Yıldız Teknik Üniversitesi, Matematik Bölümü, İstanbul, sarim@yildiz.edu.tr

⁴Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, enacaroglu@pau.edu.tr

⁵Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli,
uyildirim092@posta.pau.edu.tr

⁶Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, vhelva09@posta.pau.edu.tr

ÖZET

Su dağıtım sistemleri yerleşim yerlerinin en hayati altyapılarından birisidir. Bir su dağıtım sistemi borulardan ve diğer hidrolik bileşenlerden (vanalar, pompalar, bağlantı elemanları, depolar vb.) oluşur. Borular su dağıtım sisteminin ana elemanlarıdır ve doğal afetler (deprem, heyelan vb.) veya işletim hataları (su darbesi vb.) sonucu hasar görebilirler. Boru hasarları kırık ve sızıntı olarak iki grupta incelenebilir. Bir su dağıtım sisteminin bazı boruları 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 bu çalışmada varsayımsal bir su dağıtım sisteminin deprem sonrası performansı detaylı olarak incelenecektir. Hasarların dağıtım sistemindeki yerleri Monte Carlo simülasyonları ile belirlendi ve bu amaçla GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) programı kullanılmıştır. Su dağıtım sisteminin performansı graf temelli ağ göstergeleri ile değerlendirilmiştir. Talebi karşılanan düğüm noktası sayıları ile graf tabanlı ağ ölçüleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Su dağıtım sistemi, Deprem, GIRAFFE, Servis düzeyi, Graf teorisi

ABSTRACT

Water distribution systems are one of the most vital lifelines of urban areas. A water distribution system consists of pipes and other hydraulic appurtenances (valves, pumps, connection fittings, storages etc.). Pipes are the main elements of a water distribution system and they may be damaged after natural disasters (earthquake, landslide etc.) or operational errors (waterhammer etc.). Pipe damages are grouped as breaks and leaks. A water distribution system is expected to serve at a certain level after some pipes were damaged. Performance of a 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 a hypothetical water distribution system will be examined in detail. Places of the damages are determined by Monte Carlo simulations. To achieve this, GIRAFFE (Graphical Iterative Response Analysis for Flow Following Earthquakes) computer program was used. Performance of the

hypothetical water distribution system was evaluated with graph based network metrics. Node demand satisfaction and graph based network metrics were compared.

Key Words: Water distribution system, Earthquake, GIRAFFE, Serviceability, Graph theory

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 rastgele veya bilinçli olarak hasara uğrayabilirler. Rastgele 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 alınacaktır. Deprem sonucu su dağıtım sisteminin tüm elemanları (borular, depolar, pompa istasyonları vb.) hasar görebilir ancak bu çalışmada sadece boru hasarları dikkate alınacaktır.

Literatürde bazı şehirlerin deprem sonrası servis düzeyini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Javanbarg ve Takada Osaka şehrinin su dağıtım sisteminin 1995 Kobe depremi sonrası sismik güvenilirliğini, kullanılabilirlik ve servis düzeyi göstergeleriyle incelemiştir (Javanbarg ve Takada, 2010). Chou ve diğerleri Tayvan'daki Lan-Yan bölgesi su dağıtım sisteminin zemin sıvılaşması sonucu servis düzeyini GIRAFFE program yardımıyla incelemiştir (Chou ve diğ., 2013). Literatürde ayrıca gerçek veya varsayımsal su dağıtım sistemlerinin graf teorisi temelli ağ analizleri kullanılarak hesaplanan bazı ölçüler ile sağlamlıklarını ve zayıflıklarını araştıran çalışmalar da bulunmaktadır (Yazdani ve Jeffrey, 2011).

Çalışmada önce su dağıtım sistemlerinde hasar kavramı ve boru hasarları ele alınacak daha sonra sistemin hidrolik yeterliliği için önemli olan negatif basınç düzeltilmesi açıklanacaktır. Daha sonra boru hasarlarının Monte Carlo simülasyonu ile oluşturulması açıklanacaktır. Graf temelli ağ ölçüleri incelenerek varsayımsal bir su dağıtım sistemi üzerinde sistemin talep karşılama oranı ve ölçüler arasındaki ilişkiler incelenecektir.

2. YÖNTEM

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).

2.1 Boru Hasar Modellemesi

Su temini 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 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. 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 edilecektir. Boru hasarları kırık ve sızıntı olarak iki gruba ayrılabilir.

Bu çalışmada, GIRAFFE (Graphical Iterative Response analysis for Flow Following Earthquakes) programı ve onun metodolojisi, boru hasarlarını ve negatif basınç düzeltilmesini simüle etmek için kullanılmıştır. GIRAFFE, hasar görmüş su temini sistemlerinin hidrolik analizi için Cornell Üniversitesinde 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 iteratif olarak birlikte çalışır (EPA, 2000).

2.1.1 Boru Kırılması

Kırık terimi boru hattının tam olarak ayrılmasını tanımlar. Kırığın iki ucu arasında su akımı kesilmiştir. Borunun iki ucundan gelen su kırık uçlardan zemine akar. GIRAFFE'da boru kırığı EPANET elemanları kullanılarak kırığın her iki ucundan çıkan birer hayali boru (sistemdeki boru ile aynı çaplı) ve bunların bağlandığı rezervuarlar ile temsil edilir. Kırık uçlardan atmosfere çıkan suyu temsil etmek amacıyla rezervuarlar atmosfer basıncına eşitlenmiştir. Rezervuara giden suyun geri dönmemesi için boruya bir de çekvalf eklenir (Cornell Üniversitesi, 2007).

2.1.2 Boru Sızıntısı

Sızıntı terimi borudaki bir açıklığı tanımlar. Sızıntı durumunda, su boruda akmaya devam etmekte ancak belli bir debi ve basınç kaybına uğramaktadır. GIRAFFE'da sızıntı atmosfere açılan hayali bir boru ile temsil edilir. Borunun ucunda sızıntı kotuna eşit kotta olan boş bir rezervuar bulunmaktadır. Sızıntının bir yöne doğru olması hayali boru üzerindeki bir çekvalf ile sağlanır. Hayali borunun pürüzlülüğü sonsuz ve yersel enerji kayıp katsayısı 1 olarak kabul edilmektedir ve böylece sızıntıdaki tüm enerji kayıpları yerel kayıplardır (Cornell Üniversitesi, 2007). Sızıntı GIRAFFE'da hidrolik analizde hayali bir boru olarak modellendiği için borunun alanı eşdeğer orifis çapı kullanılarak hesaplanmalıdır. GIRAFFE sızıntıları beş farklı senaryo ile sınıflandırır. Bunlar ek yeri ayrılması, çevresel çatlak, boyuna çatlak, boru duvarının delinmesi ve boru duvarının yerel yırtılmasıdır. Her bir sızıntı türü için eşdeğer orifis alanı denklemleri GIRAFFE kullanım kılavuzunda verilmiştir (Cornell Üniversitesi, 2007). Sızıntı senaryolarının gerçekleşme olasılıkları boru malzemesine bağlıdır. Bu çalışmada boru malzemesi düktil demir olarak kabul edilecektir. Düktil demirin GIRAFFE programında varsayılan sızıntı tipleri ve olasılıkları şöyledir: Çevresel ayrılma %80, boyuna çatlak %10 ve boru duvarının yerel kaybı %10; enine çatlak ve boru duvarının yerel yırtılması sonucu oluşan sızıntılar düktil demir borularda beklenmediği için gerçekleşme olasılığı 0 alınmıştır.

2.1.3 Negatif Basınç Düzeltmesi

Hidrolik ağ analizi basınçlı bir boru ağındaki sıkıştırılmayan su akımını kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanarak çözer. Geleneksel hidrolik ağ analizi algoritmaları pozitif ve negatif basınçlar arasındaki farkı ayırt etmez ve yalnızca su akımını gerçekleştirmek için toplam enerji yüksekliği farklarını kullanarak debi taleplerini karşılar. Ticari hidrolik ağ analizi yazılımları hasarsız sistemler için tasarlanmıştır. Hasar görmüş bir sistemdeki tüm debi taleplerinin karşılanması bazı düğüm noktalarında gerçekçi olmayan yüksek negatif basınçlara yol açabilir. Gerçek su dağıtım sistemleri kırık veya sızıntı noktalarından hava geçirmez olmadığı için negatif basınçları destekleme kabiliyetleri çok sınırlıdır (Shi ve O'Rourke, 2008).

GIRAFFE'da negatif basınçların düzeltilmesi için bir yalıtım yaklaşımı uygulanmaktadır. Yalıtım yaklaşımı EPANET programı ile iteratif olarak çalışmaktadır. Hasar görmüş sistemin EPANET programı kullanılarak hidrolik ağ analizi yapıldıktan sonra negatif basınca sahip düğüm noktaları belirlenmekte ve en büyük negatif basınçtan başlayarak adım adım izole edilmektedir (sistemden çıkarılarak elenmektedir). Her elemenden sonra ağ bağlantısı kontrol edilmektedir. Eğer sistemin bir bölümü su kaynağı ile olan bağlantısını kaybetmişse sistem dışına atılmaktadır. Akım analizi ve eleme işlemi sistemde negatif basınçlı düğüm noktası kalmayınca kadar devam etmektedir. (Cornell Üniversitesi, 2007).

2.2 Monte Carlo Simülasyonları ve Sistemin Performansının Değerlendirilmesi

Bir su dağıtım sisteminin deprem performansının belirlenebilmesi için kırık ve sızıntıları içeren boru hasarlarının ağa eklenmesi gerekir. Daha sonra hidrolik çözüm yapılarak hasarlı sistemin debi ve basınç dağılımları belirlenir. GIRAFFE'da borulardaki kırık ve sızıntılar sisteme deterministik veya olasılıksal olarak uygulanabilir. Deterministik uygulamada kırık ve sızıntıların ağ üzerindeki sayısı ve yerleri ile sızıntının 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 sızıntı) ile hasar sızıntı ise sızıntının 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 sızıntı) ve hasar sızıntı ise sızıntının türünü belirlemek için kullanılır. HAZUS'da (NIBS, 1997) sismik dalga etkisiyle GYD sonucu oluşan boru hasarlarının oranı %80 sızıntı ve %20 kırık olarak verilmektedir. GIRAFFE programı bu oranları varsayılan değer olarak kabul etmekle birlikte kullanıcıların oranları değiştirmesine de imkan vermektedir (Cornell Üniversitesi, 2007).

Olasılıksal yaklaşımda hasarın rastgele karakterini göstermek üzere Monte Carlo simülasyonları kullanılır. GIRAFFE'da Monte Carlo simülasyonlarının sayısı kullanıcı tarafından belirlenebilir veya kullanıcının belirlediği bir yaklaşım kriterine uygun olarak otomatik olarak belirlenebilir. GIRAFFE bir su dağıtım sistemin deprem performansı için servis oranını kullanmaktadır (Denklem 1).

$$S_s = \frac{Q_T}{Q_T^*} \quad (1)$$

burada, S_s servis oranı, Q_T karşılanabilen debi talebi ve Q_T^* gerekli debi talebidir. GIRAFFE programı hem düğüm noktaları için hem de hasar görmüş dağıtım sistemi için ayrı ayrı servis oranlarını hesaplamaktadır. Bir düğüm noktasının servis oranı, tüm Monte Carlo simülasyonları içinde o düğüm noktasının debi talebinin karşılanma oranıdır. Düğüm noktasının talebinin karşılandığı simülasyonların sayısı, toplam simülasyon sayısına bölünerek bulunur. Bir Monte Carlo simülasyonun servis oranı ise o simülasyon için hasar görmüş sistemdeki talebi karşılanan düğüm noktalarının sayısının toplam düğüm noktası sayısına oranıdır. Bu tanıma göre hasar görmemiş dağıtım sisteminin servis oranı 1.0 olacaktır.

2.3 Graf Tabanlı Su Dağıtım Ağı Performans Ölçüleri

Kompleks ağ teorisi, graf teorisinden ve istatistiksel fizikten aldığı teknikleri kullanarak farklı ağ modellerinin sınıflandırılması ile bunların yapısal karmaşıklıklarının analizi, hassaslıklarının, dayanıklılıklarının ve hasar toleranslarının ölçülerle ifade edilmesi işlerini gerçekleştirir. Bir ağ n adet düğüm noktası ile m adet ayrıttan oluşur. Su dağıtım sistemleri sözkonusu olduğunda düğüm noktaları, su dağıtımının yapıldığı varsayılan boruların kesişim noktalarıdır, ayrıtlar ise borulara karşılık gelmektedir. Su dağıtım sistemleri, ağ teorisine göre ağırlıklı ve iki yönlü ağlar olarak tanımlanmalı ise de bu çalışmada kullanılan varsayımsal dağıtım sistemi ağırlıksız ve yönsüz ağ olarak ele alınacaktır (Yazdani and Jeffrey, 2011).

Literatürde ağların ikame ve dayanıklılıklarını belirlemek için çok sayıda ölçü kullanılmasına karşın bu çalışmada sistem seviyesinde ortalama yol uzunluğu, çap, yoğunluk ve spektral yarıçap ile düğüm noktası seviyesinde arasındalık ve derece kullanılacaktır.

Ortalama Yol Uzunluğu (l) bir ağın tüm düğüm noktası çiftlerini birleştiren mesafelerin ortalama değeridir (Denklem 2).

$$l = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{(ij)} d_{ij} \quad (2)$$

burada, n düğüm noktası sayısı, d_{ij} , i ve j düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafedir. Eğer iki düğüm noktası arasında bağlantı yoksa d_{ij} sıfır olur. Bir ağın Çapı (d) tüm düğüm noktası çiftleri ele alındığında en kısa mesafelerin en büyük olanıdır (Denklem 3). Çap iki düğüm noktasının birbiriyle haberleşebilme yeteneğini gösterir. d küçüldükçe düğüm noktaları arasındaki mesafelerin daha kısa olması beklenir (Albert ve diğ., 2000).

$$d = \max(d_{ij}) \quad (3)$$

Bir ağın Yoğunluğu (q), mevcut ayrıtlarının sayısının, mümkün olan tüm ayrıtların sayısına oranıdır (Denklem 4).

$$q = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (4)$$

burada, m ayrıt sayısı ve n düğüm noktası sayısıdır. Bir ağın Spektral Yarıçapı (ρ), grafın komşuluk matrisinin sıfırdan farklı en büyük özdeğeridir (Denklem 5). Grafın komşuluk matrisi satır ve sütunları düğüm noktalarıyla etiketlenmiş bir matristir. Eğer iki düğüm noktası arasında bir bağlantı (komşuluk) varsa matris 1 değerini yoksa 0 değerini alır. Su dağıtım sistemlerinde bir düğüm noktası tekrar kendisi ile bağlanmadığı için (basit graf) komşuluk

matrisinin diyagonali sıfırlardan oluşmalıdır. Yönsüz bir ağ için komşuluk matrisi simetriktir (Lewis, 2009).

$$\rho(A) = \max\{|\lambda_1|, \dots, |\lambda_n|\} \quad (5)$$

Burada, $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ komşuluk matrisinin $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ gerçel veya kompleks özdeğerleridir. Bir düğüm noktasının Arasındalık ölçüsü (C_B) sistemdeki tüm düğüm noktası çiftlerini bağlayan en kısa yolların içerisinde bu düğüm noktasından geçenlerin sayısının toplam en kısa yol sayısına oranıdır. Düğüm noktası v ' nin Arasındalık ölçüsü Denklem 6'da verilmektedir.

$$C_B(v) = \sum_{i \neq v \neq j} \frac{\sigma_{ij}(v)}{\sigma_{ij}} \quad (6)$$

burada, σ_{ij} düğüm noktası i ' den düğüm noktası j ' ye en kısa yolların toplam sayısı ve $\sigma_{ij}(v)$ bu yolların v ' den geçenlerinin sayısıdır. Bir düğüm noktasının Derecesi ise basitçe bu düğüm noktasının bağlı olduğu komşu düğüm noktalarının sayısıdır.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

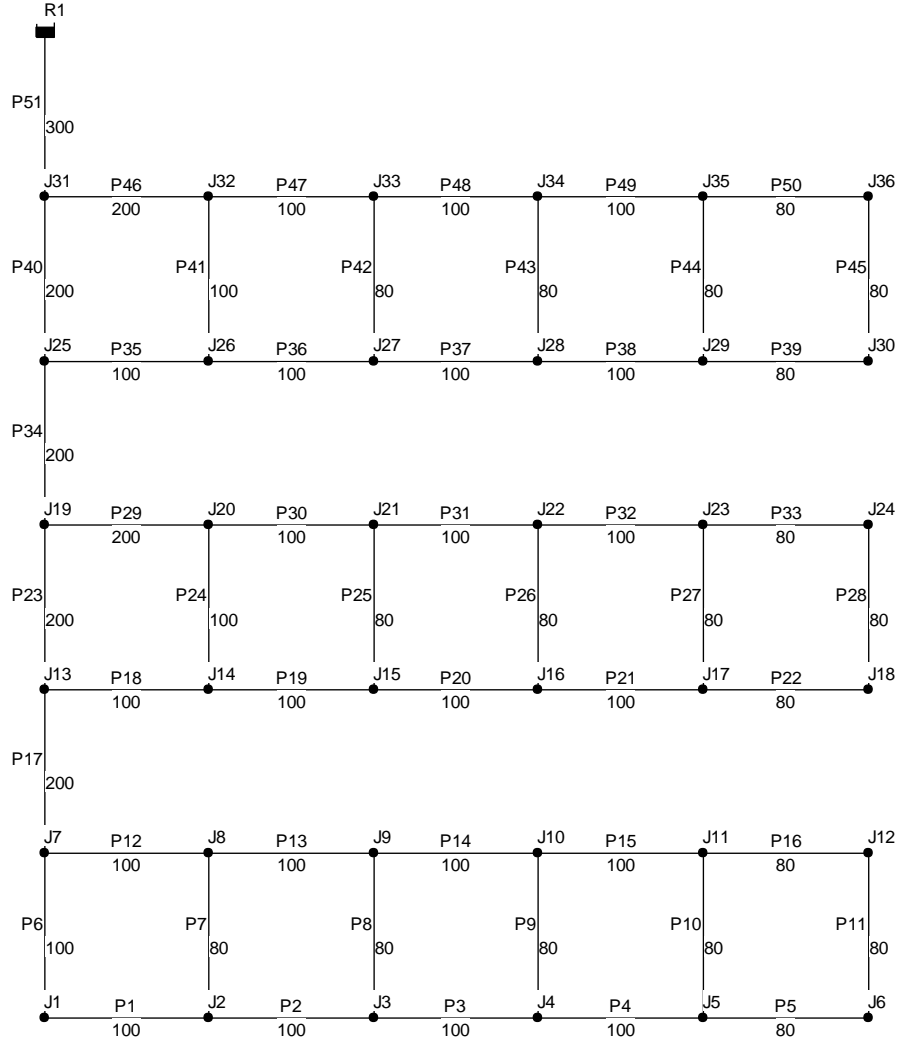
3.1 Varsayımsal Sistem ve EPANET ile Hidrolik Çözümü

Bu çalışmada hasar görmüş su dağıtım sistemlerinin performans göstergeleri varsayımsal bir sistem üzerinde incelendi. Varsayımsal sistem 51 adet boru, 36 adet düğüm noktası ve 1 tane rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 1). Tüm düğüm noktalarının kotu 100 metre ve tüm boruların uzunlukları 400 metredir. Her bir düğüm noktasında saniyede 2 litre 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 300 mm arasında değişmektedir (Şekil 1). Her ne kadar su dağıtım sistemi varsayımsal ise de yönetmeliklerdeki debi ve basınç kısıtlarına uygun değerler seçilmiştir.

Varsayımsal su dağıtım sistemi hidrolik olarak EPANET programı ile hesaplanmış ve bulunan düğüm noktalarındaki basınçlar ile borulardaki debiler Tablo 1'de verilmiştir. EPANET simülasyonundan sonra düğüm noktalarındaki basınçların yönetmeliklere uygun olduğu gözlenmiştir. Debilerdeki eksi işaret akım yönünün göz içinde saat yönünün tersine olduğunu göstermektedir.

3.2 GIRAFFE ile Monte Carlo Simülasyonları

Varsayımsal su dağıtım sisteminin sismik performansı GIRAFFE programında yapılan 1997 adet Monte Carlo simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Tüm borular için onarım oranı 2 onarım/km olarak kabul edilmiştir. Bir düğüm noktasının elenmesi için minimum basınç -5 psi (-0.34 atm) olarak kabul edilmiştir. Simülasyon süresi 0 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 bulunsaydı 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. 51 numaralı boru sistemin besleme borusu olduğu için hasar görmesine izin verilmemiştir.



Şekil 1. Varsayımsal su dağıtım sistemi

Tablo 1. Varsayımsal su dağıtım sisteminin düğüm noktası basınçları ve boru debileri

Düğ. No	Basınç (mSS)	Düğ. No	Basınç (mSS)	Boru No	Debi (l/s)	Boru No	Debi (l/s)
J1	38.00	J25	53.31	P1	7.76	P27	0.00
J2	33.23	J26	53.24	P2	7.60	P28	0.00
J3	28.65	J27	49.98	P3	5.97	P29	16.38
J4	25.71	J28	47.29	P4	4.00	P30	8.96
J5	24.32	J29	45.91	P5	2.00	P31	6.12
J6	23.17	J30	44.76	P6	-9.76	P32	4.00
J7	45.29	J31	58.60	P7	-1.84	P33	2.00
J8	34.22	J32	57.73	P8	-0.37	P34	-48.0
J9	28.70	J33	50.56	P9	-0.03	P35	0.81
J10	25.71	J34	47.32	P10	0.00	P36	6.32
J11	24.32	J35	45.91	P11	0.00	P37	5.70

Düğ. No	Basınç (mSS)	Düğ. No	Basınç (mSS)	Boru No	Debi (l/s)	Boru No	Debi (l/s)
J12	23.17	J36	44.76	P12	12.24	P38	3.98
J13	46.61			P13	8.40	P39	2.00
J14	45.45			P14	6.03	P40	-50.81
J15	41.47			P15	4.00	P41	-7.51
J16	38.62			P16	2.00	P42	-1.38
J17	37.22			P17	-24.00	P43	-0.28
J18	36.08			P18	3.62	P44	-0.02
J19	48.56			P19	7.04	P45	0.00
J20	47.91			P20	5.88	P46	19.19
J21	41.69			P21	4.00	P47	9.68
J22	38.62			P22	2.00	P48	6.30
J23	37.22			P23	-29.62	P49	4.02
J24	36.08			P24	-5.43	P50	2.00
				P25	-0.83	P51	72.0
				P26	-0.12		

Her düğüm noktası ve Monte Carlo simülasyonu için servis oranları GIRAFFE programı tarafından belirlenmiştir. Bir simülasyondan sonra sistemin servis oranı, sistemde talep ettiği debiyi alabilen düğüm noktası sayısının toplam düğüm noktası sayısına bölünmesiyle bulunmuştur. Düğüm noktalarının servis oranı ise ilgili düğüm noktasının talep ettiği debiyi alabildiği simülasyon sayısının toplam Monte Carlo simülasyonları sayısına oranı olarak hesaplanmıştır. Düğüm noktalarının servis oranlarının ortalaması ile Monte Carlo simülasyonlarının servis oranlarının ortalaması birbirine eşittir ve bu değer depremden sonra sistemin genel servis düzeyini göstermektedir. Varsayımsal su dağıtım sisteminin servis düzeyi 0.572818 olarak hesaplanmıştır. Yani bu su dağıtım sistemi varsayılan deprem sonucunda debi talebinin ortalama %57'sini karşılayabilecektir. Düğüm noktalarının servis oranları Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Düğüm noktalarının servis oranları

Düğüm No	Servis Oranı	Düğüm No	Servis Oranı
J1	0.459189	J19	0.803706
J2	0.471708	J20	0.748623
J3	0.447171	J21	0.63996
J4	0.315974	J22	0.522784
J5	0.152729	J23	0.451177
J6	0.045568	J24	0.250376
J7	0.628943	J25	0.941913
J8	0.498247	J26	0.945919
J9	0.426139	J27	0.909865
J10	0.328493	J28	0.861292

Düğüm No	Servis Oranı	Düğüm No	Servis Oranı
J11	0.186279	J29	0.759639
J12	0.065598	J30	0.515273
J13	0.745118	J31	1.0
J14	0.702554	J32	0.947421
J15	0.648473	J33	0.91337
J16	0.568353	J34	0.834752
J17	0.429144	J35	0.71357
J18	0.205308	J36	0.536805

Tablo 2 incelendiği zaman düğüm noktalarının servis oranlarının 0.045568 ile 1.0 arasında değiştiği görülmektedir. J31 ile gösterilen düğüm noktası sistemin giriş noktası olduğu için rezervuarla bu nokta arasındaki borunun hasar görmesine izin verilmemiştir, böylece J31 noktası her simülasyonda su almış dolayısıyla servis oranı 1.0 olmuştur. J6 ile gösterilen düğüm noktasının servis oranı ise en küçük değeri almıştır. Bu nokta sistemin girişe en uzak noktasıdır ve beklendiği gibi simülasyonların çoğunda aradaki borular hasar gördüğü için su alamamıştır.

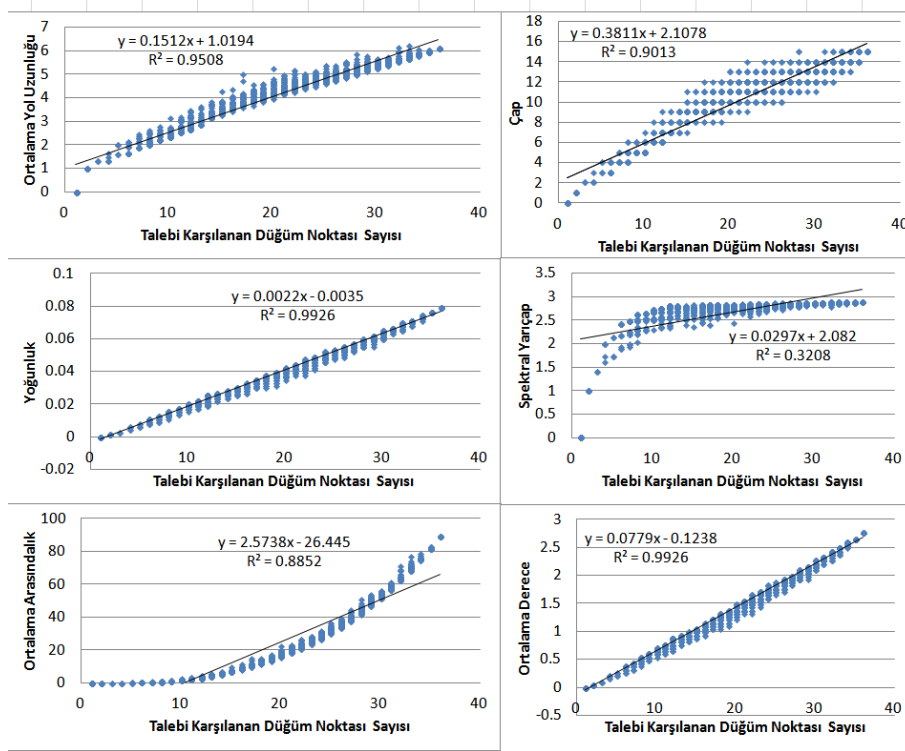
3.3 Igraph ve QuACN ile Hasarlı Ağın Ölçüleri

Igraph ve QuACN, R yazılımının ağ ölçülerini hesaplayan fonksiyonları içeren kütüphaneleridir. Bu çalışmada ortalama yol uzunluğu, çap, yoğunluk, arasındalık ve derece değerleri Igraph (Csardi and Nepusz, 2006) yardımıyla and spektral yarıçap değerleri QuACN (Mueller et al., 2014) yardımıyla hesaplanmıştır. Öncelikle tüm ağ ölçüleri hasar görmemiş sistem için hesaplanmıştır. Daha sonra her Monte Carlo simülasyonu sonucu talep ettiği debiyi alamayan düğüm noktalarını komşularına bağlayan borular silinerek kalan ağın ölçüleri hesaplanmıştır. Varsayımsal su dağıtım sisteminin hasarsız durumdaki ağ ölçüleri ve hasarlı ağların ağ ölçülerinin ortalamaları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Ağ ölçüleri

Ağ Ölçüleri	Hasarsız Sistem	Hasarlı Sistemlerin Ortalaması
Ortalama Yol Uzunluğu	6.095238	4.136526
Çap	15	9.96745
Yoğunluk	0.07937	0.04236
Spektral Yarıçap	2.886731	2.694765
Ortalama Arasındalık	89.1667	26.6177
Ortalama Derece	2.7778	1.4825

Hasarlı sistemlerin ortalama ölçülerine bakıldığı zaman hepsinin hasarsız sistemin değerlerinden daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi ağ bağlantılarının bazılarının kaybolmasıdır. Şekil 2'de bulunan ilişkiler incelendiği zaman talebi karşılanan düğüm noktası sayısı ile yoğunluk ve derece ölçüleri arasında güçlü doğrusal ilişki olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2. Talebi karşılanan düğüm noktası sayısı ile ağ ölçüleri ilişkileri

3.4 Genel Değerlendirme

Hasar görmüş bir su dağıtım sisteminin talebi karşılayabilme yüzdesi (servis oranı) ile ağ ölçüleri arasında güçlü bir ilişki olduğu Şekil 2'deki grafiklerden görülmektedir. Bu çalışmada sadece doğrusal ilişki incelenmiş olup doğrusal olmayan ilişkilerin de bazı ölçüler için daha iyi sonuçlar vereceği grafiklerden anlaşılmaktadır. Ağ ölçülerinin su dağıtım sistemlerinin deprem performansının değerlendirilmesinde kullanımı öncelikle tasarım aşamasında başlar. Su dağıtım sistemi projelendirilirken farklı ağ modelleri için beklenen depremin oluşturacağı hasar sonrası ağ ölçüleri hesaplanarak hasarsız duruma en yakın ağ ölçülerini veren sistem tercih edilebilir. Farklı su dağıtım sistemlerinin deprem sonrası performanslarının karşılaştırılmasında yine ağ ölçüleri kullanılabilir. Bir su dağıtım sisteminin kritik boru veya düğüm noktalarının belirlenmesinde de ağ ölçülerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada ağ yönsüz ve ağırlıksız olarak değerlendirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda yönlü ve ağırlıklı ağ ölçülerinin nasıl sonuçlar vereceği incelenecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 114M258 numaralı TÜBİTAK Projesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Albert, R., Jeong, H., Barabasi, A. L., 2000. Error and attack tolerance of complex networks. Nature; 406: 378-382.
- Applied Technology Council (ATC), 1991. Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States (ATC-25), Redwood City, CA.

- Chou, K. W., Liu, G. Y., Yeh, C. H., Huang, C. W., 2013. Taiwan water supply network's seismic damage simulation applying negative pressure treatment. 5th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Taipei, Taiwan.
- Cornell Üniversitesi, 2007. GIRAFFE user's manual (Version 4.1), School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY.
- Csardi, G., Nepusz, T., 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2000. EPANET 2 Users Manual, EPA/600/R-00/057, Cincinnati, OH.
- Hwang, H. M., Lin, H., Shinozuka, M., 1998. Seismic performance assessment of water delivery systems. *J. Infrastruct. Syst.*; 4: 118-125.
- Javanbarg, M. B., Takada, S., 2010. Seismic reliability assessment of water supply systems. *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds), Taylor & Francis Group, London.
- Lewis, T. G., 2009. *Network Science: Theory and Applications*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Mueller, L. A. J., Schutte, M., Kugler, K. G., Dehmer, M., 2014. Quantitative Analyze of Complex Networks. User manual of R package QuACN.
- National Institute of Building Sciences (NIBS), 1997. Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 97: Technical Manual. Prepared for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Shi, P., O'Rourke, T. D., 2008. Seismic response modeling of water supply systems. MCEER-08-0016, Technical Reports, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Toprak, S., Taskin, F., Koc, A.C., 2009. Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: a case study for Denizli, Turkey. *Bull. Eng. Geol. Environ.*; 68: 499–510.
- Yazdani, A., Jeffrey, P., 2011. Complex network analysis of water distribution systems. *Chaos*; 21: 016111, doi:10.1063/1.3540339.