1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı
11-14 Ekim 2011 – ODTÜ – ANKARA

OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ: GENEL BAKIŞ VE İSTATİSTİKSEL MODELLEMEDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKLİ HUSUSLAR

M.S. Yücemen

Profesör, İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Deprem Çalışmaları EABD, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
Email: yucemen@metu.edu.tr

ÖZET:

Sismik tehlike analizindeki aşamaların her birinin içerdiği rassal değişkenliklerden ve bilgi eksikliğinden kaynaklanan belirsizliklerin göz önünde bulundurulabilmesi için mutlaka olasılık ve istatistik yöntemlerinin kullanılması gerekir. Ancak bu yöntemler, çoğunlukla, eldeki verilerin ve fiziksel olayların uygulanan stokastik modellere uyumları kontrol edilmeden kullanılmaktadır. Böyle bir yaklaşım hatalı sonuçlara yol açabilmekte, çoğu kez de uygulayıcılar bu durumun farkında olmamaktadır. Son yıllarda aktif faylardan kaynaklanan sismik tehlikenin tahmini önem kazanmıştır. Faylar üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı çalışmalar neticesinde fayların ana özelliklerine ait elde edilen bilgiler ve verilerin de bunda önemli bir katkısı olmuştur. Yeni nesil sismik tehlike haritalarının hazırlanmasında aktif faylardan kaynaklanan sismik tehlike özellikle dikkate alınmalı ve faylarla ilgili mevcut bilgilerle uyumlu stokastik modeller kullanılmalıdır. Bu bildiride sismik tehlike analizinin temelini oluşturan modeller özetlenerek, özellikle aktif faylara ağırlık verilerek geliştirilecek olan yeni nesil sismik tehlike haritalarının oluşturulmasında kullanılacak stokastik modeller üzerinde durulmuş ve yukarıda sözü edilen muhtemel hatalı uygulamalara dikkat çekilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : Aktif fay, magnitüd-tekerrür ilişkisi, olasılıksal sismik tehlike analizi, ortogonal regresyon, uyarlanmış en çok olabilirlik, yinelenme modeli

1. GİRİŞ

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 için beklenebilecek en büyük değerlerin saptanmasıdır. İncelenen alandaki zemin titreşimlerinin özelliklerini yansıtan ivme, hız, yer değiştirme ve spektral ivme gibi parametrelere zemin ya da yer hareketi parametreleri denilmiştir. 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, olasılılık 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 şeklinde olacaktır.

Sismik tehlike, zemin hareketi veya deprem büyüklüğüne ilişkin bir parametrenin inşaat sahasındaki değerinin, öngörülen süre içinde belirli bir düzeyi aşma olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Bu sürenin bir yıl olarak alındığı durumda bulunan (yıllık) aşma olasılığı, yıllık sismik tehlike olarak adlandırılmıştır. Örneğin, incelenen

parametre inşaat sahasında oluşacak en büyük zemin ivmesi, Y ise ve göz önünde tutulan ivme düzeyi de y ile simgelenmişse, yıllık sismik tehlike, $p_1=Pr(Y \geq y)$ şeklindedir. Diğer bir deyimle, y düzeyindeki bir zemin ivmesine dayanacak biçimde inşa edilmiş bir yapının, bir yıl içinde, deprem nedeni ile daha büyük zemin ivmelerine maruz kalma olasılığı p_1'dir. Burada, Pr(.) olasılığı simgelemektedir. Diğer bazı doğal afetlerde (sel, kasırga gibi) olduğu üzere, deprem tehlikesi, yıllık aşma olasılığının tersi olan ortalama tekerrür süresi ile de belirtilebilir. Ortalama tekerrür süresi, yıl cinsinden, $1/p_1$'e eşittir.

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

Nükleer güç santralları, barajlar, hastaneler, köprüler ve yüksek binalar gibi bir deprem sırasında hasar görmeleri büyük kayıplara ve felaketlere yol açabilecek önemli mühendislik yapıları için dikkatli ve ayrıntılı bir sismik tehlike analizi gereklidir. Buna karşın, olağan yapıların her biri için ayrıntılı bir sismik tehlike analizinin yapılması pratik olmayacaktır. Onun yerine, bu yapıların projelendirilmesinde kullanılmak üzere bölgesel sismik tehlike haritaları oluşturulabilir. Bir bölge için, o bölgeyi tarayan bir ağın düğüm noktalarında yapılan ayrıntılı sismik tehlike çalışmaları sonucunda, değişik zaman süreleri ve değişik olasılık düzeylerine ilişkin bir zemin hareketi parametresinin eş değerlerini gösteren eğriler elde edilir. Örneğin, eğer zemin hareketi parametresi olarak ivme seçilirse, belirli bir süre ve aşma olasılığına karşı gelen bu eğrilere eş-ivme haritaları denilmektedir. Bu tür haritalar olağan yapıların projelendirilmesinde, sismik yüklerin saptanmasına yardımcı olacaktır. Türkiye çapında gerçekleştirilen böyle bir çalışma sonucunda, ülkemizde halen geçerli olan Deprem Bölgeleri Haritasının oluşturulmasına esas teşkil eden sismik tehlike haritası elde edilmiştir (Gülkan, v.d. 1993).

Burada, deprem tehlikesinin belirlenmesi için yaygın bir biçimde kullanılan alternatif olasılık ve istatistik yöntem ve modelleri sunulmuştur. Esas amaç, sismik tehlike analizine ilişkin istatistiksel yöntemlerin yapı mühendislerine tanıtılması ve yaygın bir biçimde kullanılmasının sağlanması olduğu için, çalışmanın teorik yanı oldukça basit düzeyde tutulmuştur. Bu yöntemler kullanılırken sağlanması gereken varsayımların geçerliliği nadiren kontrol edildiği ve bunun da yanlış sonuçlara yol açabildiği göz önünde tutularak, bu tür hatalar üzerinde de ayrıca durulmuştur.

2. OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ (OSTA)

Olasılıksal sismik tehlike analizinin çıktısı, gözönünde tutulan bir noktadaki belirli bir zemin hareketi değişkeninin ya da deprem şiddetinin olasılık dağılımıdır. Belirli bir inşaat sahasındaki sismik tehlikenin belirlenmesi için uygulanacak olan olasılıksal sismik tehlike analizi (OSTA) disiplinlerarası bir çalışmayı gerektirmektedir ve bu amaçla yürütülecek olan çalışmanın başlıca aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

(i) Etkilenme alanının tespiti ve bu alanda geçmişte meydana gelmiş depremlerle ilgili bilgileri içeren deprem kataloglarından yararlanarak bir sismik veri tabanının hazırlanması ve gerekli değişiklikleri ve ayarlamaları yaparak bu veri tabanının yeknesak ve yansız olmasının sağlanması.

(ii) İncelenen bölgede alansal ve çizgisel sismik kaynakların tanımlanması. Aktif fay haritasının hazırlanması ve tanımlanan fayların özelliklerini ifade eden parametrelerin değerlerinin belirlenmesi.

(iii) Deprem merkez-üstlerinin konumlarını ve bunların belirlenen aktif faylar ile ilişkilerini incelemek üzere bir sismotektonik haritanın çizilmesi. Sismik veri tabanında yer alan depremlerin merkez-üstlerinin konumuna göre sismik kaynaklara dağıtılması ve buna bağlı olarak da her sismik kaynak için elde edilecek magnitüd-tekerrür ilişkisine göre magnitüd için bir olasılık dağılımının çıkartılması ve diğer sismisite parametrelerinin değerlerinin saptanması. Belirlenen sismik kaynakların hiçbiri ile ilişkilendirilemeyen depremlerin katkısını da dikkate almak üzere alansal geri plan sismik kaynakların tanımlanması.

(iv) Depremlerin zaman içinde oluşumları için uygun bir stokastik modelin seçilmesi.

(v) Yerel verilere dayanan bir yer hareketi tahmin (azalım) ilişkisinin çıkartılması ya da mevcutlar arasından uygun birinin seçilmesi.

(vi) Göz önünde tutulan tüm sismik kaynakların inşaat sahasındaki sismik tehlikeye katkılarını birleştirecek bir hesaplama algoritmasına göre seçilen deprem şiddeti ölçüsü ya da zemin hareketi parametresi için olasılık dağılımının elde edilmesi. Sayısal hesaplamalar, bu amaçla hazırlanmış olan bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılacağından uygun bir yazılım paketinin seçilmesi.

(vii) Değişik türdeki belirsizliklerin değerlendirilmesinin ya doğrudan yapılması ya da duyarlılık analizleri ve mantık ağacı ya da benzeri yöntemler yolu ile bilgi eksikliğinden kaynaklanan (epistemic) belirsizliklerin etkilerinin sonuçlara yansıtılması.

(viii) Belirli aşılma olasılıklarına (ya da tekerrür sürelerine) karşılık gelen deprem yer hareketi değerlerinin elde edilmesi ve bu değerlere göre deprem tehlikesi haritalarının çizilmesi.

Burada bu aşamaların her biri aşağıdaki bölümlerde daha ayrıntılı olarak ortaya konulmuş ve yapılan başlıca hatalar üzerinde durulmuştur.

2.1. Sismik Tehlike Analizi İçin İncelenecek Alanının Belirlenmesi

Sismik tehlike analizinde incelenecek alanın sınırlarının belirlenmesi esas olarak inşaat sahasına uzak mesafedeki sismik kaynaklarda oluşacak depremlerin inşaat sahasındaki yer hareketi parametresine ne oranda katkıda bulunacağına bağlıdır. İncelenecek alanın boyutları inşaat sahasını etkileyecek sismik kaynakları içerecek büyüklükte olmalıdır. Etkilenme alanının seçimi ve bunun gerekçelerinin ortaya konulması incelemeyi yapan kişinin sorumluluğundadır (DOE-STD-1023-95, 1995).

Etkilenme alanının belirlenmesi ve aktif fay çalışmasının yapılacağı alanın büyüklüğü konusunda yerleşmiş kesin kurallar bulunmamakla birlikte, inceleme alanı, merkezinde inşaat sahası olan bir daire şeklinde alınabilir. Bu dairenin çapının seçimi yukarıda belirtilen ana prensiplerin yanında inşaat sahası etrafındaki fayların uzunluğu, aralığı, mekanizmaları, seçilen alana mesafeleri, fayların aktiflik dereceleri, yaratabilecekleri en büyük deprem magnitüdü, mühendislik yapısının önemi, seçilen yer hareketi parametresinin dikkate alınması öngörülen en küçük değeri, kullanılacak olan zemin hareketi parametresindeki mesafeye bağlı azalım oranı ve azalım ilişkisinin geçerlilik mesafesi gibi değişik bir çok faktöre bağlıdır. Etkilenme alanının çapı için literatürde bazı öneriler yer almaktadır. Örneğin, nükleer güç santralları için yapılacak sismik tehlike analizlerinde etkilenme alanının yarıçapının 320 km (yaklaşık 200 mil) alınması Amerika Birleşik Devletleri Atom Enerjisi Komisyonu (U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1997) ve Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı gibi nükleer güç santrallarının kurulmasını denetleyen kuruluşlar tarafından öngörülmüştür.

Uygulayıcılar için bir fikir oluşturmak amacı ile şu önerileri yapmak uygun görülmüştür:

(i) İnşaat sahası etrafındaki 320 km yarıçaplı alan içindeki sismik aktivite ve sismik kaynaklarla ilgili literatürde yer alan her türlü bilgi derlenerek incelenmelidir (Regulatory Guide 1.165, 1997). Ayrıca, söz konusu alan içindeki sismik kaynaklarla ilişkilendirebilecek olan geçmişteki tüm deprem kayıtlarına (tarihsel ve aletsel)

ilişkin kataloglardan yararlanılarak, bu depremlerin oluş tarihlerini, büyüklüklerini (magnitüd ve/veya şiddet), merkez-üstü konumlarını, odak derinliklerini listeleyen bir veri tabanı oluşturulmalıdır.

(ii) İnşaat sahası etrafındaki en az 50 km yarıçaplı alan için de, geniş kapsamlı bir arazi ve ofis çalışması yürütülerek bölgedeki aktif faylar belirlenmeli ve bölgenin aktif fay haritası hazırlanmalıdır. Bu haritanın hazırlanması sırasında belirlenen aktif faylarla ilgili olarak, her bir fayın türü, geometrisi (doğrultu ve eğimi), uzunluğu, segmenti, yaşı, toplam atım miktarı, yıllık kayma hızı, maksimum deprem üretme potansiyeli, maksimum depremlerin yinelenme aralığı gibi başlıca fay parametrelerinin tahminine çalışılmalıdır.

Belirli bir bölge için sismik tehlike haritasının çıkartılması amaçlanıyorsa, o zaman yukarıda önerilen yarıçapların, o bölgenin sınırlarından itibaren alınması gerekecektir. Gerektiğinde, dairesel inceleme alanı yerine dikdörtgen şeklinde ya da simetrik olmayan alanlar da alınabilir.

2.2. Deprem Veri Tabanının Oluşturulması

Sismik veri tabanının oluşturulmasında deprem katalogları en önemli veri kaynağıdır. Ancak deprem kataloglarındaki veriler doğrudan kullanıma uygun olmayabilir. Genellikle deprem kataloglarında deprem magnitüdleri değişik ölçeklerde verilmektedir. Bunların tek bir ölçeğe çevrilerek, magnitüd açısından yeknesak bir veri tabanının oluşturulması tavsiye edilmektedir. Poisson modelinin içerdiği bağımsızlık varsayımı nedeni ile öncü ve artçı depremlerin ayıklanması da gerekebilir. Diğer bir problem de, deprem kataloglarında yer alan küçük magnitüd değerli depremler ile çok uzun tekerrür süreli büyük magnitüdlü depremlerin sayılarının eksik olmasının yarattığı yanlılıktır. Aşağıdaki alt-bölümlerde bu problemlerin çözümüne yönelik işlemler kısaca özetlenmiştir.

<u>Deprem Veri Tabanının Tek Bir Magnitüd Ölçeğine Göre Oluşturulması</u>: Kataloglarda yer alan değişik magnitüd ölçeklerinin tek bir magnitüd ölçeğine çevrilmesinde moment magnitüdünün (M_w) esas alınması uygun olacaktır. Farklı büyüklük ölçeklerine göre (cisim dalga magnitüdü – M_b, süre magnitüdü – M_d, yerel magnitüd – M_L ve yüzey dalgası magnitüdü – M_s) raporlanan deprem kayıtlarının M_w ölçeğine çevrilmesi oldukça önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu amaçla değişik ampirik dönüşüm ilişkileri geliştirilmiştir (örneğin Boore ve Joyner, 1982, Ulusay, v.d. 2004). Bu ilişkilerin elde edilmesinde yaygın olarak standart en küçük kareler regresyonu kullanılmıştır. Bu yöntem, aralarında bağıntı kurulacak değişkenlerden yalnızca bağımlı değişkende (M_w) hata (depremin rassal oluşumundan ileri gelen) olması durumunu göz önüne almaktadır. Ancak deprem büyüklüklerinin çeşitli nedenlerden kaynaklanan belirsizlikler yüzünden hatasız olarak belirlenmesi mümkün değildir. Dolayısıyla aralarında bağıntı kurulacak olan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin her ikisinin de hata içermesi kaçınılmazdır. Böyle bir durumda regresyon analizi yapılabilmesi için ortogonal regresyon yönteminin kullanılması uygun olacaktır. Castellaro, v.d. (2006) standart regresyon yoluyla elde edilen dönüşüm denklemlerindeki yanlılığı incelemiş ve geliştirdikleri "Unified Italian Catalogue"'da 0.4 magnitüd değerlerine erişen hataların olabileceğini belirtmişlerdir.

Deniz ve Yücemen (2010), ortogonal regresyon yöntemini ve son yüzyıl içerisinde ülke çapında meydana gelmiş bütün depremlerden oluşan bir veri tabanını kullanarak bir dizi dönüşüm ilişkileri elde etmiştir. Bu ilişkiler Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$M_w = 2.25 \times M_b - 6.14 \qquad (1a)$$

$$M_w = 1.27 \times M_d - 1.12 \qquad (1b)$$

$$M_w = 1.57 \times M_L - 2.66 \qquad (1c)$$

$$M_w = 0.54 \times M_s + 2.81 \qquad (1d)$$

Ortogonal regresyon, çevirim ilişkilerinin eğimlerini standart en küçük kareler yöntemine göre her zaman daha büyük tahmin etmektedir. Bu nedenle büyük depremlerin magnitüdlerini geleneksel yönteme göre daha büyük vermektedir. Küçük depremler için bunun tersi geçerli olmakla birlikte, bu depremlerin sismik tehlikeye katkısı

zaten oldukça küçük seviyelerde kalmaktadır. Dolayısıyla deprem tehlikesinin tahmininde ortogonal regresyonun kullanılması durumunda geleneksel yöntemin sonuçlarına göre daha emniyetli tarafta değerler elde edilecektir.

Deprem Veri Tabanının İkincil Depremlerden Arındırılması: Olasılıksal sismik tehlike analizinde yaygın bir şekilde kullanılan Poisson modeli depremlerin gerek mekan, gerekse zaman açısından birbirlerinden bağımsız bir şekilde meydana geldikleri varsayımına dayanır. Poisson modelinin gerektirdiği bağımsızlık koşulunu sağlamak için deprem öbekleşmelerinin belirlenerek öncü ve artçı depremlerin (ikincil depremler) sismik veri tabanından çıkartılması gerekir.

Öncü ve artçı şokların zaman ve mekana göre belirlenmesi için birçok çalışmalar yapılmıştır (örneğin: Omori, 1894, Gardner ve Knopoff, 1974, Prozorov ve Dziewonski, 1982, Van Dyck, 1985, Utsu, v.d., 1995, Savage ve Rupp, 2000 ve Kagan, 2002). Öncü ve artçı depremler zamansal ve mekansal olarak ana şok etrafında benzer dağılımlar göstermektedirler. Bu nedenle, ikincil depremlerin tayini öncü ve artçı depremler için farklılık göstermemektedir. Sözü geçen çalışmalar mühendislik uygulamaları için belirli bir büyüklük seviyesindeki depremlerin, deprem bölgesi, sismik kaynak, ilgili fayın uzunluğu ve çeşidi gibi ayrımlar gözetilmeksizin aynı ikincil deprem aktivitesine yol açtığını kabul eden çalışmalardır. Burada da her bir deprem büyüklüğü seviyesi için, bu seviyede bulunan bir ana şoka belirli bir zaman ve uzaklık penceresi içinde kalan bütün depremlerin ilgili ana şokun artçı depremleri olduğu kabul edilmiştir. Bir depremin öncü deprem sayılabilmesi için ise, kendi büyüklük seviyesi için belirlenmiş olan zaman ve uzaklık pencerelerinin içerisinde, kendisinden daha büyük bir deprem bulunması gerekmektedir. Böyle durumlarda magnitüdü daha büyük olan ikinci depremin ana şok olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlara istisna olarak, yalnızca magnitüdü 6.0'dan büyük olan bütün depremlerin ana şok olduğu kabul edilmiştir.

Deniz (2006), yukarıda belirtilen varsayımlar çerçevesinde ve Van Dyck (1985), Utsu, v.d. (1995), Savage ve Rupp (2000) ve Kagan (2002) tarafından yapılan çalışmalara dayanarak zaman ve mekan pencerelerinin boyutlarını belirlemiştir. Bu dört çalışmada verilen değerlere dayanarak artçı şoklar için uzaklık penceresi boyutlarını, Gardner ve Knopoff (1974) ve Savage ve Rupp (2000) tarafından verilen değerlerin ortalamasını alarak da zaman pencerelerinin boyutlarını tespit etmiştir. Elde edilen uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda yer almayan ara değerlerin hesabında, zaman için doğrusal, uzaklık için de log-doğrusal enterpolasyon kullanılması önerilmiştir. Tablo 1'de verilen değerler kısıtlı bir araştırmaya dayanarak elde edilmiş öneri niteliğindeki değerlerdir ve bu durum sözü edilen değerlerin kullanımında göz önünde tutulmalıdır.

Tablo 1. Öncü ve artçı depremlerin ayırt edilmesinde kullanılacak olan uzaklık ve zaman pencerelerinin boyutları (Deniz, 2006)

Magnitüd	Uzaklık (km)	Zaman (gün)
4.5	35.5	42
5.0	44.5	83
5.5	52.5	155
6.0	63.0	290
6.5	79.4	510
7.0	100.0	790
7.5	125.9	1326
8.0	151.4	2471

Deprem Veri Tabanındaki Eksikliklerin (Yanlılığın) Giderilmesi: Magnitüd için önerilen üstel olasılık yoğunluk işlevinin parametrelerinin tahmini için kullanılacak deprem katalog verilerinin her magnitüd düzeyinde eksiksiz olması gerekmektedir. Zaman içinde geriye doğru gidildikçe kataloglardaki deprem kayıtlarının hem kalitesi düşmekte hem de sayısı azalmaktadır. Yakın zaman içinde küçük, büyük tüm depremler kaydedilirken, çok eski kayıtlar sadece büyük depremleri içermektedir. Ayrıca kaydedilmiş depremler daima iskan edilmiş bölgelerde olup, insan yaşamından çok uzak yerde olan büyükçe depremlerin bile kayda geçmeme olasılığı vardır. Dolayısı ile deprem kataloglarındaki bu eksiklikler veri tabanında hem zamanda hem de mekanda yanlılıklara sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak da bulunan tekerrür ilişkileri uzun süreli oluş sıklıklarını gerçekçi bir biçimde vermeyebilir. Bu nedenle, belirli bir magnitüd aralığına düşen depremlerin eksiksiz olarak kayda geçirildiği zaman dilimini belirlemek gerekmektedir. Bu zaman dilimi belirlendikten sonra da o magnitüd aralığındaki depremlerin oluş sıklığı, sadece o zaman diliminde oluşan depremler göz önünde tutularak yapılacaktır.

Katalogda yer alan deprem sayılarının suni olarak, gözlemlerde mevcut eksikliklerden arındırılması için Stepp (1973) tarafından geliştirilmiş olan bir yöntem yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, depremler belirlenen magnitüd aralıklarına göre gruplandırılmakta ve her gruptaki depremlerin oluşumu noktasal bir süreç olarak alınmaktadır. Örneklem ortalamasının varyansının, örneklem sayısı ile ters orantılı olduğunu belirten temel istatistik kuralı bu yönteme esas teşkil etmektedir. Bu kurala göre gözlem sayısını çoğaltarak varyansı istenildiği kadar küçültmek mümkündür, yeter ki deprem kayıtları zaman içinde eksiksiz ve süreç de durağan olsun. Eğer deprem oluşumu durağan bir süreç ise ortalama değer, varyans ve diğer istatistiksel momentler sabit kalacaktır. Birim zamana isabet eden deprem sayıları k_1, k_2, ..., k_n ile gösterilecek olursa, bu örneklem grubu için yansız ortalama deprem sayısı:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} k_i \tag{2}$$

varyans da

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{\lambda}{n} \tag{3}$$

olur. Denklem 3'de, n, birim zaman aralıklarının sayısıdır. Birim zaman aralığı bir yıl olarak alınırsa

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} = \sqrt{\frac{\lambda}{T}} \tag{4}$$

elde edilir. Burada, σ_λ ortalama değerin standart sapması, T ise örneklemin yıl cinsinden zaman aralığıdır. Eğer durağanlık varsayımı geçerli ise, göz önünde tutulan örneklemde, λ belirlenen bir magnitüd aralığında sabit kalacak ve σ_λ, $1/\sqrt{T}$ şeklinde değişecektir. Eğer λ sabit olursa, o zaman durağanlığın gerçekleşeceği zaman aralığı, ortalama değer için iyi bir tahmin oluşturacak kadar uzun, ama kayıtların eksik olduğu aralıkları içermeyecek kadar da kısa olmalıdır. Bu zaman aralığı belirlendikten sonra, seçilen magnitüd grubundaki depremlerin ortalama yıllık sayısı ise sadece o zaman aralığında oluşan depremler göz önünde tutularak yapılacaktır.

2.3. Deprem Magnitüdü - Tekerrür Modelleri

Üstel Dağılım Modeli: Deprem magnitüdlerinin olasılık dağılımı, magnitüdler ile bunların oluş sıklıkları arasındaki ilişkiyi gösteren tekerrür bağıntılarından çıkartılır. En yaygın kullanılan ilişki Richter (1958) tarafından önerilen aşağıdaki doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisidir:

$$\log_{10} N(m) = a - bm \tag{5}$$

burada, N(m) = birim zaman içinde magnitüd değeri m'ye eşit ya da m'den büyük ortalama deprem sayısı; a ve b = ilgili bölge için saptanan katsayılar; m = Richter magnitüdü ve $\log_{10} = 10$ tabanına göre logaritmadır. Eğer α = a(ln 10) ve β = b(ln 10) olarak tanımlanırsa, Denklem 5 şu şekilde yazılabilir.

$$N(m) = e^{\alpha - \beta m} \tag{6}$$

Denklem 6'da α, bir bölgede olabilecek depremlerin toplam sayısına ilişkin bilgiyi yansıtmaktadır. α değerleri, genellikle göz önünde tutulan bölgenin büyüklüğü ve incelenen zaman süresi ile doğrudan doğruya ilgilidir. Buna karşılık β değerleri daha çok bölgenin tektonik yapısı ile ilişkilidir ve büyük magnitüdlü depremlerin küçüklere olan göreceli oranını gösterir. Bu bakımdan, β değerleri bölgenin tektonik açıdan sismik etkinliğinin bir göstergesi olarak kabul edilir. β'nın değeri sismik bölgeler arasında farklılık göstermektedir.

Genellikle, sismik tehlike analizlerinde magnitüd için m_0 gibi bir alt sınır saptanır. Alt sınır değerinden daha küçük magnitüdlü depremler mühendislik yapılarında bir hasar yaratamayacaklarından, bunlar sismik tehlike analizine katılmazlar. Ayrıca, m_0'dan daha küçük depremler için istatistiksel veriler çoğu kez güvenilir değildir. Geçmiş deprem kayıtları, sonsuz enerjinin açığa çıkmasının olanaksız olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyimle, magnitüd için bir üst sınır vardır. Deprem magnitüdlerinin üst sınırı, o bölgede beklenebilecek en büyük deprem magnitüdü m_1 ile belirlenecektir. Magnitüd için bir alt ve üst sınırın olduğu varsayılırsa, Denklem 6 kullanılarak magnitüd için aşağıda verilen birikimli dağılım işlevi, $F_M(m)$, elde edilir:

$$F_M(m) = \Pr\left(M < m \middle| m_0 \le m \le m_1\right) = k\left(1 - e^{-\beta(m - m_0)}\right) \tag{7}$$

Burada,

$$k = \left[1 - e^{-\beta(m_1 - m_0)}\right]^{-1} \tag{8}$$

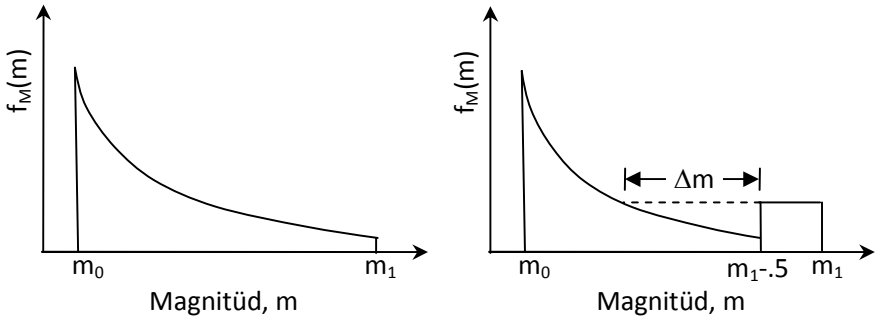
olup, birikimli dağılım işlevinin $m = m_1$ değerinde 1.0 olmasını sağlayan standartlaştırma katsayısıdır. Birikimli dağılım işlevinin magnitüde göre türevinin alınması ile aşağıda verilen olasılık yoğunluk işlevi, $f_M(m)$, bulunur:

$$\begin{aligned} f_M(m) &= k\beta e^{-\beta(m - m_0)} && m_0 \le m \le m_1 \\ &= 0 && \text{diğer yerlerde} \end{aligned} \tag{9}$$

Bu şekilde elde edilen budanmış üstel olasılık yoğunluk işlevi, Şekil 1(a)'da gösterilmiştir.

Gözlem verilerine dayanarak üstel dağılımın parametrelerinin tahmini için değişik istatistiksel yöntemler kullanılabilir. Standart en küçük kareler (EKK) ve en çok olabilirlik (EÇO) istatistiksel tahmin yöntemleri en fazla tercih edilenlerdir. EKK yöntemi, gözlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerinin toplamlarının en küçüklenmesine dayanmaktadır. En küçük kareler regresyon yönteminin değişik uygulamaları mümkündür. Örneğin: frekans ya da birikimli frekans verilerinin kullanılması, regresyonun her bir magnitüd düzeyindeki frekanslara o magnitüd düzeyindeki gözlem sayısına göre verilen ağırlıklara göre yapılması (McGuire, 2004). EÇO yöntemi ise üstel dağılımın parametrelerini gözlenen magnitüd verilerinin olabilirliğini en büyükleyecek şekilde tahmin etmektedir. Ancak bu tahmin yöntemleri kullanılırken sağlanması gereken varsayımların geçerliliği nadiren kontrol edilmekte ve bu durum yanlış sonuçlara yol açabilmektedir. Örneğin EKK yöntemi ile elde edilen tahmincilerin normal olmayan dağılımlar için etkin ve robust olmadıkları

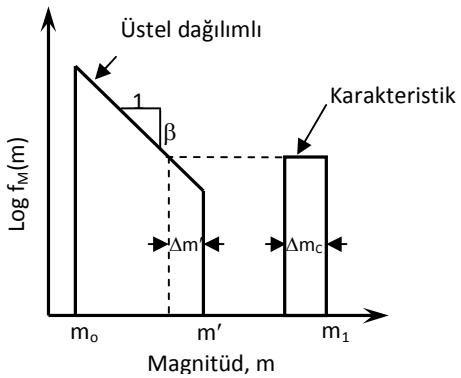
belirlenmiştir (Akkaya ve Tiku, 2008). EÇO yönteminde ise elde edilen denklemlerin çözümü içerdikleri doğrusal olmayan fonksiyonlar nedeniyle, iteratif çözüm yapılsa bile, çok zordur. Ayrıca iteratif çözümler sırasında bir çok problemle karşılaşmak mümkündür. Buna karşılık uyarlanmış en çok olabilirlik (UEÇO) tahmin yöntemi parametrelerin robust bir biçimde tahminine olanak sağlamaktadır (Akkaya ve Yücemen, 2011). Richter'in doğrusal deprem magnitüdü-sıklık ilişkisindeki a ve b parametrelerinin normal olmayan hata terimleri için UEÇO tahmin yöntemiyle elde edilmesi için gerekli denklemler Akkaya ve Yücemen (2011) tarafından çıkartılmış ve konuya ilişkin ayrıntılı bilgi aynı yayında verilmiştir.



(a) Budanmış Üstel (b) Karakteristik

Şekil 1. Budanmış üstel ve karakteristik deprem modelleri için magnitüd olasılık yoğunluk işlevleri

Karakteristik Deprem Modeli: Geçmiş deprem verilerine göre hesaplanan deprem tekerrür tahminleri ile sismolojik ve jeolojik incelemelere göre yapılanlar arasındaki çelişkiler, araştırmacıları bu çelişkileri giderecek yeni tekerrür modellerinin geliştirilmesine teşvik etmiştir. Bunlar arasında Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli en fazla kabul gören olmuştur. Schwartz ve Coppersmith (1984), üstel dağılım modelinin büyük alanlardaki magnitüd dağılımını yeterli bir biçimde tanımladığını, ama fay segmentlerinde oluşan büyük magnitüdlü depremlerin oluş sıklığını eksik tahmin ettiğini belirterek, karakteristik deprem modelini önermişlerdir. Youngs ve Coppersmith (1985), karakteristik deprem modeli için geçerli olacak bir olasılık yoğunluk işlevini çıkartmışlardır. Bu modelde deprem magnitüdleri m′ değerine kadar üstel dağılımlı olarak alınmışlardır. Magnitüdü m′ den büyük depremler karakteristik deprem olarak tanımlanmışlar ve bunların $m_l - \Delta m_C$ ve m_l arasında bir biçimli dağılım gösterdikleri varsayılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Schwartz ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli

Bu modelin kullanımı için Youngs ve Coppersmith (1985) bazı basitleştirici varsayımlar yapmışlardır. Δm_C, 0.5 ve $m' = m_1 - \Delta m_C$ olarak alınmıştır. Karakteristik depremin frekansının da üstel dağılımın ($m'-1.0$) değerindeki frekansa eşit olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımların uygulanması ve olasılık yoğunluk işlevinin altındaki toplam alanın 1 olmasının sağlanması için gerekli işlemin yapılması ile, karakteristik deprem modeli için aşağıda verilen olasılık yoğunluk işlevi elde edilmiştir:

$$f_M(m) = \begin{cases} k\beta e^{-\beta(m-m_0)} & m_0 \le m \le m_1 - 0.5 \\ k\beta e^{-\beta\left(\left(m_1 - \frac{3}{2}\right) - m_0\right)} & m_1 - 0.5 \le m \le m_1 \end{cases} \qquad (10)$$

burada, k olasılık yoğunluk işlevinin altındaki toplam alanın 1 olmasını sağlayan katsayıdır ve şu şekilde ifade edilmiştir:

$$k = \left[1 - e^{-\beta(m_1 - 0.5 - m_0)} + \beta e^{-\beta\left(m_1 - \frac{3}{2} - m_0\right)}_{0.5}\right]^{-1} \qquad (11)$$

Bu varsayımlara göre ortaya çıkan olasılık yoğunluk işlevinin biçimi, Şekil 2(b)'de gösterilmiştir. Bu şekilde, Δm=1 dir.

Sismik tehlike analizinde en önemli parametrelerden biri de sismik kaynaklar için belirlenecek olan deprem magnitüdü üst sınırıdır. Bu değerin tahmini için değişik yöntemler vardır. Gözlenmiş en büyük deprem magnitüdünün bir miktar artırılarak kullanılması bu yöntemlerden bir tanesidir. Diğer yöntemler kırılma boyu-magnitüd ve atım-magnitüd korelasyonlarına dayanmaktadır (Wells ve Coppersmith, 1994). Mevcut tüm yerel veriler ve belirtilen bu yöntemler kullanılarak m_1 için en iyi tahmin yapılmalıdır.

2.4. Depremlerin Zaman İçinde Oluşum Modelleri

Poisson Modeli: Depremlerin zaman içinde gösterdikleri rassal dağılımın modellenmesi için değişik stokastik modeller geliştirilmiştir. Olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmalarının çoğunluğunda depremlerin zaman içindeki oluşumları homojen Poisson süreci ile modellenmektedir. Poisson modelinde deprem olaylarının birbirlerinden bağımsız oldukları varsayılmaktadır. Bir sismik kaynak içerisinde ve belirli bir t zaman aralığında en az bir deprem olma olasılığı şöyledir:

$$\Pr(N \ge 1) = 1 - e^{-\nu.t} \qquad (12)$$

burada, ν, incelenen bölgede, birim zaman süresinde (genellikle bir yıl) meydana gelen magnitüdü m_0'a eşit veya m_0'dan büyük depremlerin ortalama sayısı olup, $1/\nu$ ise yıl cinsinden ortalama tekerrür süresine eşittir. Poisson modelinde, ν zaman içinde değişmeyen sabit bir değere eşittir.

Yinelenme Modeli: Depremlerin zamana olan bağımlılığını modellemek üzere yinelenme modellerini kullanmak mümkündür. Yinelenme sürecine dayanan modellerde, depremlerin oluşumu, aynı dağılıma sahip tekerrür süreleri olan bir olaylar dizisi şeklinde alınmaktadır. Diğer bir deyimle gelecekte olacak depremin beklenen zamanı sadece bir önceki depremin olduğu tarihe bağımlıdır. Fay segmentinde meydana gelen bir deprem sonraki deprem için yineleme sürecini başlangıç durumuna getirterek tekrar başlatmaktadır. Zamana bağımlılık, tekerrür süreleri için varsayılan dağılımlara bağlı olan tehlike oranı yolu ile modellenmektedir. Tehlike oranı aşağıda denklemi verilen tehlike fonksiyonuna bağlıdır:

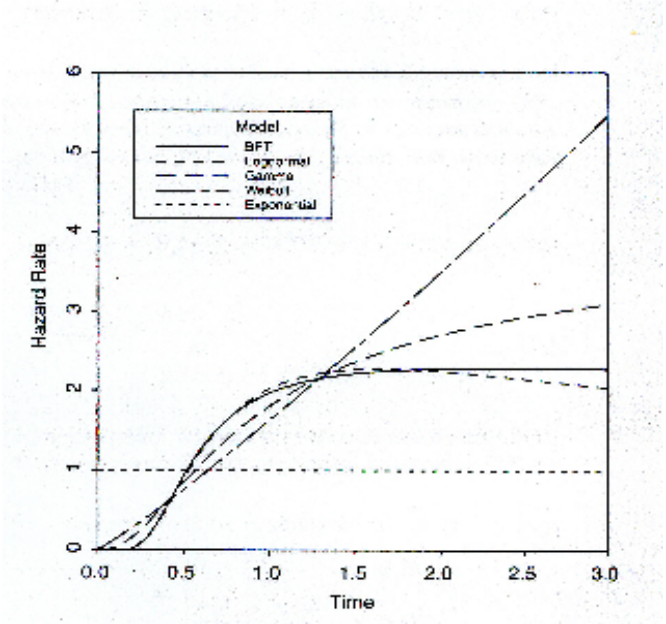
$$h(t) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)} \tag{13}$$

burada, $f_T(t)$ ve $F_T(t)$, sırası ile olaylar arası zamanın olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım işlevleridir. Örneğin, Poisson süreci, tehlike oranının sabit ve tekerrür sürelerinin üstel dağılıma sahip olduğu bir yinelenme sürecidir.

Esteva (1970) tekerrür süreleri için gamma dağılımını önermiştir. Weibull dağılımı, elastik geri tepme kuramı (Reid, 1910) ile uyumlu olarak, en son deprem olayından sonra geçen süre ile artan bir tehlike oranına sahip olması nedeni ile tekerrür zamanları için sıkça kullanılmıştır (örneğin, Kameda ve Ozaki, 1979; Hagiwara, 1974; Brillenger, 1982). Yakın bir zaman önce Brownian Aşma Zamanı (Brownian Passage Time) modeli, karakteristik depremlerin tekerrür sürelerinin olasılık dağılımı için önerilmiştir (Matthews, v.d., 2002). Brownian Aşma Zamanı (BAZ) modeli, San Francisco için 2002 yılında yapılan sismik tehlike analizinde kullanılmıştır. BAZ modeli için geçerli olan olasılık yoğunluk işlevi şöyledir (Matthews, v.d. 2002):

$$f_T(t) = \left(\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}\right)^{1/2} e\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\alpha^2 \mu t}\right) \tag{14}$$

burada, μ ortalama tekerrür süresi ve α aperiyodiklik parametresi olup aynı zamanda standart sapmanın ortalama değere oranı olan değişkenlik katsayısına eşittir. Yinelenme modelinde, tekerrür süresi için kullanılan değişik olasılık dağılımları için geçerli olan tehlike oranı işlevlerinin değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere lognormal ve BAZ modelleri birbirlerine çok yakın değerler vermekte olup, depremlerin zamana bağımlı oluşum süreçlerini en iyi şekilde tasvir etmektedirler.



Şekil 3. Tekerrür süresi için kullanılan değişik olasılık dağılımları için geçerli olan tehlike oranı işlevleri. Üstel dağılım haricindeki tüm dağılımlar için ortalama değer 1, standart sapma ise 0.5' dir. (Matthews, v.d. 2002)

Karma Yinelenme Modeli: Wu, v.d. (1995) karma (hybrid) yinelenme modelini geliştirmişlerdir. Bu modele göre, büyük magnitüdlü karakteristik depremlerin zamana olan bağımlılığı yinelenme süreci ile modellenmiş ve daha küçük depremler için kabul edilen üstel dağılım ile birleştirilmiştir. Karma yinelenme modeli, büyük magnitüdlü karakteristik depremlerin periyodik olarak meydana geldiği varsayımını içerebilmek için hafızasız Poisson modelini değiştirmektedir. Bu değişiklik karakteristik depremler için kabul edilen tek adımlık hafızadır. Diğer bir deyimle, bu modelde büyük magnitüdlü karakteristik depremlerin oluşumunun bir önceki karakteristik depremden sonra geçen zamana bağımlı olduğu varsayılmaktadır. Buna ek olarak daha önceki bölümde de açıklandığı gibi, büyük magnitüdlü karakteristik depremlerin olasılık dağılımı için üstel dağılım yerine, karakteristik depremin yer aldığı dar aralıkta yoğunlaşmış birbiçimli (uniform) bir olasılık dağılımı varsayılmaktadır (bakınız Şekil 1 (b) ve 2).

2.5. Depremlerin Mekansal Dağılım Modelleri

Depremlerin mekandaki dağılımı sismik kaynaklar yoluyla tanımlanır. Sismik tehlike hesabında en önemli konulardan biri de, geçmiş depremlerin coğrafi dağılımı ile jeolojik ve tektonik bilgilerin incelenerek, inşaat sahası etrafında tehlike yaratabilecek deprem kaynaklarının saptanmasıdır. Geometrik özelliklerine bağlı olarak depremlerin mekan içinde oluşumu üç tür deprem kaynağına dayandırılmıştır. Bunlar nokta, çizgi ve alan kaynaklarıdır. Sismik kaynakların coğrafi konumlarının tayininde jeolojik, jeofiziksel ve sismolojik veriler ile geçmiş depremlerin merkez-üstlerinin konumlarını gösteren haritalardan yararlanılmalıdır. Uzman görüşü de sismik kaynakların konumlarının belirlenmesinde önemli rol oynar (SSHAC, 1997).

Nokta kaynak: En basit sismik kaynak türüdür. Bir sismotektonik bölge ya da bir fay ile ilişkisi kurulamayan ve küçük bir bölge içinde yoğun bir şekilde toplandığı bilinen depremlerin bir nokta kaynaktan ortaya çıktığı varsayılabilir. Burada kullanılan "nokta" kelimesi, gerçek anlamda değil fakat kaynak boyutlarının, kaynağın inşaat sahasına olan uzaklığına oranla küçük olduğu bir bölgeyi tasvir etmek için kullanılmıştır. Kaynak boyutları küçük olduğu için, bir nokta kaynak içinde oluşacak tüm depremlerin inşaat sahasına olan uzaklıkları aynı ve ortalama uzaklığa eşit alınabilir.

Alan Kaynak: Bazı bölgelerde mevcut jeolojik yapı ile geçmiş deprem olayları arasında belirgin bir ilişki kurulamaz; varolan deprem kayıtları belirli bir fay sistemini kesinlikle ortaya çıkarılmasına yetecek doğrultuda ve sayıda değildir. Ayrıca kalın örtü tabakaları fayların konumunun kesinlikle belirlenmesine olanak tanımayabilir. Böyle durumlarda, söz konusu bölge, depremlerin her yerde eşit olasılık ile oluşabilecekleri bir alan kaynak olarak alınabilir. Alan kaynaklar, etraflarındaki bölgelerden farklı ama kendi içlerinde aynı sismisite özelliklerine sahip olan ve ayrıca belirlenmiş aktif fayları dışlayan bölgeleri tanımlamak için kullanılmaktadır (Thenhaus ve Campbell, 2003).

Nokta kaynak modeli basit olması nedeni ile uygulamada çoğunlukla çizgi ve alan kaynakların nokta kaynaklarla yaklaşık tasviri yoluna gidilir. Bu amaçla bir alan kaynak daha küçük alanlara, bir çizgi kaynak ise daha küçük doğru parçalarına bölünür. Bu şekilde oluşturulan küçük boyutlu alt kaynak birimleri, inşaat sahasına uzaklıkları geometrik merkezlerinden ölçülen noktasal deprem kaynakları olarak alınmışlardır. Bu yaklaşıklıktan doğan hata, özellikle inşaat sahasından uzak kaynaklar için çok küçük olacaktır. Sismik kaynakların geometrik özelliklerini ve coğrafi konumlarını belirlemek pek çok unsurun göz önünde tutulmasını gerektiren zor bir iştir. Ancak makro düzeyde yürütülecek bir sismik tehlike analizinde, sismik bölgelerin modellemesinde aşırı ayrıntıya girmenin sonuçların doğruluğuna fazla bir katkı yapmadığı belirtilmiştir (Yücemen, 1982).

Sismik kaynak bölgelerinin sınırlarını belirlemek ve aktif fayları ayırt etmek sismik tehlike analizinde çok önemlidir. Bunun için jeoloji, sismoloji, jeofizik, istatistik ve uzman görüşünün sağlayacakları her türlü bilgiden yararlanılmalıdır.

Olasılıksal sismik tehlike analizinde belirlenen fayların hiçbiri ile ilişkilendirilemeyen depremler geri plan sismik etkinlik olarak ele alınır. Geri plan sismik etkinliğin sismik tehlikeye katkısı genellikle iki değişik model kullanılarak hesaplanmaktadır: homojen (uniform) sismisiteye sahip geri plan alan kaynak ve mekansal olarak düzleştirilmiş (spatially smoothed) sismisite modeli. Konuya ilişkin ayrıntılı bilgi Yılmaz ve Yücemen (2008)'de yer almaktadır. Aynı çalışmada, sismik tehlike sonuçlarının geri plan sismik etkinliği tanımlamak için kullanılan modellere olan duyarlılığını incelemek üzere biri büyük (bir ülke) ve diğeri küçük (bir kent) bir bölgeyi içeren iki örnek çalışma yapılmıştır.

2.6. Yer Hareketi Tahmin Denklemi

Sismik tehlikenin tahmini için depremin etkinliğini yansıtan bir zemin hareketi parametresi seçilmelidir. Bundan sonra da o parametrenin azalımına ilişkin bir model geliştirmelidir. Zemin hareketi tahmin ya da azalım modelleri zemin hareketi parametrelerinin özelliklerinin odak noktasından ya da sismik kaynağın seçilen bir noktasından uzaklaştıkça nasıl değişeceğini gösteren ve çoğunlukla gözlemsel yollarla elde edilen denklemlerdir. Bu denklemler genellikle m magnitüdündeki bir depremin, r uzaklığındaki inşaat sahasında yaratacağı en büyük zemin hareketi parametresinin değerini veren bir fonksiyon şeklindedir. Uzaklık olarak, merkez-üstü, odak ya da sismik kaynak üzerindeki bir noktadan ölçülen mesafeler alınmaktadır. Ayrıca inşaat sahasının zemin özelliklerini yansıtan bir parametre de bu ilişkilerde yer alabilmektedir. Yeni nesil yer hareketi tahmin denklemleri fayın türünü ve değişik bazı parametreleri de göz önünde tutmaktadır. Bu azalım ilişkilerinin genel yapısı aşağıda verilen denklem ile tanımlanabilir (Araya ve Der Kiureghian, 1988):

$$Y = N_y \, f\,(M, R, SP_i) \tag{15}$$

burada, Y=tahmin edilecek olan kuvvetli yer hareketi parametresi (bağımlı değişken); N_y=azalım ilişkisindeki (ortalama tahmin eğrisi) belirsizlik (saçılım) için rassal düzeltme katsayısı; R=depremden inşaat sahasına olan "tanımlanmış" uzaklık ölçüsü; M=deprem büyüklüğünü gösteren herhangi bir ölçekteki magnitüd değeri; SP_i= deprem kaynağı, dalga yayılma hattı, yerel zemin koşulları ile ilgili parametreler.

Yer hareketi tahmin ilişkisi genellikle en küçük kareler yönteminin gözlemsel verilere uygulanması ile elde edilen bir eğri şeklindedir. Bu eğrinin etrafındaki saçılımdan doğan belirsizliğin analize yansıtılması, bundan sonraki bölümde anlatılacağı üzere rassal düzeltme katsayısı N_y ile sağlanmaktadır. Son yıllarda ülkemize özgü yer hareketi tahmin denklemlerinin çıkartılmasına ilişkin bazı çalışmalar yapılmıştır. Bunların arasında en güncel olanı Akkar ve Çağnan (2010) tarafından yapılan çalışmadır.

3. BELİRSİZLİKLERİN ANALİZİ

Olasılıksal sismik tehlike analizinde temelde birbirinden farklı iki tür belirsizlik vardır. Şu an kullanılan terminolojiye göre bunlar rassal (aleatory) ve bilgiye dayalı (epistemic) belirsizliklerdir. Rassallıktan kaynaklanan belirsizlikler sismik tehlikeyi etkileyen fiziksel olayların doğasında mevcut olan rassallık ve değişkenlikten kaynaklanmaktadır ve daha fazla veri ve bilgi elde edilerek azaltılmaları mümkün değildir. Gelecekte olacak bir depremin yeri, büyüklüğü, fay kırılmasının boyutları ve yönü bu tür belirsizliğin örnekleridir. Bilgi/veri eksikliğinden kaynaklanan belirsizliği ise elde edilecek yeni bilgiler ve veriler ile azaltmak mümkündür. Sismotektonik bölgelerin konumu, sismisite parametrelerinin dağılımlarındaki istatistiksel parametrelerdeki belirsizlikler bu tür belirsizliğe örnektir.

Bir önceki bölümde sunulan sismik tehlike hesabına ilişkin modellerde yalnızca deprem magnitüdündeki rassallık ile depremlerin yer ve zaman içindeki rassal dağılımları hesaba katılmıştır. Bu modellerde deterministik bir azalım ilişkisi kullanılmış, sismik veri tabanındaki eksikliklerden ve sismik kaynakların coğrafi dağılımlarındaki belirsizliklerden ortaya çıkan hatalar ise ihmal edilmiştir. Ancak duyarlılık analizleri, sismik tehlikenin, azalım ilişkisine, veri tabanındaki eksikliklere ve sismik kaynakların geometrik özelliklerine ilişkin

varsayımlardan belirgin bir biçimde etkilendiğini göstermiştir. Bu nedenle sismik tehlike değerlerinin gerçekçi bir biçimde tahmini için bu belirsizliklerin de hesaba katılması gereklidir.

Sismik tehlike hesabında başlıca belirsizlik kaynağı azalım ilişkisidir. Diğer belirsizlik kaynakları bölgenin sismik etkinliğine ilişkin parametreler (β, m_1, ν) ve sismik kaynak bölgelerinin coğrafi konumudur. Bu belirsizlik sebepleri teker teker ele alınarak sonuçlara olan etkileri aşağıda incelenmiştir.

Yer Hareketi Tahmin Denklemindeki (Azalım İlişkisindeki) Belirsizlik: Geçmiş deprem verilerine ait gözlem noktaları Denklem 15 ile sembolik olarak tanımlanan azalım eğrisi etrafında bir saçılım göstermektedir. Bu saçılımın çeşitli nedenleri vardır. Tek bir bölgeden elde edilen veriler genellikle bir azalım ilişkisi çıkarmak için yeterli değildir. Bunun sonucu olarak genelde azalım ilişkilerinin çıkartılmasında, jeolojik yapının ve zemin koşullarının değişik olduğu birkaç bölgeden toplanan verilerin tümünün kullanılması yoluna gidilmiştir. Yerel zemin şartları için bir düzeltme yapılmadığından, belirli bir bölgede ve belirli bir deprem için gözlenecek azalım özellikleri, bu şekilde bulunan genel bir azalım ilişkisinden sistematik bir sapma gösterecektir. Bunun yanında, gözlenen saçılımın bir bölümü de rassal bir nitelik taşıyacaktır. Aynı bölgede meydana gelen depremler de değişik azalım özellikleri gösterebilir. Bunu açıklayan başlıca nedenler depremlerin oluşum mekanizmalarındaki farklılıklar ve sismik kaynak ile inşaat sahası arasındaki jeolojik katmanların deprem dalgalarını yayma özelliklerindeki değişikliklerdir. Ayrıca deprem dalgalarının yayılması genellikle her yönde aynı şiddette olmadığından, depremlerin inşaat sahasına olan rassal konumları da bu farklılığın bir başka nedenidir.

Azalım ilişkisi etrafındaki yukarıda anlatılan saçılım (diğer bir deyimle azalım ilişkisi olarak benimsenen modeldeki belirsizlikler) nedeni ile, belirli bir r ve m değeri için Denklem 15'den bulunacak y değeri ile inşaat sahasındaki en büyük zemin hareketi parametresinin gerçek değeri Y_g arasında bir fark olabilecektir. Bu belirsizliklerin etkisini hesaba katmak için rassal bir düzeltme katsayısı, N_y, aşağıda belirtildiği gibi önerilmiştir:

$$Y_g = N_y\, y \tag{16}$$

burada, Y_g= inşaat sahasındaki en büyük zemin hareketi parametresinin gerçek (düzeltilmiş) değerini simgeleyen rassal değişken; y=verilen bir m ve r değeri için inşaat sahasındaki en büyük zemin hareketi parametresinin deterministik azalım ilişkisinden bulunan değeri; N_y=azalım ilişkisindeki (ortalama tahmin eğrisi) belirsizlik (saçılım) için rassal düzeltme katsayısıdır.

Rassal düzeltme katsayısı N_y'nin istatistiksel özelliklerini belirlemek üzere yeryüzünün çeşitli bölgelerinden elde edilen veriler incelenmiş ve $\ln(N_y)$'nin, yaklaşık olarak, ortalama değeri sıfır olan bir normal dağılım gösterdiği sonucuna varılmıştır (Esteva, 1970). Dağılımın standard sapması σ_y ise, verilerdeki homojenliğe bağlı olarak 0.20 ile 1.0 arasında değişmektedir.

Sismik Kaynakların Coğrafi Konumundaki Belirsizlik: Sismik kaynak bölgelerinin belirlenmesi önemli ölçüde belirsizlik içermektedir. Bu belirsizliklerin sonuçlara yansıtılması için klasik sismik tehlike analiz modellerindeki deterministik bölge sınırları yerine, bu sınırların konumunun rassal olduğu varsayılmıştır. Konum ile ilgili rassallık iki değişkenli Gauss dağılımı ile modellenmiştir; ortalama vektör en muhtemel konumu, standard sapma σ ise konumdaki belirsizliği göstermektedir. En olası konumdan δ_x ve δ_y miktarlarında bir sapma olasılığı aşağıdaki yoğunluk işlevi ile orantılı olacaktır (Bender, 1986 ve Yücemen ve Gülkan, 1994):

$$f(\delta_x, \delta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\delta_x{}^2 + \delta_y{}^2}{2\sigma^2} \right) \tag{17}$$

burada, x ve y birbirine dik iki ekseni simgelemektedir ve her iki eksen boyunca konumdaki belirsizliğin eşit olduğu varsayılmıştır. Eğer bu belirsizlik birbirine dik iki değişik yönde farklılık gösteriyor ise, Denklem 17 şu şekilde değiştirilecektir (Yücemen ve Gülkan, 1994):

$$f(\delta_x, \delta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{\delta_x{}^2}{2\sigma_x{}^2} + \frac{\delta_y{}^2}{2\sigma_y{}^2}\right)\right] \tag{18}$$

Dolayısıyla herhangi bir nokta için hesaplanan olasılık değerlerinin Denklem 18 ile çarpılarak "yuvarlatılması" gereklidir. Burada dikkat çekilmesi gereken husus, bir kaynak bölgesinde meydana gelen depremin koordinatlarındaki σ_x ve σ_y ile gösterilen belirsizliğin, o depremi içine alan bölgenin sınırlarında aynı değerlere sahip bir belirsizliğe eşdeğer olduğu gerçeğidir. Sismik kaynakların konumundaki belirsizliği yukarıda anlatılan model ile sonuçlara doğrudan yansıtmak SEISRISK-III programı (Bender ve Perkins, 1987) ile mümkün olmaktadır.

Sismik Parametrelere İlişkin Belirsizlikler: Klasik sismik tehlike analizi modeli depremlerin magnitüd, zaman ve yer açısından gösterdiği rassallığın yanında, azalım ilişkisindeki ve sismik kaynakların konumlarındaki belirsizlikleri de içermektedir. Ancak bulunan yıllık sismik tehlike değeri, $Pr(Y_g > y)$, sismik parametreler ν, β ve m_1'in verilen değerleri için geçerlidir; yani $Pr(Y_g > y/\nu,\beta,m_1)$ şeklinde bir koşullu olasılık olarak yazılmalıdır. Bu parametreler aynı zamanda daha önceki bölümlerde anlatılan olasılık dağılımlarının da parametreleridir. Eldeki sismik verilerin eksik olması nedeni ile bu parametrelerin incelenen bölge için tahmin edilen değerleri kesin olmayıp, bir ölçüde belirsizlik içerecektir. Bayesci bir yaklaşım ile değerleri kesin olarak bilinmeyen bu parametreler, olasılık yoğunluk işlevleri, $f_\nu(\nu)$, $f_\beta(\beta)$ ve $f_{m1}(m_1)$ ile simgelenen rassal değişkenler olarak alınabilirler. Bu üç sismik parametredeki belirsizliklerin sismik tehlike değerine doğrudan doğruya katılması, elde edilen yıllık tehlikenin, bu parametrelerin dağılımlarına göre ortalamasının bulunması ile sağlanır. Bunu gerçekleştiren ve toplam olasılık kuramına dayanan denklem şöyledir (Yücemen, 1982):

$$Pr(Y_g > y) = \int\int\int Pr\left(Y_g > y/\nu,\beta,m_1\right) f_\nu(\nu)\, f_\beta(\beta)\, f_{m_1}(m_1)\, d\nu\, d\beta\, dm_1 \tag{19}$$

Bu denklemdeki entegrallerin sınırları, ilgili parametrenin yoğunluk işlevinin geçerli olduğu aralık göz önünde tutularak saptanmalıdır.

Denklem 19'da ν, β ve m_1 rassal değişkenlerinin birbirlerinden istatistiksel bakımdan bağımsız oldukları varsayılmıştır. Ancak aynı veri tabanına dayanmaları nedeniyle gerçekte bunlar arasında bir ilişki bulunacaktır. Eğer birleşik yoğunluk işlevi, $f(\nu, \beta, m_1)$ biliniyorsa, o zaman Denklem 19 yerine

$$Pr(Y_g > y) = \int\int\int Pr\left(Y_g > y/\nu,\beta,m_1\right) f(\nu,\beta,m_1)\, d\nu\, d\beta\, dm_1 \tag{20}$$

geçerli olacaktır.

Sismik parametrelerin içerdiği belirsizliklerin yukarıda önerilen "kuramsal" model ile doğrudan doğruya analize katılması, çözümsel zorluklar yaratmaktadır. Ayrıca bu model ile, sismik kaynakların konumuna, azalım ilişkisine ve veri tabanına ilişkin değişik varsayımların etkilerini sonuçlara aktarma olanağı yoktur. Sismik parametrelerdeki belirsizlikler ile değişik varsayımların sonuçlara yansıtılması aşağıda özetlenen ve genellikle "mantık ağacı" olarak adlandırılan şu basit yöntemle, dolaylı olarak, yapılabilir (Yücemen, 1982):

(i) Sismik parametrelerin değerlerine, sismik kaynakların konumuna, azalım ilişkisine ve veri tabanına ilişkin her varsayıma, o varsayımın diğerlerine göre doğru olma olasılığını yansıtan öznel olasılık değerleri verilir.

(ii) Her bir varsayım grubu için (mesela, bir ν değeri, bir β değeri, bir m_1 değeri, bir azalım ilişkisi ve kaynakların konumuna ilişkin bir varsayım), o grubu oluşturan varsayımların öznel olasılıklarının çarpımına eşit olan birleşik olasılık değeri bulunur. Bu şekilde hesaplanan birleşik olasılıkların toplamının bire eşit olması gereklidir. Ayrıca en iyi tahminlerden oluşan grup için bulunacak birleşik olasılık değerinin de en büyük olması beklenir.

(iii) Her bir varsayım için sismik tehlike hesabı yapılır. Bulunan aşılma olasılığı o varsayım grubu için belirlenen birleşik olasılık değeri ile çarpılır. Birleşik olasılıklarla çarpılmış aşılma olasılıklarının toplamı aranılan sismik tehlike değerini verecektir. Bu şekilde hesaplanan ağırlıklı ortalama sismik tehlikeye Bayes tahmini denilecektir. Matematiksel olarak ifade edilirse:

$$\Pr\left(Y_g > y\right) = \sum_{j=1}^{n} \Pr\left(Y_g > y / G_j\right) w_j \qquad (21)$$

burada, G_j=j sayılı varsayım grubu; w_j=Pr(G_j), j sayılı varsayım grubunun diğerlerine göre doğru olma olasılığını yansıtan birleşik öznel olasılık, n=göz önünde tutulan varsayım takımlarının sayısıdır.

4. SİSMİK TEHLİKE HESABI İÇİN YAZILIMLAR

Sismik tehlikeyi hesaplamak için birçok yazılım geliştirilmiştir. Mevcut metodoloji ve geliştirilen bu paket bilgisayar yazılımları nedeni ile olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmalarının akademik niteliğinin azalarak mesleki bir uygulamaya dönüştüğü söylenebilir. Halen mevcut başlıca paket yazılım programları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2**.** Olasılıksal sismik tehlike analizi için başlıca paket bilgisayar yazılımları

Yazılım	Referans Kaynak	Temin Durumu	Program Lisanı
CRISIS	Ordaz, v.d.	Ücretsiz	Visual Basic
EQRM	Robinson	Açık Kaynak	Python
EZ-FRISK	R. McGuire	Ücretli	Fortran
FRISK88M	R. McGuire	Ücretli	Fortran
MoCaHAZ	S. Wiemer	Ücretsiz	Matlab
MRS	R. Laforge	Ücretsiz	C
NSHM	Frankel v.d.	Ücretsiz	Fortran, C
OHAZ	B. Zabikovic	Ücretsiz	Java
OpenSHA	E. Field	Açık Kaynak	Java
SeisRisk IIIM	Bender ve Perkins R. LaForge	Ücretsiz	Fortran
SeisHaz	M. Stirling	Ücretli	Fortran

5. AKIŞ ŞEMASI

Deprem tehlike haritasının hazırlanmasında yapılacak işlemleri özetleyen ve bu işlemlerin bilgisayar programları ile olan ilişkilerini gösteren bir akış seması aşağıda sunulmuştur. Şekil 4'de verilen akış şemasında iki adet bilgisayar programı yer almaktadır. Bu programlar şunlardır:

EQDAT: Bu program deprem veri tabanında yer alan depremleri merkez-üstü konumlarına göre sismik kaynak bölgelerine ve belirlenen faylara dağıtarak her biri için bir deprem veri tabanı oluşturmaktadır. Bu veri tabanı kullanılarak bu sismik kaynaklara ilişkin sismisite parametreleri (υ, β) hesaplanmaktadır. Bu amaçla başka bir yazılım ya da yöntem kullanılabilir.

Sismik Tehlike Hesabı İçin Yazılım: Daha önceki bölümlerde anlatılan varsayımlara ve modellere göre belirlenen bir ya da birçok noktada sismik tehlikeyi hesaplamak için uygun bir yazılım paketi. Bu yazılım paketi Tablo 2'de verilenler arasından seçilebilir.

Sismik tehlike haritalarının ortaya çıkarılması için, incelenen bölgenin belirlenen aralıktaki bir ağ ile taranarak, bu ağın düğüm noktalarındaki sismik tehlike değerlerinin olasılık dağılımının bulunması gerekir. Bulunan bu olasılık dağılımları kullanılarak arzu edilen tekerrür sürelerine karşılık gelen en büyük yatay yer ivme ve spektral ivme (ya da deprem etkinliğine ilişkin başka bir parametrenin) değerleri her düğüm noktası için seçilerek deprem tehlike haritaları çizilir. Genellikle, göz önünde tutulan tekerrür süresi 475 yıldır ve bu 50 yılda % 10 aşılma olasılığına karşılık gelmektedir. Son yıllarda 2475 yıllık tekerrür süresi (50 yılda % 2 aşılma olasılığı) için de sismik tehlike haritaları hazırlanmaktadır.

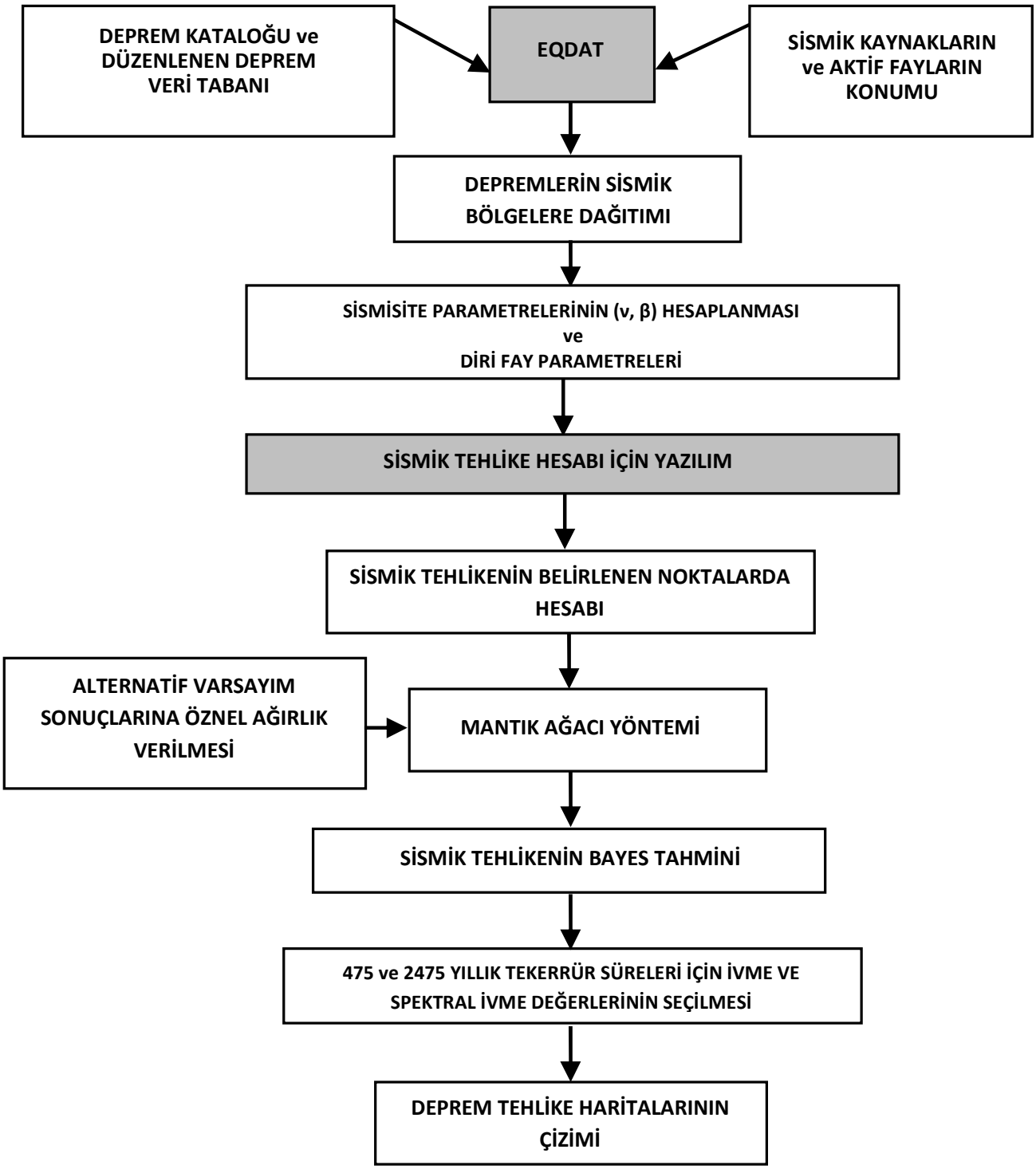
6. SONUÇ

Olasılıksal sismik tehlike analizinin uygulanmasına ilişkin bazı öneriler ve dikkat edilmesi gerekli bazı hususlar aşağıda kısaca sıralanmıştır:

(i) Yeni nesil sismik tehlike haritalarının hazırlanmasında aktif faylardan kaynaklanan sismik tehlikenin özellikle dikkate alınması ve faylarla ilgili mevcut bilgilerle uyumlu stokastik modellerin kullanılması gereklidir. Aktif faylardan kaynaklanan tehlikenin modellenmesine uygun olan karakteristik deprem modeli ile yinelenme rassal süreci bu tür çalışmalarda göz önünde tutulmalıdır.

(ii) Bir inşaat sahası için bulunacak sismik tehlike değeri, deprem sürecinin magnitüd, yer ve zaman bakımından gösterdiği doğal rassallığın yanında, sismik ve geometrik parametrelerin yerel değerlerinin tahminindeki ve kullanılan azalım ilişkisindeki belirsizliklere de bağlı olacaktır. Rassal (aleatory) ya da bilgilerin yetersizliğinden (epistemic) kaynaklanan tüm belirsizliklerin etkilerinin sismik tehlike analizine yansıtılması çok önemlidir. Bunun gerçekleştirilmesi ise olasılık ve istatistik kuram ve yöntemlerinin kullanılması ile mümkündür. Ancak bu kuram ve yöntemlerin uygulamasında öngörülen koşulların sağlanıp sağlanmadığının gerektiği gibi kontrol edilmesi şarttır.

(iii) Bir bölgedeki deprem magnitüdlerinin göreceli sıklığı, Richter (1958) tarafından önerilen doğrusal magnitüd-sıklık ilişkisi ile gösterilebilir. Bu doğrusal tekrar ilişkisi küçük ve orta magnitüdlü depremlerin sıklığının tahmininde yeterli olmakla birlikte büyük magnitüdlü ($M \geq 7$) depremlerin oluş sıklığını abartmaktadır. Parabolik ve çift doğrulu tekrar ilişkileri bu uyumsuzluğu bir ölçüde gidermektedir (Yücemen, 1982). Ancak doğrusal tekrar ilişkisi, diğerlerine oranla daha büyük risk değerleri verdiğinden, sismik tehlike analizinde bu ilişkinin kullanılması emniyetli tarafta bir varsayım olacaktır. Burada dikkat edilmesi gerekli bir husus da, Richter'in doğrusal deprem magnitüdü-sıklık ilişkisindeki a ve b parametrelerinin tahmininde hata teriminin dağılımının dikkatle incelenmesi ve normal olmayan dağılımlar için EKK (veya EÇO) tahmincileri yerine UEÇO tahmincilerinin kullanılmasıdır.



Şekil 4. Deprem tehlike haritalarının hazırlanması için yapılacak işlemleri ve kullanılacak yazılımları gösteren akış şeması

(iv) Kataloglarda yer alan değişik magnitüd ölçeklerinin tek bir magnitüd ölçeğine, örneğin moment magnitüdüne (M_w), dönüştürülmesi gereklidir. Bu amaçla geliştirilen dönüşüm ilişkilerinin elde edilmesinde yaygın olarak standart en küçük kareler regresyonu kullanılmıştır. Ancak Bölüm 2.2'de belirtilen nedenlerle ortogonal regresyon yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır. Ortogonal regresyon, çevirim ilişkilerinin eğimlerini standart en küçük kareler yöntemine göre her zaman daha büyük tahmin etmektedir. Bu nedenle büyük depremlerin magnitüdlerini geleneksel yönteme göre daha büyük vermektedir. Küçük depremler için bunun tersi geçerli olmakla birlikte, bu depremlerin sismik tehlikeye katkısı zaten oldukça küçük seviyelerde kalmaktadır. Dolayısıyla deprem tehlikesinin tahmininde ortogonal regresyonun kullanılması durumunda geleneksel yöntemin sonuçlarına göre daha emniyetli tarafta değerler elde edilecektir.

(v) Depremlerin zaman uzayında oluşumları bir Poisson süreci olarak alınabilir. Poisson dağılımı, rassal olarak oluşan büyük magnitüdlü ana şokların oluşumu için geçerli bir model olup, bu basit modelden elde edilen sonuçlar genellikle daha karmaşık bazı diğer stokastik modellerden (örneğin Markov) bulunan sonuçlarla uyum içindedir. Ancak Kuzey Anadolu ve San Andreas gibi fay zonlarında yapılan paleo-sismik çalışmalar bu faylarda belirli büyüklükteki depremlerin periyodik olarak ortaya çıktığını göstermiştir. Diğer bir deyimle, bu gibi fayların yaratabileceği ve karakteristik deprem olarak adlandırılan büyük depremlerin tekerrür süreleri daha önce meydana gelmiş büyük magnitüdlü sismik etkinlikle bağımlıdır. Bu nedenle de yinelenme modeli, Poisson modeline kıyasla karakteristik depremlerin oluşumu için daha uygun bir stokastik model olmaktadır.

(vi) Bir bölgedeki sismik tehlike tahmininin gerçeğe yakın olması için mevcut verilerin kullanılan modeli desteklemesi gerekir. Diğer yandan potansiyel sismik etkinliğin bir çok bölgede tahminini gerektiren sismik tehlike haritaları hazırlanırken, göreceli tehlike değerlerinin bilinmesi yeterli olacağından, basit Poisson modeli de kullanılabilir. Bu görüş birçok araştırmacı tarafından da kabul edilmiştir (örneğin Cornell. ve Winterstein, 1988).

(vii) Depremlerin yerel dağılımları bakımından gösterdikleri rassallık, geçmiş deprem olaylarının çizgi veya alan kaynaklarla ilişkileri kurularak çözülmüştür. Bir kaynak içindeki her yerde, sismik etkinlik aynı alınmıştır. Hesaplamaları basitleştirmek için çizgi ve alan kaynaklar, her biri nokta kaynak olarak alınabilecek küçüklükte alt kaynaklara bölünmüştür. Alt kaynakların boyutları küçültüldükçe, bu yaklaşıklıktaki hata önemsiz bir düzeye inecektir. Yapılan bu yaklaşıklıkla, azalım ilişkisindeki belirsizliğin, çizgi ve alan kaynak durumlarında analize katılmasında karşılaşılan matematiksel güçlükler giderilmiştir.

(viii) Yer hareketi tahmin modelindeki belirsizliğin sismik tehlike analizine katılması rassal düzeltme katsayısı ile gerçekleştirilmiştir. Bu belirsizliğin ölçüsü olarak, standart sapma, σ, kullanılmıştır. Benimsenen işlevsel bağıntıdan çıkarılan ortalama azalım eğrisi etrafında gözlemsel verilerin gösterdikleri saçılımdan, σ için 0.20-1.0 arasında değişen değerler araştırmacılar tarafından hesaplanmıştır. Azalım ilişkisindeki belirsizliğin sismik tehlike değerini önemli ölçüde çoğaltıcı bir etkisi olmaktadır.

(ix) Burada eldeki tüm veri ve bilgilere dayanılarak bulunan en olası parametre değerleri, "en iyi tahmin" olarak adlandırılmıştır. En iyi tahminlere dayanılarak hesaplanan sismik tehlike eğrisine de "en iyi tahmin" sismik tehlike eğrisi denilmiştir. Sismik kaynakların geometrik özelliklerinin ve sismik parametrelerin değerlerinin kesin olarak bilinmemesinden doğan belirsizliklerin hesaba katılması ise, bunlarla ilgili değişik varsayımların doğruluğuna ne ölçüde inanıldığı göz önünde tutularak bulunan bir (ağırlıklı) ortalama sismik tehlike eğrisiyle gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde bulunan sismik tehlike eğrisi de "Bayes" tahmini olarak adlandırılmıştır.

KAYNAKLAR

Akkar, S. ve Çağnan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models. *Bull. Seism. Soc. Am.* **100**:6, 2978–2995.

Akkaya, A. D. ve Tiku, M. L. (2008). Robust estimation in multiple linear regression model with non-Gaussian noise. *Automatica* **44**, 407-417.

Akkaya, A. D. ve Yücemen, M. S. (2011). Magnitüd-sıklık ilişkisi parametrelerinin robust tahmini. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ODTÜ, Ankara.

Araya, R. ve Der Kiureghian, A. (1988). Seismic Hazard Analysis: Improved Models, Uncertainties and Sensitivities, EERC Report No. UCB/EERC-90/11, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Bender, B. (1986). Modeling source zone boundary in seismic hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* **76**:2, 329-341.

Bender, B. ve Perkins, D. (1987). SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation, U.S.G.S. Bulletin 1772.

Boore, D.M. ve Joyner, W.B. (1982). The empirical prediction of ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am*. **72**:6, 43-60.

Brillenger, D. R. (1982). Some bounds for seismic risk. *Bull. Seism. Soc. Am*. **72**:4, 1403-1410.

Castellaro, S., Mulargia, F., Kagan, Y. Y. (2006). Regression problems for magnitudes. *Geophys J Int.* **165**, 913-930.

Cornell, C. A. ve Winterstein, S.R. (1988). Temporal and magnitude dependence in earthquake recurrence models. *Bull. Seism. Soc. Am.* **78**:4, 1522-1537.

Deniz, A. (2006). Estimation of Earthquake Insurance Premium Rates for Turkey, M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, METU.

Deniz, A. ve Yücemen, M. S. (2010). Magnitude conversion problem for the Turkish earthquake data. *Natural Hazards* **55:**2, 333-352.

DOE-STD-1023-95 (1995). DOE Standard: Natural Phenomena Hazards Assessment Criteria, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., (reaffirmed with Errata, April 2002).

Esteva, L. (1970). Seismic Risk and Seismic Design Decisions, in Seismic Design for Nuclear Power Plants, Ed. Hansen, R. J., MIT Press, Cambridge, Mass.

Gardner, J. K. ve Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. *Bull. Seism. Soc. Am.* **64**, 1363-1367.

Gülkan, P., Yücemen, M.S., Koçyiğit, A., Doyuran, V. ve Başöz, N. (1993). En Son Verilere Göre Hazırlanan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor No. 93.1, Ankara.

Hagiwara, Y. (1974). Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain. *Tectonophysics* **23**:3, 313-318.

Kagan, Y. Y. (2002). Aftershock zone scaling. *Bull. Seism. Soc. Am*. **92**:2, 641-655.

Kameda, H. ve Ozaki, Y. (1979). A renewal process model for use in seismic risk analysis. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyoto University **41**, 11-35.

Matthews, M. V., Ellsworth, W. L. ve Reasenberg, P. A. (2002). A Brownian model for recurrent earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**:6, 2233-2250.

McGuire, R. K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis, EERI, MNO-10, Oakland, CA.

Omori, F. (1894). On the aftershocks of earthquakes. *Journal of College of Science,* Imperial University, Tokyo, **7**, 111-200.

Prozorov, A. G. ve Dziewonski, A. M. (1982). A method of studying variations in the clustering property of earthquakes: Application to the analysis of global seismicity. *Journal of Geophysical Research* **87**(B4), 2829-2839.

Reid, H. F. (1910). The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C., **2**, 16-28.

Richter, C. F. (1958). Elementary Seismology, W.H. Freeman and Company, San Francisco.

Savage, M. K. ve Rupp, S. H. (2000). Foreshock probabilities in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* **43**, 461-469.

Schwartz, D. P. ve Coppersmith K. J. (1984). Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *J. Geophys. Res.* **89**, 5681-5698.

SSHAC Report (1997). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, NUREG/CR-6372, vol. 1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.

Stepp, J.C. (1973). Analysis of the Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area, in Contributions to Seismic Zoning, S. T. Handing (Ed.), National Oceanic and Atmospheric Technical Report EERL 267-ESL 30.

Thenhaus, P. C. ve Campell, K. W. (2003). Seismic Hazard Analysis, Chapter 8, Earthquake Engineering Hand Book, Wai-Fah Chen and Charles Schawthorn (editors), CRC Press. Turkish Natural Committee for International Decade for Natural Disaster Reduction (1989) National Plan of Turkey: 1990-2000, Ministry of Public Works and Settlement, Ankara.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H. ve Gökçeoğlu, C. (2004). An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology* **74**, 265-291.

U.S. Nuclear Regulatory Commission (1997) *Regulatory Guide 1.165 – Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion.*

Utsu, T., Ogata, Y., Matsu'ura, R. S. (1995). The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth* **43**, 1-33.

Van Dyck, J. F. M. (1985). Statistical Analysis of Earthquake Catalogs, PhD. Thesis, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Wells, D. L. ve Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**:4, 974-1002.

Wu, S.-C., Cornell, C. A., Winterstein, S. R. (1995). A hybrid model and its implication on seismic hazard results. *Bull. Seism. Soc. Am.* **85**, 1-16.

Yılmaz, N. ve Yücemen, M.S. (2008). Olasılıksal sismik tehlike sonuçlarının geri plan sismik etkinlik modellerine duyarlılığı. Yapı Mekaniği Semineri 2008, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 87-103.

Youngs, R. R. ve Coppersmith, K. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bull. Seism. Soc. Am.* **75**, 939-964.

Yücemen, M.S. (1982). Sismik Risk Analizi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 160 s.

Yücemen, M. S. ve Gülkan, P. (1994). Seismic hazard analysis with randomly located sources. *Natural Hazards* **9**, 215-233.