

Candamarı Şebekelerinin Deprem Güvenirliği

Ayşe Sevtap SELÇUK
İstatistik Bölümü,
O.D.T.Ü. Ankara-TURKEY
Mehmet Semih YÜCEMEN
Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi,
Ortaköy, Lefkoşa-KKTC

Geliş Tarihi 09.07.1998

Özet

Candamarı şebekeleri olarak adlandırılan iletişim, dağıtım ve ulaşım şebekeleri, geniş coğrafi alanlara yayılmış enterkonekte sistemlerdir. Deprem tehlikesi altındaki bir candamarı şebekesinin güvenirliliğinin (kalım olasılığı) hesaplanması, bu tür sistemlerin hasar verici bir deprem esnasında ya da sonrasında işlevini yerine getirebilmelerinin önem taşıması nedeniyle gereklidir. Bu çalışmada, candamarı şebekelerinin deprem güvenirliliğini istatistiksel yöntemlerle tahmin etmek üzere kapsamlı bir model geliştirilmiştir.

Candamarı güvenirlilik analizi, temel olarak, elemanlarındaki göçmeler karşısında candamarı şebekesinin göçmeye karşı göstereceği güvenirliliğinin belirlenmesini içermektedir. Bir candamarı şebekesi, elemanlarının dayanımının rassal ve mekanda bağımlı olduğu bir eşdeğer ağ çizelgesine dönüştürülmektedir. Candamarının maruz kalacağı deprem tehlikesi geçmiş deprem verilerine dayanılarak çıkartılan bir olasılık dağılımı ile değerlendirilmektedir. Sismik tehlikenin bulunmasında “klasik” sismik tehlike analiz modeli (Cornell, 1968) bazı değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Candamarı güvenirliliğinin hesaplanmasında, Yoo ve Deo (1988) tarafından önerilen bilgisayar süresi ve hafıza gereksinimleri bakımından etkin olan bir algoritma benimsenmiştir. Elemanlarının mekandaki uzunluklarını göz önüne alan bu algoritma sayısal hesaplamalar için Fortran diline çevrilerek LIFEPACK adı verilen bir yazılım paketine dönüştürülmüştür. Önerilen yöntemin uygulanması ayrıntılı iki örnek çalışma ile gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Ağ çizgesi güvenirliliği, candamarı şebekesi, deprem, sismik tehlike analizi, mekansal korelasyon, alt yapı.

Earthquake Reliability of Lifeline Networks

Abstract

Lifelines such as pipelines, transportation, communication and power transmission systems are networks which extend spatially over large geographical regions. The quantification of the reliability (survival probability) of a lifeline under seismic threat requires attention, since the proper functioning of these systems during or after a destructive earthquake is vital. In this study, a comprehensive probabilistic model for the assessment of the reliability of lifelines under earthquake loads is developed.

Network reliability analysis mainly deals with the evaluation of the performance of a network in terms of its ability to withstand the failure of its components. A lifeline is idealized as an equivalent network with the capacity of its elements being random and spatially correlated. The seismic hazard that the network is exposed to is described by a probability distribution derived from past earthquake data. The seismic hazard

analysis is based on the “classical” seismic hazard analysis model (Cornell, 1968) with some modifications. For the evaluation of the network reliability, an efficient algorithm developed by Yoo and Deo (1988) is utilized. This algorithm eliminates the CPU time and memory capacity problems that are encountered in large networks. A software package, called LIFEPACK, is coded to carry out the numerical computations. Two detailed case studies are presented to show the implementation of the proposed method.

Key Words: Network reliability, lifelines, earthquake, seismic hazard analysis, spatial correlation.

Giriş

Sismik tehlikenin belirlenmesine yönelik çalışmalarda, baraj, nükleer güç santralleri, enerji üretim tesisleri gibi “merkezi” yapılar göz önünde tutulmuş, bunlardan çıkan dağıtım hatları ise genellikle ihmal edilmiştir. Her ne kadar ana merkez tesislerinin hasar görmesi tüm sistemin durdurulmasını gerektirecek ise de, geniş bir coğrafi alana yayılmış bu tür sistemlerin toplam güvenilirliği, tüm elemanların davranışının göz önünde tutulmasını gerektirmektedir.

Son yirmi yıl içinde iletişim, dağıtım ve ulaşım şebekelerinin deprem etkisi altında güvenilirliğinin istatistiksel yöntemlerle tahmini ilgi çeken bir konu olmuştur. Bu ilginin başlıca nedeni, yerleşim merkezlerinde büyük depremler sırasında ortaya çıkabilecek ikincil felaketlerin önlenmesi ve deprem sonrası kurtarma faaliyetlerinin etkin bir biçimde yürütülmesinin sağlanmasıdır. Kobe (17 Ocak 1995 Hyogo-Ken Nanbu) depreminde alt yapı sistemlerinde meydana gelen hasarlar yukarıda belirtilen hususların ne kadar önemli olduğunu gösteren en son örnektir. Kobe depremi nedeni ile bölgedeki otoyolların 1257 noktasında hasar meydana gelmiş, yaklaşık 1 milyon hanenin suyu, 857 bin hanenin doğal gazı, 916 bin hanenin elektriği ve 410 bin abonenin telefonu kesilmiştir. Depremden sonra aynı anda 234 değişik yerde, özellikle doğal gaz kaçağı ve elektrik kontağı nedeniyle yangın başladığı belirtilmiştir. Toplam yangın adedi 531, yanan saha ise yaklaşık 1 km² dir (Aydınoglu ve Erdik, 1995).

Karayolları, köprüler, boru hatları, enerji nakil hatları, haberleşme hatları, su ve doğal gaz dağıtım şebekeleri geniş bir alana hayati önemde hizmet götüren sistemlerdir. Çalışmamızda bu tür iletişim, dağıtım ve ulaşım şebekelerine, candamarı (lifelines) şebekeleri denilecektir. Candamarı şebekelerinin güvenilirliğinin analizinde, şebeke birbirlerine bağlı düğümlerden (nodes) ve bağlardan (links) oluşan bir eşdeğer ağ (network) çizgesi ile tasvir edilecektir.

Candamarı şebekelerinin deprem güvenilirliğinin tahmini, sismik tehlike analizinin ve ağ güvenilirliği

değerlendirmesinin yapılmasını gerektirmektedir. Her iki sahada da pek çok yayın bulmak mümkünse de, ağ sistemlerinin deprem güvenilirliği konusundaki çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Geniş kapsamlı literatür araştırması Selçuk(1996), Selçuk ve Yücemem (1996), Yücemem ve Selçuk (1996) tarafından sunulmuştur. Candamarı şebekelerinin güvenilirliği kısıtlı sayıdaki araştırmacı tarafından değişik sismik tehlike modelleri ve değişik ağ analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bu sahadaki ilk kapsamlı çalışmada Panoussis (1974) deprem tehlikesi altında candamarı şebekelerinin güvenilirliğini değerlendirmek üzere bir model geliştirmiştir. Bu modelde sistem elemanlarının hasar durumu için önce sağlam ve göçme olarak iki durum düşünülmüş, daha sonra bu iki duruma, hafif, orta ve ağır hasar durumlarının da eklenmesi ile model geliştirilmiştir. Model, Boston şehri ve civarındaki ana karayollarının oluşturduğu ulaşım şebekesinin sismik güvenilirliğinin değerlendirilmesine uygulanmıştır. Daha sonraki yıllarda candamarı şebekelerinin güvenilirliği, değişik sismik tehlike modelleri ve değişik ağ analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bunların başlıcaları: Taleb-Agha (1977), Barlow, v.d. (1980), Moghtaderizadeh v.d. (1982), Sato ve Toki (1994) ve Katayama (1994) tarafından yapılan çalışmalardır. Ülkemizde ise bu konuda yapılmış çalışmalar çok kısıtlı olup bilinen başlıca yayınlar şunlardır: Sankur ve Kalyoncu (1989), Yücemem (1994), Yücemem ve Selçuk (1994, 1996) ve Selçuk ve Yücemem (1996).

Depremlerin oluşumu ve şebekeyi oluşturan elemanların dayanımındaki rassallık ve belirsizlikler göz önünde tutulduğunda, candamarı şebekelerinin güvenilirlik değerlendirmesinin olasılık ve istatistik yöntemlerine dayanılarak yapılması kaçınılmazdır. Söz konusu değerlendirme aşağıda sıralanan üç değişik türde çalışmaya dayanmaktadır:

(i) Sismik tehlike analizi: Şebekenin bulunduğu bölgede tanımlanan sismik bölgelerde oluşabilecek depremler nedeni ile şebeke elemanlarında mey-

dana gelecek sismik yüklerin olasılık dağılımlarının çıkartılması.

(ii) Dayanım analizi: Şebeke elemanlarının, belirlenen bir göçme (failüre) kriterine göre deprem yüklerine dayanımlarının olasılık dağılımlarının çıkartılması.

(iii) Ağ güvenilirlik analizi: Öngörülen bir algoritmaya göre ağ sisteminin güvenilirliğinin tahmin edilmesi.

Bu araştırmanın başlıca amacı bir ağ şeklinde modellenecek olan candamarı şebekelerinin deprem etkisi altında güvenilirliğini mekandaki bağımlılığı da göz önünde tutarak hesaplayacak bir yöntem geliştirmek ve bu yöntemin gerektirdiği sayısal hesaplamaları gerçekleştirecek bilgisayar yazılımlarını hazırlamaktır. Ayrıca, önerilen yöntemin uygulamalarının gerçek verilere dayanan örneklerle gösterilmesi de hedeflenmiştir. Kullanılan bazı teknik terimlerin (özellikle ağ güvenilirliği konusundakilerin) Türkçeleri henüz tam yerleşmediği için bunların İngilizce karşılıkları metinde ilk geçtikleri yerde parantez içinde verilmiştir.

Modelin Başlıca Elemanları

İstatistiksel Sismik Tehlike Hesap Modeli

Sismik bakımdan hareketli bir bölgede gelecekte olabilecek depremlerin zamanı, yeri, büyüklüğü ve diğer özellikleri önceden kestirilemez. Deprem mühendisliğinde karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi, belirli bir zaman aralığında olabilecek depremlerin inşaat sahasında yaratabilecekleri etkilerin, özellikle zemin hareketi ile ilgili parametreler (ivme, hız, yer değiştirme gibi) için beklenebilecek en büyük değerlerin saptanmasıdır. Depremlerin zaman, yer ve şiddet bakımından gösterdikleri rassallık ve çeşitli belirsizlikler nedeni ile, depreme dayanıklı yapıların projelendirilmesinde kullanılacak parametre değerlerinin saptanmasında olasılık ve istatistik yöntemlerine dayanan bir yaklaşım gereklidir. Deterministik yaklaşımlara karşın, olasılık ve istatistik çerçevesinde geliştirilecek bir yöntemin katkısı, zemin hareketi değişkenleri için tek bir değer yerine bir değerler kümesi ile bu küme üzerinde tanımlanmış bir olasılık dağılımının belirlenmesi şeklindedir.

Sismik tehlike analizinde amaç, eskiden olmuş

deprem olaylarına ait eldeki verileri jeolojik, sismolojik, istatistiksel ve diğer bilgilerle düzenli bir şekilde birleştirerek, göz önünde tutulan inşaat sahasında ileride beklenebilecek sismik etkinlik için belirli olasılık değerlerini saptamaktır. Sismik tehlike analizinin sonucu, genellikle inşaat yerindeki belirli bir zemin hareketi parametresinin veya deprem şiddetinin bir yıldaki aşılma olasılığını (veya ortalama tekrar süresini) gösteren bir eğri şeklindedir. Sismik tehlike analiziyle deprem tehlikesinin niceliksel olarak ve deprem mühendisliğinde kolayca kullanılabilir parametreler cinsinden ortaya konulması, mühendislik yapılarının sismik yükler açısından projelendirilmeleri ile ilgili kararların rasyonel bir şekilde verilmesine olanak sağlamaktadır.

Candamarını oluşturan elemanların geniş bir coğrafi alana yayılmış olmaları nedeni ile sismik tehlike analizinin candamarı sisteminin yer aldığı tüm alan üzerinde yapılması gereklidir. Diğer bir deyimle, elemanlar üzerinde (genellikle eşit aralıklarla seçilen noktalarda) sismik tehlike analizi tekrarlanmaktadır. Burada sunulan sismik tehlike analiz modeli, ana hatlarıyla Cornell (1968) tarafından önerilen “klasik” yöntemeye dayanmakta, ancak Yücemen ve Gülkan (1993) tarafından önerilen bazı değişiklikleri de içermektedir. Bu yöntemde, depremlerin büyüklük, zaman ve yer bakımından gösterdikleri rassallıkla ilgili olarak öngörülen varsayımlar aşağıdaki gibidir:

(i) Deprem magnitüdlerinin olasılık dağılımı, alt sınırı m_0 ve üst sınırı m_1 olan doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisinden çıkartılmıştır. Deprem magnitüdlerinin üst sınırı, m_0 , bölgede beklenebilecek en büyük deprem magnitüdü, m_1 ve magnitüd-sıklık ilişkisinin eğimi β ile gösterilmektedir.

(ii) Geçmişte gözlenen depremlerle ilgili verilere dayanarak ve gelecekte beklenebilecek deprem olaylarının birbirlerinden bağımsız oldukları varsayılarak depremlerin oluşumu zaman uzayında bir Poisson süreci olarak modellenmektedir.

(iii) Bir deprem sırasında oluşan zemin titreşimleri, deprem odağından çevreye yayılır ve etkinlikleri zemin koşullarına bağlı olarak odaktan uzaklaştıkça genellikle azalır. Azalım ilişkisi, m , magnitüdündeki bir depremin, r odak uzaklığındaki “inşaat” sahasında yaratacağı en büyük zemin ivmesi, y 'nin değerini veren bir fonksiyondur:

$$Y = g(m, r) \quad (1)$$

$g(\bullet)$ gözlemsel verilerden regresyon analiziyle elde edilecek fonksiyondur.

(iv) Geometrik özelliklerine bağlı olarak deprem-

lerin mekan içinde oluşumu üç tür deprem kaynağına dayandırılmıştır. Bunlar nokta, çizgi ve alan kaynaklarıdır.

Yukarıda açıklanan varsayımlara dayanılarak oluşturulan sismik tehlike modelindeki en büyük zemin hareketi parametresinin belirli bir y değerini aşma olasılığı toplam olasılık teoremine göre şöyle ifade edilir (Yücemen, 1982):

$$Pr(Y > y) = \int \int Pr(Y > y | m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (2)$$

Burada M ve R sırasıyla depremin magnitüdü ve odak noktasına olan uzaklığı açıklayan rassal değişkenler olup $f_{\bullet}(\bullet)$ olasılık yoğunluk dağılımı, $Pr(\bullet)$ de olasılığı simgelemektedir. Sismik tehlikenin hesaplanmasında, sismik kaynağın türünün ve geometrik özelliklerinin yanısıra değişik nedenlerden doğan belirsizliklerin de göz önünde tutulması gerekir.

Eleman Güvenirlik Modeli

Bir yapı sistemi belli bir görevi yerine getirmek üzere, belirli bir düzene göre birleştirilmiş elemanlar topluluğudur. Bu elemanlar bireysel davranışları ile sistemin tüm dayanımını etkiler. Yapı elemanlarının dayanımı ve bunları etkileyen yüklerin değeri kesin olmayıp rassal bir özellik göstermektedir. Bundan başka eksik bilgi ve verilerden doğan belirsizliklerin de tasarıma etkisi göz önünde tutulmalıdır. Bu belirsizlikler klasik tasarım yöntemlerinde güvenlik ya da yük katsayılarının kullanılmasını gerektirmektedir. Ancak belirsizlikler ve bunların yapının güvenliğine etkileri, düzenli bir şekilde yalnızca olasılık yöntemleri ile çözümlenebilir. Bu nedenle yapı sistemlerinin tasarım ilkesi de olasılık yöntemleri çerçevesinde geliştirilmelidir. Bu çalışmada bir yapı elemanının güvenirliliği, dayanım ve yükün rassal değişken olduğu durum için incelenecektir.

Elemanlar için sismik yük (talep) olasılık dağılımı belirlendikten sonra, her elemanın dayanımı için de bir olasılık dağılımı çıkartılmalıdır. Bu olasılık dağılımı şebeke elemanlarının dayanımında, kullanılan malzeme özelliklerinden, boyutlardan ve modelleme hatalarından kaynaklanan belirsizliği yansıtmaktadır. Farklı kaynaklardan gelen belirsizliklerin dayanıma olan toplam etkisi birinci-mertebe ikinci-moment yöntemi (Ang ve Tang, 1984) kullanılarak bulunabilir.

Dayanım ve deprem yüküne bağlı olarak elemanın hasar durumu sürekli bir hasar göstergesi değişkeni ile tanımlanabilir. En basit şekilde ise tam hasar, göçme, (failure) ve hiç hasar görmeme, kalım, (survival) şeklinde iki durum düşünülebilir. Dayanım ve deprem etkisine ilişkin olasılık dağılımları bilindiğinde elemanın kalım olasılığı bulunabilir. Kalım olasılığı, çalışmamızda güvenirlilik olarak adlandırılmıştır. Eğer D ve S herhangi bir elemanın, sırasıyla, sismik dayanımını (kapasitesini) ve sismik yükünü (talebi) gösteren rassal değişkenler ise, bu elemanın güvenirliliği (kalım olasılığı), P_S , şöyledir:

$$P_S = Pr(D > S) \quad (3)$$

Elemanın göçmesi ise “ $D \leq S$ ” durumunda ortaya çıkacaktır ve göçme olasılığı, P_f :

$$P_f = Pr(D \leq S) = 1 - P_S \quad (4)$$

D ve S rassal değişkenlerinin istatistiksel anlamda birbirinden bağımsız oldukları durumda ve Denklem (4) kullanılarak:

$$\begin{aligned} P_f &= \int_0^{\infty} \int_0^s f_D(r) f_S(s) dr ds \\ &= \int_0^{\infty} F_D(s) f_S(s) ds \end{aligned} \quad (5)$$

$F_x(\cdot)$ ve $f_x(\cdot)$, sırası ile, X rassal değişkeninin birikimli dağılım ve olasılık yoğunluk işlevleridir.

Şebekeyi oluşturan herhangi bir elemanın güvenirliliği, bu elemanın dayanımının, elemana gelen yük etkisi ile karşılaştırılarak belirlenir. Elemanları mekana yayılı ve birbirleri ile bağlantılı bir sistemde her eleman için boyut faktörünün göz önüne alınması gerekir. Uzunlukları birbirlerinden farklı olan elemanların güvenirliliğinin hesaplanması amacıyla iki model geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi olan “nokta eleman” modelinde sismik parametrenin olasılık dağılımı sistemin mekanda yayılı olan her elemanı boyunca değişik noktalarda hesaplanarak, en yüksek sismik yük belirlenmekte ve bu değer elemanın maruz kaldığı sismik tehlike olarak kabul edilerek belirli bir uzunluğa sahip olan o eleman nokta elemana dönüştürülmektedir. Burada elemanın uzunluğu güvenirlilik belirlemede etkin olmamaktadır. Bu yaklaşım sismik yükün elemanın tüm uzunluğu boyunca istatistiksel bakımdan tam bağımlı olduğunu varsaymaktadır.

İkinci model olan “çoklu alt eleman” modelinde ise, her eleman, mekansal korelasyon değerine bağlı

olarak eşit uzunlukta alt elemanlara bölünmektedir. Bu durumda elemanın kalımlığı, “seri” olarak bağlanmış alt elemanların tümünün kalımlığını gerektirmektedir. Aynı deprem etkisine maruz kaldıklarından ve dayanımı etkileyen malzeme, işçilik gibi etkenlerin aynı olması nedeni ile alt elemanların göçme olaylarının istatistiksel olarak kuvvetli bir bağımlılık göstermeleri beklenir. Bu bölümde açıklanan modeller çerçevesinde ve değişkenlerin normal dağılım gösterdiği durumda eleman güvenilirliği (kalım olasılığı) Denklem (5) kullanılarak bulunabilir. Ancak bu modeller ve elde edilen kalım olasılıkları “nokta eleman” varsayımı için geçerlidir. Birbirleri ile bağlantılı olan z sayıdaki alt elemandan oluşan bir candamarı elemanının güvenilirliğinin bulunması, oldukça zor olan bir sıra integralin alınmasını ve elde edilmesi genellikle olanak dışı olan alt eleman dayanımlarının ortak olasılık yoğunluk işlevinin saptanmasını gerektirmektedir. Bütün bu zorluklar karşısında, bazı basitleştirici varsayımlar altında P_s için alt ve üst sınır değerlerini bulmak en uygun yol olmaktadır. Basitleştirici varsayımlar ve buna göre bulunacak sistem hasar olasılıklarının simgeleri aşağıda özetlenmiştir:

- P'_f : alt elemanların dayanımlarının tam bir korelasyon gösterdikleri varsayımına göre elemanın hasar görme olasılığı;
 P_f^* : alt elemanların göçmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız olaylar oldukları varsayımına göre elemanın hasar görme olasılığı.

Yukarıdaki varsayımların ilkinde alt elemanların dayanımlarının tam bir korelasyon gösterdikleri kabul edilmiştir. Bu durumda z sayıda alt elemandan oluşan bir şebeke elemanının, en zayıf noktası, güvenilirlik değerinin en küçük olduğu alt elemandır ve S yükünün şebekeye ilk etkisinde elemanın hasara uğraması olasılığı, bu en zayıf eleman için Denklem (4)'den bulunan göçme olasılığına eşit olacaktır. Kısaca,

$$P'_f = \max \{P_{f_i}\} = \max \{P_{f_1}, P_{f_2}, \dots, P_{f_n}\} \quad (6)$$

Burada, P_{f_i} , i sayılı alt elemanın deprem etkisi ile göçme olasılığıdır. Eğer alt elemanların göçmelerinin istatistiksel bakımdan bağımsız olaylar oldukları varsayılırsa,

$$P_f^* = \prod_{i=1}^z P_{s_i} = \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (7)$$

ve buna bağlı olarak elemanın hasar görme olasılığı

da

$$P_f^* = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (8)$$

olur.

Bir şebeke elemanının hasar görme olasılığı için elde edilen bu değerler ile gerçek hasar görme olasılığı, P_f , arasında şu eşitsizliklerin geçerli olduğu gösterilmiştir (Yüceyen, 1977):

$$P'_f \leq P_f \leq P_f^* \quad (9)$$

Denklem (9)'da görüldüğü gibi bir elemanın hasar görme olasılığı için alt ve üst sınır değerleri, elemanı oluşturan alt elemanların göçme olasılıkları cinsinden şöyle ifade edilebilir:

$$\text{Alt sınır: } P'_f = \max_i P_{f_i} \quad i = 1, 2, \dots, z \quad (10)$$

$$\text{Üst sınır: } P_f^* = 1 - \prod_{i=1}^z (1 - P_{f_i}) \quad (11)$$

Benzer şekilde elemanın kalım olasılığı için alt ve üst sınır değerleri, z sayıdaki alt elemanların kalım olasılıkları cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$\text{Alt sınır: } P_S^* = \prod_{i=1}^z P_{s_i} \quad (12)$$

$$\text{Üst sınır: } P'_S = \min_i P_{s_i} \quad i = 1, 2, \dots, z \quad (13)$$

Yukarıda açıklanan çoklu alt eleman modelinde bir elemanın kalım olasılığı alt sınırı (Denklem (12)), elemanın bölündüğü alt parça sayısına duyarlı olmaktadır. Bunun nedeni alt güvenilirlik sınırının, alt elemanların bağımsız oldukları varsayımına göre alt eleman güvenilirliklerinin çarpımına eşit olmasıdır. Elemanın bölündüğü parça sayısı arttıkça, eleman güvenilirliği, dolayısıyla da ağ güvenilirliği azalacaktır. Çalışmamızda alt elemanların uzunluğunun, λ ile simgelenen mekansal dalgalanma ölçeğine (spatial scale of fluctuation) eşit olduğu varsayılmıştır. λ , Vanmarcke (1983) tarafından rassal süreçlerdeki korelasyon yapısını modellemek için önerilmiş bir parametredir. Fiziksel olarak, λ , sismik kapasite ve yükün mekanda kuvvetli bağımlılık gösterdiği mesafeyi belirtmektedir.

Çoklu eleman modelinde yalnızca elemanlar içindeki mekansal korelasyon göz önüne alınmaktadır. Halbuki, elemanlar arasındaki korelasyon da sistemin bozulmasını etkileyebilir. Herhangi iki eleman arasındaki mekansal korelasyon

ölçüsü bu iki eleman arasındaki uzaklığa bağlı olacaktır ve uzaklıkla orantılı olarak azalan bir fonksiyon gösterecektir. Bu bağlılığın yapısını gösteren ve en yaygın model olan üstel fonksiyon aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\rho(\Delta) = \exp\{-\Delta/a\} \quad (14)$$

Burada, $\rho(\Delta)$ korelasyon fonksiyonu, Δ herhangi iki eleman arasındaki ortalama uzaklık ve “a” sismik yük ve kapasitenin korelasyon yapısını tanımlayan parametredir.

Ağ Güvenirlik Analizi

Elemanların güvenilirliğinden tüm şebekenin güvenilirliğinin bulunması için şebekenin eşdeğer bir ağa dönüştürülmesi gerekmektedir. Bir ağ çizgesi, düğümlerden ve bağlardan oluşan seti kapsayan bir sistemin şekilsel olarak gösterimidir. Örneğin, bir ulaşım şebekesinde, ana yollar, tüneller ve köprüler bağları, bunların birleştikleri yerler ise düğümleri oluşturur. Ağ güvenirlığının hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yöntemlerde şebekede oluşabilecek bozulma ve aksamaların birbirlerinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır. En iyi bilinen ağ güvenirlilik hesaplaması bağ göçmelerinin birbirlerinden bağımsız oldukları varsayımı altında bir düğümün başka bir düğüm ile iletişim kurması olasılığının bulunmasıdır.

Ağ güvenirlığının hesaplanmasında kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanı şebekenin küçük alt sistemlere parçalanması ve alt sistemler arasındaki işlevsel bağıntının araştırılmasıdır. Buna göre, kullanılan istatistiksel ölçütler uç-düğüm çifti güvenirliliği (terminal pair reliability) ve çoklu uç-düğüm çifti güvenirliliği (multi-terminal pair reliability) olarak iki çeşittir. Uç düğümler çiftinde, iki düğüm giriş (s) ve çıkış (t) düğümleri olarak belirlenir. Diğer düğümler ise giriş ve çıkış düğümleri arasında alternatif iletişimi sağlama görevini yerine getirirler.

Bu çalışmada kullanılan ağ güvenirlilik modeli esas olarak uç düğümler çifti güvenirlilik yöntemine bağlı olarak geliştirilmiştir. Buna göre şebekenin her elemanı (düğüm ya da bağ) için göçme ve kalım olarak iki durum tanımlanmıştır. Elemanların durumlarına göre de şebeke için iki durum belirlenmiştir: işlevsel ya da bozuk olma. Çalışmamızda Yoo ve Deo (1988) tarafından önerilen bu algoritma, ağ güvenirliliğinin değerlendirilmesine esas teşkil etmiştir. Bu algoritma yol kümesi birerleme yöntemine (path enumer-

ation method) dayanmaktadır.

Ağ güvenirliliği probleminde amaç, her iletişim sağlayan bağın kalım olasılığının bilinmesi koşulu ile herhangi belirli bir çift düğüm arasındaki kesintisiz iletişim olasılığını belirlemektir. Genellikle seçilen bu iki düğüm, giriş (s) ve çıkış (t) düğümleri olacaktır. Şebekenin elemanları, şebekeyi oluşturan bağ ve düğümlerdir. Eğer i elemanı, j elemanı ile arada başka bir elemanla karşılaşmadan iletişim kurabiliyorsa, j elemanı i elemanına bitişik (adjacent) olarak tanımlanır. Şebekedeki elemanların bitişiklik durumu, $n \times n$ boyutundaki bitişiklik (adjacency) matrisi ile gösterilmektedir. Bu matris birbirine bitişik olan elemanlar için 1, diğerleri için 0 değerini almaktadır. Bir s-t yolu, girişten çıkışa uzanan yol olarak tanımlanmıştır. Girişten çıkışa giden (s-t) yolunun en kısa olanı en az bağ içeren yoldur ve en küçük s-t yolu olarak adlandırılmıştır. Şebekenin işlevsel olması kapsadığı alternatif yolların en az bir tane s-t yolu içermesine bağlıdır.

Genel olarak, düğümlerin göçme tehlikesinden uzak ve bağlardaki göçmenin istatistiksel olarak birbirlerinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır. Ancak, çalışmamızda düğümlerin de göçebileceği göz önünde tutulmuş ve Bölüm 3.2’de bu durumu yansıtan bir güvenirlilik hesaplaması yapılmıştır. En az bir s-t yolunu içeren olayların kümesine E dersek ve bu kümedeki olaylar ayrışık olacakları için şebekenin güvenirliliği, R_S , E kümesi içindeki olayların kalım olasılıklarının toplamına eşit olacaktır:

$$R_S = \sum_{i=1}^n Pr(E_i) \quad (15)$$

Benzer şekilde göçme olaylarını içeren ve olayların ayrışık olduğu bir F kümesi tanımlanabilir. Bilgisayar hesap işlemleri makul bir sürede bitmeyecek kadar büyük bir ağ göz önüne alırsa, zaman ve işlemden kazanmak amacı ile program k sayılı kalım ve h sayılı göçme olaylarını hesapladıktan ve ağ güvenirliliği için şu sınırları verdikten sonra durdurulabilir:

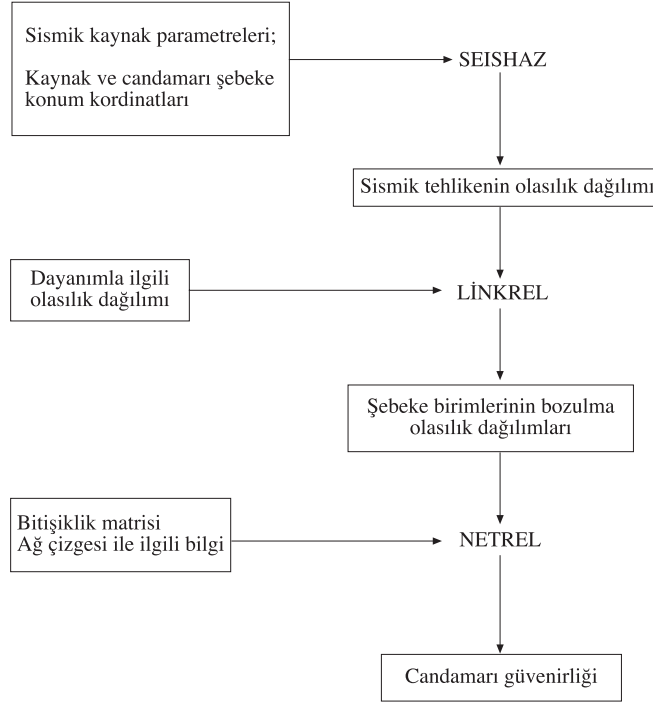
$$\sum_{i=1}^k Pr(E_i) \leq R \leq 1 - \sum_{i=1}^h Pr(F_i) \quad (16)$$

Burada E_i , E kümesindeki i sayılı kalım, F_i ’de F kümesindeki i sayılı göçme olaylarıdır. Mühendislik yapılarındaki elemanların kalım olasılıkları yüksek olduğu için genellikle alt ve üst sınırlar birbirlerine yakın olmaktadır.

LIFEPACK Yazılım Paketi

Yukarıda açıklanan modeller ve algoritmanın gerektirdiği sayısal hesaplamaları yapacak bilgisayar yazılımları hazırlanmış ve bir yazılım paketi haline getirilmiştir. Bu yazılım paketinin ilk ana programı olan ve SEISHAZ olarak adlandırılan yazılım, seçilen deprem şiddet parametresinin herhangi bir coğrafi noktadaki olasılık dağılımını hesaplamaktadır. Bu programın çıktısını bir ara

program aracılığıyla girdi olarak alan LINKREL yazılımı, candamarı şebekesini oluşturan elemanların güvenilirliğini, eleman dayanım olasılık dağılımını ve diğer varsayımları göz önünde tutarak hesaplamaktadır. Eleman güvenilirlik değerlerini girdi olarak alan NETREL yazılımı, Yoo ve Deo (1988) tarafından geliştirilen algoritmaya göre candamarı şebekesinin sistem güvenilirliğini hesaplamaktadır. LIFEPACK adı verilen bu yazılım paketinin akış şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. LIFEPACK yazılım paketi

Uygulamalar

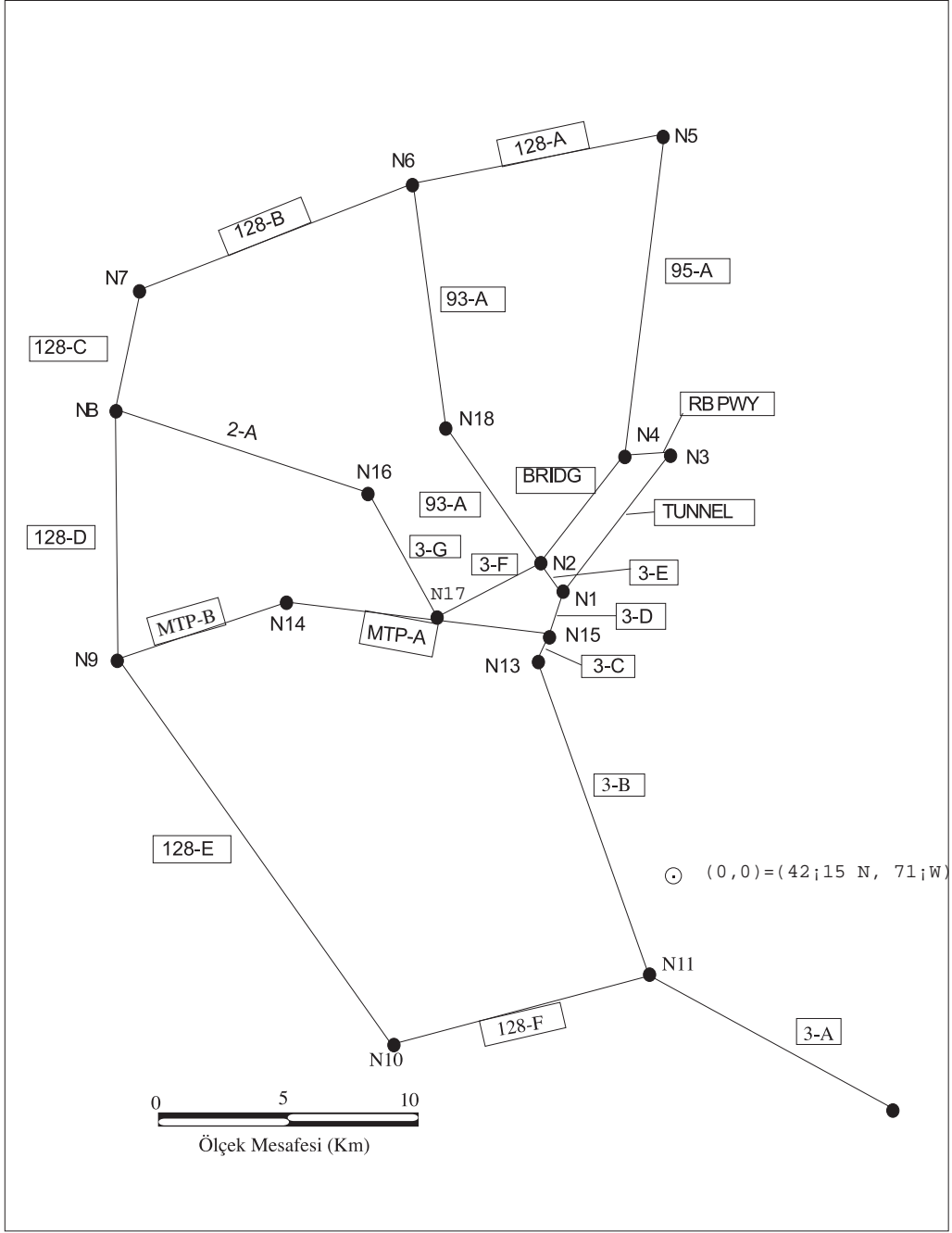
Önerilen yöntemin uygulamasını göstermek üzere iki örnek çalışmaya bu bölümde yer verilmiştir. Bu örnek çalışmalarda, şebeke güvenirliginin bulunması için gerekli sayısal hesaplamalar LIFEPACK yazılım paketi kullanılarak yapılmıştır.

Uygulama 1: Boston Şehri Ana Karayolları Şebekesinin Deprem Güvenirligi

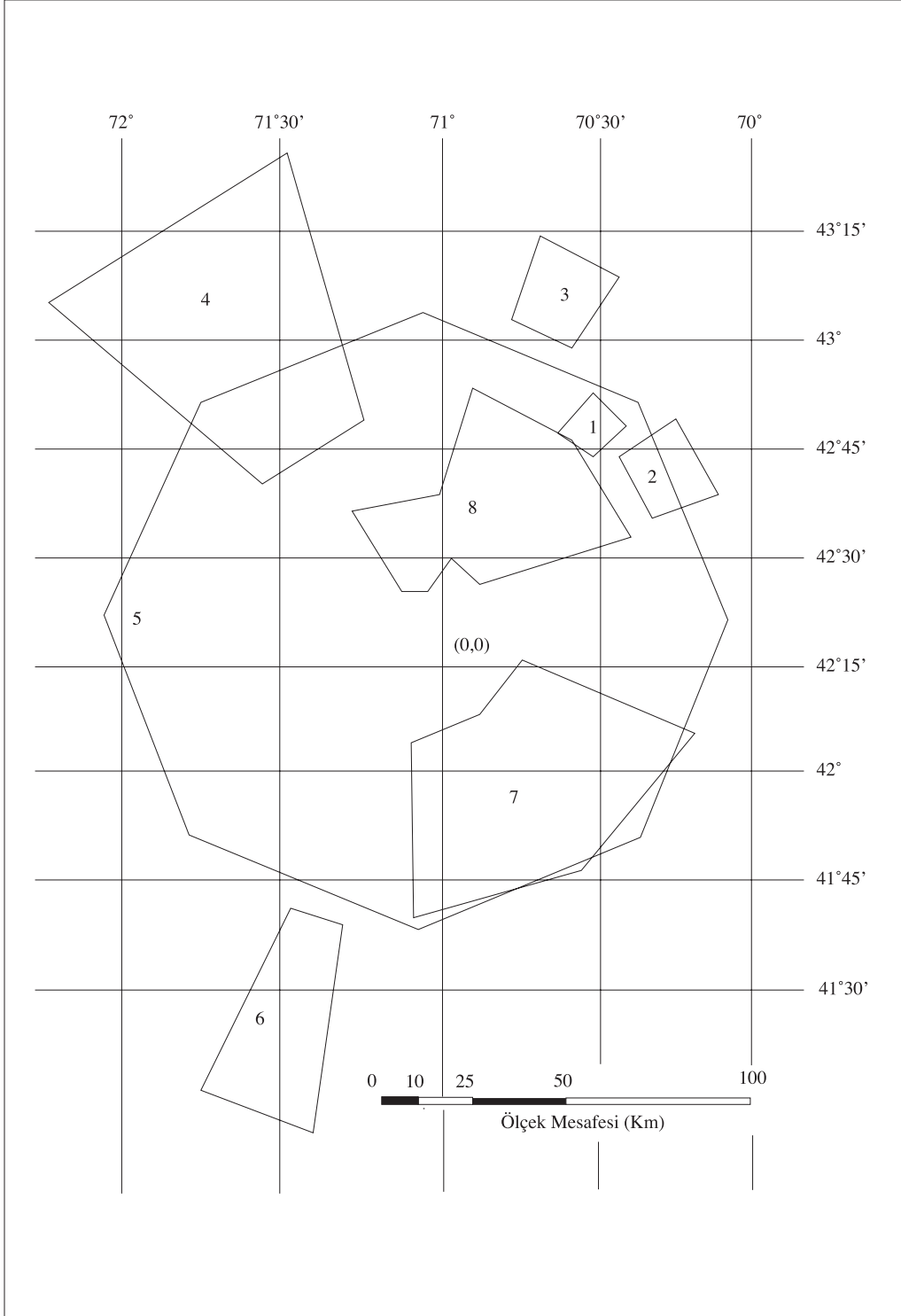
Boston şehri ve civarındaki ana karayollarının oluşturduğu candamarı şebekesinin sismik güvenirligi Panoussis (1974) ve Taleb-Agha (1977) tarafından incelenmiştir. Bu ulaşım sistemi, Şekil 2’de görüldüğü gibi 18 düğüm ve 23 bağdan oluşan bir ağ çizgesi şeklinde modellenmiştir.

Söz konusu çalışmalarda amaç, bir deprem sonrasında N1 düğümünden N5 düğümüne ulaşmak olarak saptanmıştır. Burada, aynı şebekenin deprem güvenirligi, önerdiğimiz yöntemle dayanılarak hesaplanacaktır.

Boston ve civarında deprem tehlikesi yaratabilecek sismik kaynaklar ve bu kaynaklar için geçerli olan sismik parametrelerin değerleri Cornell ve Merz (1975) tarafından belirlendiği gibi alınmıştır. Sismik kaynakların coğrafi konumu Şekil 3’de, sismik parametrelerin değerleri de Tablo 1’de gösterilmiştir. Çalışmamızda deprem şiddeti ve ulaşım sistemine gelen deprem etkisinin göstergesi olarak zemin ivmesi seçilmiştir. Cornell ve Merz (1975) tarafından bu bölge için önerilen şu azalım ilişkisi benimsenmiştir.



Şekil 2. Boston ve civarındaki ana karayolları ağ çizgesi (Taleb-Agha, 1977)



Şekil 3. Boston şehri etrafındaki sismik kaynak bölgeleri (Cornell ve Merz, 1975)

Tablo 1. Boston şehri etrafındaki sismik kaynak bölgelerine ait parametreler (Cornell ve Merz, 1975)

Kaynak No.	ν	β	m_0	m_1
1	0,0240	1,65	4,3	6,1
2	0,0080	1,65	4,3	6,8
3	0,0040	1,65	4,3	5,5
4	0,0280	1,65	4,3	5,9
5	0,0200	1,65	3,7	5,2
6	0,0125	1,65	4,3	5,5
7	0,0320	1,65	4,3	5,5
8	0,0375	1,65	4,3	5,9

Tablo 2. Nokta eleman modeline göre bağların güvenilirliği (Boston şehri)
(a) $\mu=0,075g$ deterministik dayanım modeli
(b) $\mu=0,100g$; $\sigma=0,002g$ Gauss dağılımlı dayanım modeli
(c) $\mu=0,075g$; $\sigma=0,002g$ Gauss dağılımlı dayanım modeli

Bağ No.	(a)	(b)	(c)
1	0,9790	0,9928	0,9450
2	0,9740	0,9928	0,9450
3	0,9620	0,9450	0,9450
4	0,9670	0,9928	0,9450
5	0,9505	0,9450	0,9450
6	0,9420	0,9450	0,9450
7	0,9560	0,9852	0,9450
8	0,9730	0,9928	0,9450
9	0,9850	0,9964	0,9780
10	0,9902	0,9929	0,9480
11	0,9870	0,9944	0,9870
12	0,9770	0,9928	0,9450
13	0,9740	0,9928	0,9460
14	0,9770	0,9928	0,9450
15	0,9740	0,9928	0,9450
16	0,9740	0,9928	0,9450
17	0,9910	0,9928	0,9450
18	0,9740	0,9928	0,9450
19	0,9670	0,9928	0,9450
20	0,9740	0,9928	0,9450
21	0,9860	0,9934	0,9525
22	0,9730	0,9928	0,9450
23	0,9545	0,9597	0,9450

$$Y = 5600e^{0,8m}(r + 40)^{-2} \quad (17)$$

Bu azalış ilişkisine ve sismik parametre değerlerine bağlı olarak Y'nin olasılık dağılımı herhangi bir noktada elde edilebilir. Burada ulaşım

şebekesinin deprem güvenilirliği “nokta eleman” ve “çoklu alt eleman” modellerine dayanılarak incelenecektir.

Nokta Eleman Modeline Göre Güvenirlik

Nokta eleman modelinde mekanda yayılı bir eleman sismik tehlikenin en fazla olduğu yerde bir nokta elemana dönüştürülmektedir. LIFEPACK yazılımının SEISHAZ alt programı ve Tablo 1'deki sismik parametre değerleri kullanılarak karayolu şebekesini oluşturan 23 bağın her biri için sismik tehlikenin en büyük olduğu nokta tespit edilmiş ve bu noktadaki en büyük zemin ivmesinin olasılık dağılımı bulunmuştur. Eleman güvenilirliğinin hesabında bu olasılık dağılımı sismik yükün olasılık dağılımı olarak alınmıştır.

Elemanlar için sismik yükün olasılık dağılımının elde edilmesinden sonra her eleman için sismik dayanımın saptanması gereklidir. Burada düğümlerin tam güvenilir olduğu varsayılmıştır. Bağların deprem etkisine olan dayanımları tek değerli (deterministik) ya da rassal olarak alınabilir. İlk olarak her bağın, Taleb-Agha (1977) tarafından belirlendiği gibi, 0,075g'lik bir yer ivmesi taşıyabilecek dayanıma sahip olduğu varsayılmıştır. Bağların güvenilirliği için elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. LIFEPACK yazılımı kullanılarak karayolu sisteminin bir yıllık güvenilirliği, R_S , için elde edilen alt ve üst sınır değerleri şöyledir:

$$0,999043 \leq R_S \leq 0,999045 \quad (18)$$

Taleb-Agha (1977) tarafından hesaplanan şebeke güvenilirlik değeri 0,999816'dır. Aynı şebeke, Panousis (1974) tarafından, bağ dayanımlarının ortalaması, $\mu=0,100g$ ve standard sapması, $\sigma=0,002g$ olan bir Gauss olasılık dağılımına sahip olmaları durumu için incelenmiştir. Çalışmamızda aynı değerler kullanılarak her bağın güvenilirliği hesaplanmış ve Tablo 2'de gösterilmiştir. LIFEPACK yazılımından, yıllık sistem güvenilirliği için şu değerler elde edilmiştir:

$$0,999746 \leq R_S \leq 0,999748 \quad (19)$$

Panousis (1974) söz konusu şebeke için güvenilirlik değerini 0,97807 olarak bulmuştur. Tek değerli ve rassal dayanım durumlarını karşılaştırmak amacıyla bağ dayanımının 0,075g ortalama değerli ve 0,002g standard sapmalı bir Gauss dağılımını gösterdiği durum için hesaplar tekrarlanmış ve elde edilen bağ güvenilirlik değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Bu değerlere dayanılarak candamarı şebekesinin yıllık güvenilirliği, R_S , LIFEPACK yazılımından

$$0,996252 \leq R_S \leq 0,996254 \quad (20)$$

olarak bulunmuştur.

Tablo 2 Nokta eleman modeline göre bağların güvenilirliği (Boston şehri) Görüldüğü gibi Denklem (18), (19) ve (20)'de elde edilen alt ve üst güvenilirlik sınırları birbirlerine çok yakındır. Bağ güvenilirliklerinin yüksek olması ve N1 ile N5 düğüm noktalarını birleştiren alternatif ulaşım yollarının çokluğu, candamarı şebekesinin sistem güvenilirliğinin de yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca, bağ dayanımlarının rassal değişken olarak alınması, tek değerli dayanım varsayımına göre daha düşük güvenilirlik değerleri vermektedir. Bu fark, dayanımdaki belirsizliklerin bir göstergesi olan dayanım standard sapmasının artması ile büyümektedir.

Çoklu Alt Eleman Modeline Göre Güvenirlik

Bu modelde bir eleman, dalgalanma ölçeği, λ boyunda alt elemanlara bölünmektedir. λ , bir eleman boyunca meydana gelecek göçme (bozulma, kırılma) olayları arasındaki bağımlılığı yansıtmaktadır. Dalgalanma ölçeği, Vanmarcke (1983) tarafından rassal süreçlerdeki bağımlılık yapısını modellemek için önerilmiş istatistiksel bir parametredir. Fiziksel olarak sismik dayanım ve yükün kuvvetli bağımlılık gösterdiği mesafeyi belirtmektedir. Çoklu alt eleman modelinde bir elemanın kalım olasılığı alt sınırı, (Denklem (12)) elemanın bölündüğü parça sayısına duyarlı olmaktadır. Bunun nedeni, alt güvenilirlik sınırının, alt elemanların bağımsız oldukları varsayımına göre alt elemanların güvenilirliklerinin çarpımına eşit olmasıdır. Elemanın bölündüğü parça sayısı arttıkça, eleman güvenilirliği, dolayısıyla da ağ güvenilirliği azalacaktır. Alt elemanların uzunluğunun λ 'ya eşit olduğu varsayılmış ve burada $\lambda=1,0$ km alınmıştır. Gerçekte λ 'nın sismik dayanım ve yüke ilişkin gözlenen verilere dayanılarak hesaplanması gerekir. Bağ dayanımı için ortalaması ve standard sapması sırası ile, 0,100g ve 0,002g olan Gauss dağılımı varsayımı altında ve $\lambda=1,0$ km alınarak her bağ için alt ve üst güvenilirlik sınırları hesaplanmış ve Tablo 3'de gösterilmiştir. Bu tabloda ayrıca her elemanın bölündüğü alt eleman sayısı da verilmiştir. Elemanlar için elde edilen güvenilirlik değerleri kullanılarak yıllık ağ güvenilirliği hesaplanmıştır. Alt elemanların tam bağımlılık

gösterdiği durumda ağ güvenilirliği

$$0,999767 \leq R_S \leq 0,999769 \quad (21)$$

bulunur. Tam bağımsızlık durumunda ise, alt ve üst güvenilirlik sınırları aynıdır ve $R_S=0,994130$ olur.

Eleman güvenilirliği için belirlenen üst sınır, alt elemanların göçmelerinin istatistiksel olarak tam bağımlı olduğu varsayımına dayanmakta ve elemanın bölündüğü alt eleman sayısından etkilenmemektedir. Buna karşılık alt sınırın bulunmasında, alt elemanların göçmelerinin istatistiksel olarak tam bağımsız oldukları varsayımı altında eleman güvenilirliği alt elemanların güvenilirliklerinin çarpımına eşitlenmektedir. Bu durumda da eleman güvenilirliği alt sınırı, elemanın bölündüğü alt eleman sayısına bağımlı olmaktadır. Şebekenin güvenilirliği eleman güvenilirliğinden bulunduğundan bu durum şebekenin güvenilirliğine de yansımaktadır.

Çalışmamızda, veri yetersizliği nedeni ile λ için istatistiksel bir değerlendirme yapılamamış ve $\lambda=1$ km olarak alınarak, her eleman bu uzunluktaki alt elemanlara bölünmüştür. Ancak karayolu şebekesinin güvenilirliğinin, elemanların bölündüğü alt eleman sayısına duyarlılığı incelenmiş ve duyarlılık analizi sonuçları Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu şekilde gözlemlendiği gibi alt elemanların göçmelerinin bağımlı olduğu varsayımına dayanan şebeke güvenilirliği üst sınırı, alt eleman sayısına göre değişmezlik gösterirken, bağımsızlık varsayımına göre hesaplanan şebeke güvenilirliği alt sınırı, elemanların bölündüğü parça sayısı arttıkça (λ azaldıkça) azalmaktadır.

Görüldüğü gibi nokta eleman modelinde şebekeyi oluşturan bağların (bu uygulamada karayollarının) uzunluğu, şebeke güvenilirliğine yansımaz iken, çoklu alt eleman modelinde şebeke elemanlarının uzunluğu güvenilirlik alt sınırını etkileyen önemli bir parametre olmaktadır.

Uygulama 2: Türkiye Doğal Gaz İletim Boru Hattı

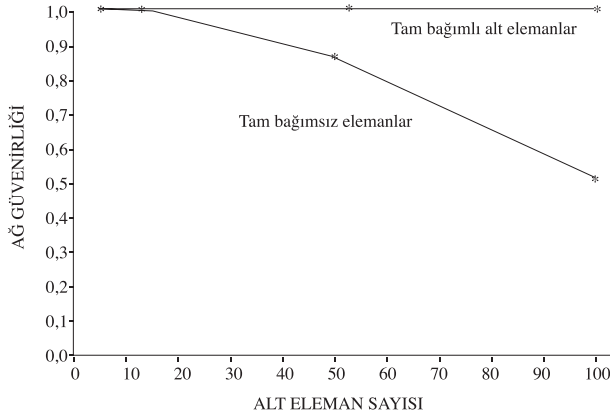
Boru hatları yer altında veya yüzeyinde inşa edilmiş olan sıvı ve gaz gibi akışkan maddelerin güvenlik içersinde bir yerden bir yere iletimini sağlayan sistemlerdir. Boru hatlarının dayanımları kendisini oluşturan malzemelerin yanısıra üzerinde bulunduğu zeminin özelliklerine ve inşaat koşullarına da bağlıdır. Su, doğal gaz ve petrol, boru hatlarıyla taşınan başlıca maddeler olup özellikle doğal gaz ve petrol gibi yanıcı ve hasar verici özelliğe sahip maddelerin taşınması çok güvenilir sistemlerin oluşturulmasını gerektirmektedir. Su dağıtım

sistemlerinin ise deprem sonrası meydana gelecek yangınların söndürülmesi için işlevini sürdürebilmesi ve su iletiminin kesintisiz olması hayati önem

taşımaktadır. Bu özelliklerinden dolayı boru hatlarının güvenilir bir şebeke sistemi oluşturmaları gerekir.

Tablo 3. Çoklu alt eleman modeline göre bağların güvenirliliği (Boston şehri. Dayanım: Gauss; $\mu=0,100g$, $\sigma=0,002g$, $\lambda=1$ km)

Bağ No.	Alt Eleman Sayısı Sınırı	Alt Güvenirlilik Sınırı	Üst Güvenirlilik
1	1	0,983408	0,983408
2	6	0,893698	0,979483
3	2	0,958561	0,978918
4	6	0,894503	0,979806
5	12	0,718041	0,966141
6	10	0,724698	0,965960
7	11	0,772973	0,971835
8	3	0,950841	0,982621
9	10	0,877166	0,985308
10	18	0,824663	0,988793
11	10	0,884775	0,986523
12	11	0,842944	0,982293
13	12	0,849386	0,985445
14	1	0,984963	0,984963
15	1	0,984204	0,984204
16	4	0,941332	0,984761
17	6	0,917925	0,985360
18	3	0,954097	0,983878
19	6	0,895446	0,980076
20	5	0,923288	0,983235
21	6	0,928571	0,986777
22	10	0,849054	0,982914
23	9	0,798638	0,971619



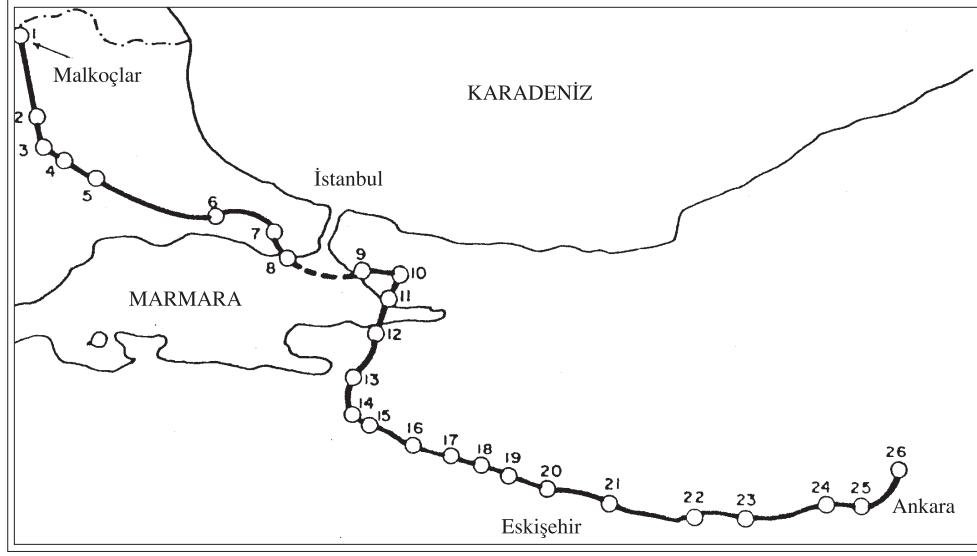
Şekil 4. Duyarlılık analizi

Son yıllarda Türkiye'deki alternatif enerji kaynağı olarak önem kazanan doğal gaz dünyanın %75'lik üretimini oluşturan Sovyetler Birliğinden ve Bulgaristan üzerinden ithal edilmektedir. Boru hattı Bulgaristan-Türkiye sınırındaki Malkoçlar mevkinden başlayıp Ankara-Yaprıcık kadar ulaşmaktadır. Doğal gaz boru hattında taşıyıcı boruların yanısıra ana merkez (Yaprıcık) tarafından kontrol edilebilen hat vanaları, pig istasyonları ve basınç düşürme istasyonları bulunmaktadır (Ceza-yirlioğlu, 1993).

Bu çalışmada, doğal gaz boru hattı bir ağ çizgesi şeklinde modellenmiş ve sistemin beklenmedik bir depreme karşı kalım olasılığı hesaplanmıştır. Şekil 5'de doğal gaz boru hattının yaklaşık konumu gösterilmektedir. Seri olarak modellenen şebekede 25 bağ ve 26 düğüm bulunmaktadır. Bu boru

hattında doğal gaz taşımacılığı, ithali ve ticareti ile ilgili tüm işlemler BOTAS'ın sorumluluğunda yürütülmektedir. Şekil 5'de gösterilen doğal gaz

boru hattı 1992 yılındaki durumu yansıtmakta olup, gerekli veriler BOTAS Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir (BOTAS, 1991; Cezayirlioğlu, 1993).



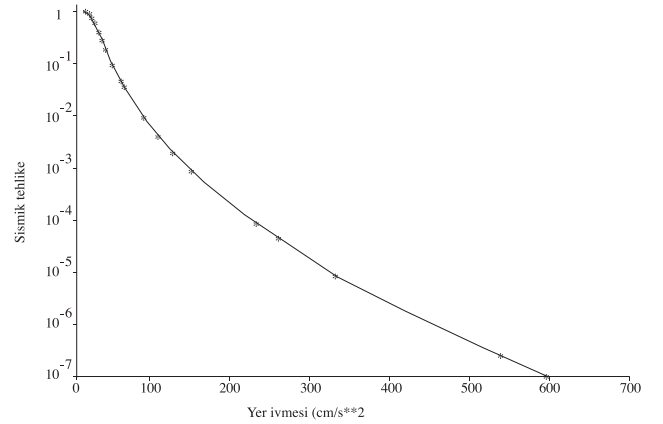
Şekil 5. Botaş doğal gaz iletim boru hattındaki bağların yaklaşık konumu

Boru hattının maruz kalabileceği deprem yükünün tahmini için Gülkan v.d. (1993) tarafından yapılan çalışmada Türkiye için ön görülen sismik kaynak bölgeleri ve bu bölgeler için tayin edilen sismik parametre değerleri aynen alınmış ve Denklem (17)'de verilen azalım ilişkisi kullanılmıştır.

Seri bir sistem oluşturan doğal gaz boru hattında seçilen herhangi iki düğüm arasında iletişim sağlanması olasılığını (şebeke güvenilirliği) bulmak mümkündür. Ancak, burada tüm dağıtım hattı göz önünde tutularak, bir deprem sırasında şebekenin giriş düğümü olarak kabul edilen Malkoçlar (1. düğüm) ile çıkış düğümünü oluşturan Yaprıcak (26. düğüm) arasında, doğal gaz iletiminin çevreye bir zarar vermeden devam etme durumu incelenmiş ve bu durumun olasılığı doğal gaz boru iletim hattının güvenilirliği olarak tanımlanmıştır.

Boru hattı üzerindeki vanalar, pig istasyonları, kompresör ve basınç düşürme istasyonları düğüm noktaları olarak alınmış ve bunların tam güvenilir oldukları varsayılmıştır. LIFEPACK yazılımının SEISHAZ alt programı, Gülkan v.d. (1993) tarafından belirlenen sismik kaynak bölgeleri ve bu bölgeler ile ilgili sismik parametre değerleri kullanılarak sismik tehlike analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda, sistemin bağlarını oluşturan 25 taşıyıcı boru hattı için nokta eleman modelinin gerektirdiği sismik yükün (en büyük zemin ivmesi için) olasılık

dağılımı bulunmuştur. Bir fikir vermesi amacı ile bu dağıtım hattının sonuncu (Bağ 25) bağı için bulunan olasılık dağılımı (yıllık sismik tehlike değerleri) Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yirmibeş numaralı bağ için yıllık sismik tehlike

Taşıyıcı boruların deprem yüküne dayanımı ile ilgili bir bilgi BOTAS'dan elde edilememiştir. Ayrıca boruların deprem yüküne olan dayanımı ile ilgili bir analiz bu araştırmanın kapsamı dışındadır. Bu nedenle boru hattını oluşturan bağların deprem yüküne karşı dayanımlarının bir Gauss dağılımı

gösterdiği varsayılmış ve değişim katsayısı (d.k.) 0,20 olarak alınmıştır. Dayanım ile ilgili yukarıda söz konusu edilen bilgi eksikliği nedeni ile ortalama dayanımın 0,250g ve 0,500g olduğu iki değişik durum göz önünde tutulmuştur. Bu iki duruma göre doğal gaz hattını oluşturan 25 bağ için dep-

rem güvenirligi nokta eleman yöntemine göre hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4'de sunulmuştur. Eleman güvenirliliklerinden, tüm boru hattı için hesaplanan ağ güvenirligi alt ve üst sınırları, dayanım ile ilgili bu iki varsayım için, Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Nokta eleman modeline göre bağların güvenirlikleri (Doğal gaz iletim boru hattı. Dayanım: Gauss; d.k.=0,20)

Bağ No.	$\mu=0,25g, \sigma=0,05g$	$\mu=0,50g, \sigma=0,10g$
1	0,999909	0,999997
2	0,999642	0,999986
3	0,999454	0,999975
4	0,999128	0,999952
5	0,998161	0,999863
6	0,994063	0,999255
7	0,989957	0,998438
8	0,988811	0,998179
9	0,983807	0,997020
10	0,980149	0,996202
11	0,977184	0,995580
12	0,976111	0,995384
13	0,979401	0,996139
14	0,983741	0,997305
15	0,988484	0,998534
16	0,991831	0,999221
17	0,992955	0,999392
18	0,994289	0,999576
19	0,995342	0,999675
20	0,996228	0,999767
21	0,996534	0,999796
22	0,996852	0,999812
23	0,999142	0,999968
24	0,999705	0,999992
25	0,999744	0,999993

Tablo 5. Değişik varsayımlara göre doğal gaz iletim boru hattı için hesaplanan güvenirlilik sınırları (Dayanım: Gauss; d.k.=0,20)

Boru hattı güvenirlilik sınırları		
Model/Varsayım	$\mu=0,25g, \sigma=0,05g$	$\mu=0,50g, \sigma=0,10g$
Nokta Eleman	$0,817984 \leq R_s \leq 0,976112$	$0,969428 \leq R_s \leq 0,995384$
Çoklu Alt Eleman:		
Üst Sımra Göre	$0,796022 \leq R_s \leq 0,976069$	$0,964367 \leq R_s \leq 0,995373$
Alt Sımra Göre	$0,014832 \leq R_s \leq 0,413546$	$0,527989 \leq R_s \leq 0,844690$

Yukarıda bulunan değerler elemanların deprem güvenirliginin nokta eleman modeline göre hesaplandığı durum için geçerlidir. Çoklu alt eleman modeline göre ve $\lambda=1,0$ km alındığında doğal gaz boru hattını oluşturan bağlar için bulunan alt ve üst güvenirlilik sınırları, Tablo 6'da değişik μ ve σ

değerleri için sunulmuştur. Çoklu alt eleman modeline göre doğal gaz iletim boru hattı için bulunan alt ve üst güvenirlilik sınırları bir karşılaştırma yapmak amacı ile Tablo 5'de gösterilmiştir. Burada iki değişik sonuç elde edilmesinin nedeni, elemanlar için

hesaplanan alt ve üst güvenilirlik sınırlarının (Tablo 6) ikisinin de göz önünde tutulmasıdır.

Doğalgaz boru hattının güvenilirlik açısından bir seri sistem oluşturması, diğer bir deyimle giriş düğümünden (1. düğüm), çıkış düğümüne (26. düğüm) ulaşılacak tek bir yolun bulunması nedeniyle, ağ güvenilirlik alt sınırları bağ dayanımlarının düşük olduğu durum ($\mu=0,25g$) için küçük çıkmıştır.

Yukarıdaki hesaplamalarda düğümlerin tam güvenilir olduğu varsayılmıştır. Eğer düğüm noktalarında yer alan vanalar, pig istasyonları, kompresör ve basınç düşürme istasyonları gibi elemanların güvenilirlikleri 1,0'den farklı ise bu durum doğrudan hesaplara yansıtılabilir. Örneğin tüm düğüm noktalarındaki elemanların güvenilirlikleri 0,999 olarak alınırsa, çoklu alt eleman modeline göre (dayanım: Gauss; $\mu=0,50g$ $\sigma=0,10g$) doğal gaz iletim boru hattı

için (eleman güvenilirliği üst sınırları kullanılarak) şu güvenilirlik sınırları elde edilir:

$$0,939604 \leq R_S \leq 0,995373 \quad (22)$$

Mühendislik yapılarında genellikle kabul edilebilir risk (yıllık göçme olasılığı) düzeyi 10^{-3} - 10^{-6} mertebelerinde olduğundan, her iki örnek çalışmada da eleman ve şebeke güvenilirlik değerleri noktadan sonra altı haneli olarak verilmiştir. Bu, değişik varsayımlar altında ortaya çıkan sonuçları daha ayrıntılı bir biçimde karşılaştırmaya da olanak sağlamaktadır. Ayrıca, seçenek şebeke tasarımlarının beklenen yitim açısından değerlendirilmesinde, göçme olasılıkları yüksek parasal değerlerle ($>10^{10}$ gibi) çarpılacağından, göçme olasılıklarının, göreceli de olsa, 10^{-6} ve daha küçük düzeylerde hesaplanması gerekmektedir.

Tablo 6. Çoklu alt eleman modeline göre bağların güvenilirlikleri (Doğal gaz iletim boru hattı. Dayanım: Gauss; d.k. =0,20, $\lambda=1$ km)

Eleman Güvenirliği					
		$\mu=0,25g, \sigma=0,05g$		$\mu=0,50g, \sigma=0,10g$	
Bağ No.	Alt Eleman Sayısı	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır
1	47	0,994792	0,999729	0,999836	0,999990
2	11	0,996027	0,999549	0,999840	0,999980
3	8	0,995619	0,999366	0,999796	0,999969
4	20	0,982326	0,998845	0,998993	0,999928
5	79	0,860913	0,997181	0,988523	0,999746
6	31	0,818131	0,988143	0,973198	0,998035
7	19	0,824913	0,987999	0,970517	0,998003
8	49	0,570986	0,986225	0,912748	0,997596
9	11	0,835123	0,982684	0,967588	0,966762
10	15	0,741773	0,978610	0,944938	0,995867
11	11	0,776354	0,976508	0,952564	0,995439
12	37	0,413546	0,976069	0,844690	0,995373
13	18	0,689728	0,977392	0,993699	0,995662
14	8	0,877662	0,982708	0,978798	0,997008
15	20	0,791139	0,985427	0,970147	0,997770
16	12	0,906051	0,990980	0,990625	0,999067
17	10	0,931805	0,992681	0,993942	0,999360
18	17	0,906698	0,993376	0,992648	0,999441
19	17	0,923354	0,994734	0,994451	0,999614
20	23	0,915610	0,995610	0,994540	0,999731
21	45	0,857644	0,996305	0,990992	0,999778
22	22	0,993470	0,996755	0,995907	0,999808
23	44	0,950519	0,997271	0,997607	0,999838
24	18	0,994625	0,999617	0,999850	0,999989
25	41	0,989132	0,999652	0,999708	0,999991

Genellikle, yıllık güvenilirlik ya da yıllık göçme olasılığı güvenilirlik analizlerinde yeterli olmakla birlikte, sistemin ekonomik ömrü boyunca ortaya çıkacak güvenilirliğin de bilinmesi yararlı olmaktadır. Yıllık güvenilirlik değerinden (R_S), genellikle 50 yıl olarak alınan ekonomik ömür için, ortaya çıkan güvenilirlik, şu ilişkiden hesaplanacaktır:

$$R_{S_{50}} = R_S^{50} \quad (23)$$

Örneğin, Boston şehri karayolu şebekesi için çoklu alt eleman modeline göre ve alt elemanların tam bağımsız olduğu durumda yıllık ağ güvenilirliği 0,994130 bulunmuştur. Bu şebekenin, söz konusu varsayımlar altında ve 50 yıllık ekonomik ömrü boyunca güvenilirliği, $R_{S_{50}} = (0,994130)^{50} = 0,745005$, göçme olasılığı da 0,254995 olur.

Özet ve Sonuçlar

Bu çalışmada candamarı şebekelerinin deprem güvenilirliğini istatistiksel yöntemlerle tahmin etmek üzere kapsamlı bir model geliştirilmiştir. Sismik tehlikenin bulunmasında “klasik” sismik tehlike analiz modeli (Cornell, 1968) temel alınmış, ancak bu model azalım ilişkisine ve sismik etkinlik parametrelerinin tahminine ilişkin belirsizliklerin sonuçlara yansıtılması yönünde geliştirilmiştir. Elemanların güvenilirliğinden tüm şebekenin güvenilirliğinin bulunması için şebeke eşdeğer bir ağa dönüştürülmekte ve ortaya çıkan ağ ile ilgili güvenilirlik analizi Yoo ve Deo (1988) tarafından önerilen algoritma kullanılarak yapılmaktadır. Bu algoritma bilgisayar hesap süresi ve bellek gereksinimleri bakımından etkin olduğu için tercih edilmiştir.

Mekanda yayılı candamarı şebekelerinin depreme karşı ağ güvenilirliğinin değerlendirilmesi için önerilen modelin ve geliştirilen algoritmanın gerektirdiği sayısal hesaplamaların gerçekleştirilmesi için LIFEPACK adı verilen bir yazılım paketi hazırlanmış ve gerçek verilere dayanan iki ayrıntılı örnek makalede sunulmuştur.

Çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar ve sunulan öneriler şöyledir:

(1) Candamarı şebekelerini deprem etkilerinden zararsız ya da az zararlı kurtarma çalışmalarının başlangıç noktası bu şebekelerin sismik güvenilirliğini değerlendirmek ve yeterli güvenilirliğin sağlanmadığı durumlarda yeni bağlar ekleyerek ya da mevcut elemanları takviye ederek güvenilirliği istenilen düzeye çıkartmaktır.

(2) Candamarı şebekelerinin deprem

güvenirliğinin olasılık cinsinden ifade edilmesi güvenilirlik artırmaya yönelik seçeneklerin karşılaştırılmasını, karar kuramı yöntemlerinden yararlanılarak maliyet/yarar analizlerinin yapılmasını sağladığı gibi, mevcut ya da yeniden inşa edilecek şebekelerin güvenilirlik düzeyini, görelide olsa, niceliksel olarak ortaya koymaktadır.

(3) Şebeke güvenilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan algoritmanın ağ güvenilirliği için verdiği alt ve üst güvenilirlik sınırları birbirine çok yakın çıkmaktadır. Boston şehri karayolları uygulamasında açıkça gözlenen bu durum algoritmanın etkinliğini göstermektedir.

(4) Bağ dayanımlarının rassal değişken olarak alınması, tek değerli (deterministik) dayanım varsayımına göre düşük güvenilirlik değeri vermektedir. Bu fark dayanımdaki belirsizliklerin göstergesi olan dayanım standard sapmasının veya değişkenlik katasayısının artması ile büyümektedir.

(5) Göçme olaylarının mekanda gösterdiği bağımlılık şebeke güvenilirliğini etkilemektedir. Çalışmada bir elemanın değişik noktalarında meydana gelebilecek göçme olayları arasındaki bağımlılık göz önünde tutulmuş, elemanlar arasındaki bağımlılık ise ihmal edilmiştir. Mekansal bağımlılığın ölçüsü olarak dalgalanma ölçeği benimsenmiş ve mekansal korelasyonun eleman güvenilirliğine etkisi geliştirilen çoklu alt eleman modeli ile analize yansıtılmıştır. Bu modele göre eleman güvenilirliği, (sistem güvenilirliği prensipleri ile de uyumlu olarak) eleman uzunluğuna bağlı olmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda, eleman boyunca ve elemanlar arasındaki mekansal bağımlılığın daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve sayısal olarak değerlendirilmesi gerekir.

(6) Araştırmanın kapsamı dışında olması nedeni ile bu makalede şebeke elemanlarının dayanımları ile ilgili ayrıntılı bir çalışma yapılmamış ve daha çok deprem yükünün olasılık dağılımının (sismik tehlike) elde edilmesi üzerinde durulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda, boru ve karayolu gibi eksenel boyutları fazla olan şebeke elemanlarının, kırılma (fracture), zemin sıvılaşması (soil liquefaction), farklı oturma (differential settlement) gibi değişik göçme biçimindeki dayanımlarının modellenmesi, parametrelere ilişkin belirsizliklerin tahmin edilmesi ve olasılık dağılımlarının çıkartılması gereklidir.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) desteklediği INTAG 522 kodlu proje çerçevesinde yürütülmüştür. Yazarlar bu destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederler. Sayısal sonuçların bulunmasında ODTÜ-AFP 93-03-03-02 kodlu proje kapsamında temin edilen bilgisayar donanımları kullanılmıştır.

Semboller

a	mekansal korelasyon parametresi
β	magnitüd-sıklık ilişkisinin eğimi
D	sismik dayanım (kapasite)
Δ	ortalama uzaklık
E	en az bir s-t yolunu içeren ayrışık olayların kümesi
$f(.)$	olasılık yoğunluk fonksiyonu
F	göçme olaylarını içeren ayrışık küme
$F(.)$	birikimli olasılık fonksiyonu
λ	dalgalanma ölçeği
m	deprem magnitüdü
m_i	i=0 alt sınır deprem magnitüdü; i=1 üst sınır deprem magnitüdü
M	deprem magnitüdü rassal değişkeni

μ	ortalama değer
N_i	i numaralı düğüm
ν	yıllık ortalama deprem sayısı
P_f	eleman göçme olasılığı
P_{fi}	i sayılı alt elemanın göçme olasılığı
P_{si}	sayılı alt elemanın kalım olasılığı
P_s	eleman kalım olasılığı (güvenirlilik)
r	odak uzaklığı
R	odak uzaklığını tanımlayan rassal değişken
R_S	güvenirlilik
R_i	i numaralı bağın güvenirliliği
$\rho(.)$	mekansal korelasyon
s	kaynak düğümü
S	sismik yük (talep)
σ	standard sapma
t	çıkış düğümü
y	zemin ivmesi
Y	zemin ivmesi rassal değişkeni
z	alt eleman sayısı
d.k.	değişkenlik katsayısı

Kaynaklar

Ang, A.H-S ve Tang, W.H., Probability Concepts in Engineering, Planning and Design-Volume II: Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons Inc., New York,1984.

Aydınoğlu, M.N. ve Erdik, M., 17 Ocak 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) Depremi Gözlem ve Değerlendirme Raporu, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, 1995.

Barlow, R.E., Der Kiureghian A. ve Satyanayarana A., New Methodologies for Analyzing Pipelines and Other Lifeline Networks Relative to Seismic Risk, ORC 80-5, University of California, Berkeley, 1980.

BOTAŞ Yıllık Rapor, Ankara, 1991.

Cezayirlioğlu, V., Kişisel görüşme, BOTAŞ Genel Müdürlüğü, Ankara, 1993.

Cornell, C.A., "Engineering Seismic Risk Analysis", Bull. Seism. Soc. Am., 54, 1583-1606, 1968.

Cornell, C.A. ve Merz, H.A., "A Seismic Risk Analysis of Boston", Journal of Structural Division of ASCE 101, 2027-2043, 1975.

Gülkan, P., Yücemen, M.S., Koçyiğit, A., Doyuran, V. ve Başöz, N., "En Son Verilere Göre Hazırlanan

Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası", ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor No. 93.1, Ankara, 1993.

Katayama, T., "Recent Developments in Lifeline Earthquake Engineering", Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, 6575-6581, 1994.

Moghtaderizadeh, M., Wood, R.K., Der Kiureghian, A. ve Barlow, R., "Seismic Reliability of Lifeline Networks", Journal of the Technical Councils of ASCE 108, TC1, 60-78, 1982.

Panoussis, G., "Seismic Reliability of Lifeline Networks", SDDA Report No. 15, MIT Dept. of Civil Eng. Rept. R74-57, Cambridge, U.S.A, 1974.

Sankur, B. ve Kalyoncu, H., "İletişim Ağlarının Kalımlılık Analizi", 1989.

Sato, T. ve Toki, K., "Seismic Reliability Analyses of Large Scale Lifeline Networks Taking into Account the Failure Probability of the Components", Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, 5591-5596, 1994.

Selçuk, A. S., "A Probabilistic Model for the Evaluation of Reliability of Lifeline Networks Under Seis-

mic Hazard”, Dept. of Statistics, METU, Doktora Tezi, 1996.

Selçuk, A. S. ve Yüçemen, M. S., A Probabilistic Model for the Evaluation of Reliability of Lifeline Networks Under Seismic Hazard, Earthquake Engineering Research Center, Report No: METU/EERC 96-03, 1996.

Taleb-Agha, G., “Seismic Risk Analysis of Lifeline Networks”, Bull. Seism. Soc. Am. 67, 1625-1645, 1977.

Vanmarcke, E.H., “Random Fields: Analysis and Synthesis”, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.

Yoo, Y.B. ve Deo, N., “A Comparison of Algorithms for Terminal Pair Reliability”, IEEE, Transactions on Reliability, 37, 210-215, 1988.

Yüçemen, M.S., “Yapı Sistemlerinde Güvenirlilik Değerlendirilmesi”, Uygulamalı İstatistik Seminer

Bildirileri, Gelişme Dergisi, Özel Sayı, 269-305, 1977.

Yüçemen, M.S., Sismik Risk Analizi, ODTÜ, İdari İlimler Fak. Yayın No:41, 1982.

Yüçemen, M.S., “Candamarı Şebekelerinin Deprem Güvenirliliği”, Birinci Ulusal İnşaat ve Çevre Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Celal Bayar Üniversitesi, Salihli, 27-38,1994.

Yüçemen, M.S. ve Selçuk, A.S., “Earthquake Reliability of Lifeline Networks”, Proceedings, Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Chicago 4, 809-818, 1994.

Yüçemen, M.S. ve Selçuk, A.S., Mekanda Yayılı Entekonekte Sistemlerin Deprem Güvenirliliği, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Rapor No: INTAG-522 1996.