

Sismik Tehlike Analizi: Teori ve Uygulama

Seismic Hazard Analysis: Theory and Application

Kamil KAYABALI
Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ANKARA

ÖZ

Bu çalışmada deterministik ve probabilistik olarak ikiye ayrılan sismik tehlike analizinin esasları verilmiştir. Probabilistik yaklaşım kullanılarak bir bilgisayar programı yazılmıştır.

Programda maksimum yer ivmesine karşılık gelen dönüş periyodları ile belirli bir zaman dilimi içerisinde maksimum yer ivmesi değerlerinin aşılma ihtimali hesaplanmaktadır. Programın kolay anlaşılmasını sağlamak amacıyla bir de örnek problem sunulmuştur.

ABSTRACT

In this study, the main principles of deterministic and probabilistic seismic hazard analyses are given. A computer program was written using the principles of probabilistic approach. The program is aimed at computing return periods for peak horizontal ground acceleration (PGA) and the probability of exceedance of PGA for certain time periods. An example problem is presented to help the user better understand the program.

GİRİŞ

Büyük ölçekli mühendislik yapılarını projelendirmede önemli bir yer tutan deprem risk analizinin birinci aşamasını sismik tehlike analizi oluşturur. Belirli büyüklükteki bir depremin tekerrür aralığının hesaplanması, maksimum yer ivmesi dönüş periyodu ile yer ivmesinin aşılma ihtimalinin belirlenmesi sismik tehlike analizinin konusunu oluşturur.

Yerküre üzerinde önemli bir deprem kuşağında yer alan Türkiye'de depremler sonucu ortaya çıkabilecek can ve mal kaybının asgariye indirilebilmesi için yer seçiminde deprem tehlike (sıvılaşma, zemin amplifikasyonu gibi) analizinin titizlikle yapılması gerekmektedir. Bunun için de, zeminin maruz kalacağı deprem yükünü önceden belirlemek gerekmektedir.

Sismik tehlike analizi yapmak amacıyla bugünü kadar muhtelif yazılım paketleri geliştirilmiştir. Bu prog-

ramlardan bazıları Türkiye'nin sismik tehlike analizini belirlemek amacıyla kullanılmıştır (örnek: Gürkan vd., 1993). sismik tehlike analizinin gerekli olduğu hallerde bu tür yazılım paketlerine erişmek her halde mümkün olmayabilir. Bu tür programlar çoğu zaman ticari amaçla yazılmaktadır. Ancak, bazılarının kaynak kodlarına yayınlanmış çalışmalarda rastlamak mümkündür. Sözgelimi SEIRISK III adlı sismik tehlike analiz programının kaynak kodu Bender ve Perkins (1987) tarafından verilmiştir.

Bu tür programların kaynak kodla genellikle çok uzun ve karmaşık olmaktadır. Program kullanıcısının kullandığı program üzerinde kendi amacına yönelik bazı değişimleri yapabilmesi her durumda mümkün olmaktadır. Bu hususları göz önünde bulundurarak SİS-TEHAN (Sismik Tehlike Analizi) adlı bir program geliştirilmiştir. Programın yazılmasında mümkün oldu-

ğunca kısa ve kolayca anlaşılabilir olması amaçlanmıştır.

SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

Sismik tehlike analizinin amacı zeminin ve mühendislik yapısının gelecekte maruz kalacağı depremsel yüklemeye şartlarının hesaplanmasında gerekli olan depremsel yer hareketi ile ilgili parametrelerin (ivme, hız, deplasman) hesaplanmasıdır. Sismik tehlike analizi genellikle iki farklı başlık altında mütalaa edilmektedir: Deterministik ve probabilistik sismik tehlike analizi.

DETERMINİSTİK SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

Bu yaklaşımda önce proje sahasını etkileyebilecek deprem kaynaklarından daha önceden meydana gelmiş en büyük depremleri ortaya koymak gereklidir. Eğer deprem kayıt tarihçesi yeterince eski değil veya deprem kayıtlarında bazı eksiklikler söz konusu ise en büyük deprem değeri, yerine göre 0,5-1 birim arasında arttırılabilir. İkinci aşamada ise, proje sahasının bulunduğu bölgenin karakteristiklerine en uygun azalım ilişkisi seçilir. Proje sahasına belirli bir uzaklıkta bulunan deprem kuşağındaki maksimum büyüklükteki depremin proje sahasında anakayada oluşturacağı maksimum yer ivmesi, azalım ilişkisi yoluyla hesaplanır (Şekil 1). Bu yaklaşımın oldukça pratik olması yanında en büyük dezavantajı proje sahasını etkileyecek maksimum yer ivmesi değerinin ortaya konulmasında rol oynayan belirsizliklerin yeterince hesaba katılamamasıdır.

PROBABİLİSTİK SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ

Probabilistik yaklaşım sismik tehlike analizindeki belirsizlikleri kantitatif olarak hesaba katmasından dolayı deterministik yaklaşımdan daha çok tercih edilmek-

tedir. Deterministik yaklaşıma kıyasla çok daha fazla çaba gerektiren probabilistik yaklaşımın avantajları şöyle sıralanabilir:

-sismik tehlikeyi dönüş periyodu şeklinde kantitatif olarak hesaplar,

-tarihsel deprem kayıtlarını hesaba katar,

-analistin deneyim ve yargısını kullanmasına izin verir,

-fay lokasyonu ile ilgili eksik verileri dikkate alır,

-sismik tehlikeyi spektral ivme, hız, deplasman ve şiddet cinsinden verme esnekliğine sahiptir (TERA Corp., 1980).

Probabilistik sismik tehlike analizi aşağıda sıralanan aşamalardan oluşur:

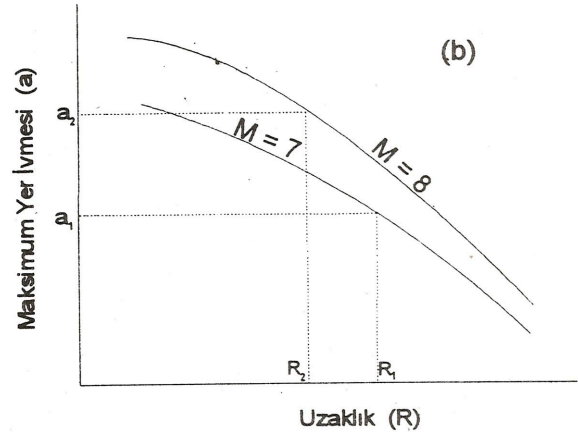
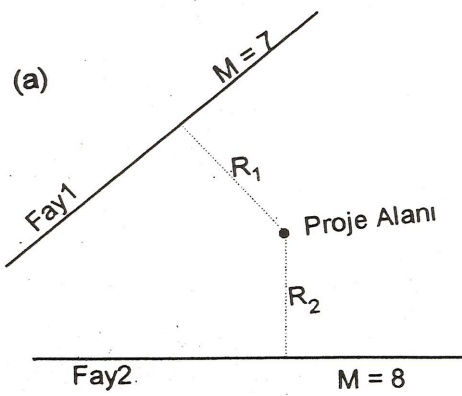
-deprem kaynaklarının geometrisinin ortaya konulması,

-herbir deprem kaynağının magnitüd-frekans ilişkisinin belirlenmesi,

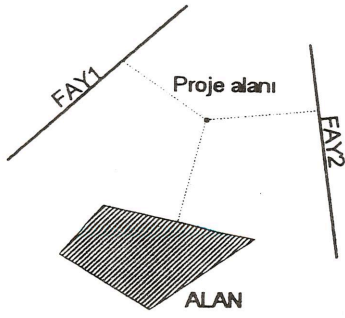
-analizde kullanılacak azalım ilişkisinin seçimi ve

-yer hareketinin aşılma ihtimalinin hesaplanması (Şekil 2).

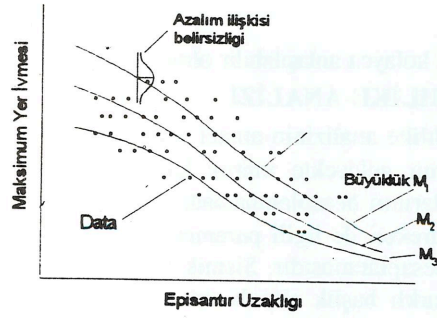
Probabilistik yaklaşım aynı zamanda depremlerin zamana bağlı olarak meydana gelişini temsil eden bir stokastik metoddan da faydalanır. Yayınlanmış stokastik metodlar arasında en basit olanı ve sıkça kullanılanı Poisson modelidir. Bu modele göre deprem oluşumu zaman ve mekandan bağımsız olup, iki sismik olayın aynı yer ve zamandan oluşma ihtimali sıfıra yaklaşır. Poisson modeli ile verilen probabilitate dağılımı aşağıda-



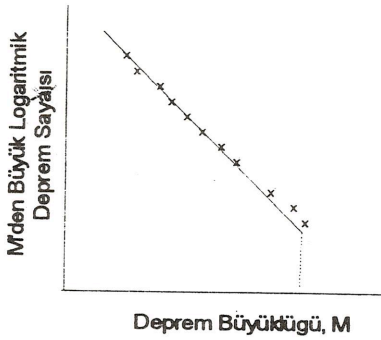
Şekil 1. Deterministik yaklaşımın aşamaları: a) deprem oluşturan kaynağın proje alanına uzaklığının belirlenmesi, b) azalım ilişkileri kullanarak proje alanında oluşacak maksimum yer ivmesinin bulunması.



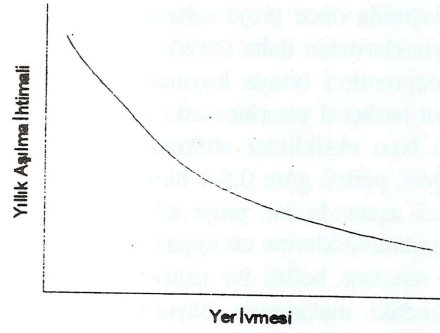
Aşama 1. Deprem kaynaklarının belirlenmesi
Stage 1. Determination of earthquake sources.



Aşama 3. Azalım ilişkisinin belirlenmesi.
Stage 3. Determination of attenuation relationship.



Aşama 2. Deprem büyüklüğü tekrürünün belirlenmesi.
Stage 2. Determination of magnitude recurrence.



Aşama 4. Tehlike eğrisinin değerlendirilmesi.
Stage 4. Evaluation of the hazard curve.

Şekil 2. Probabilistik sismik tehlike analizinin aşamaları (Araya ve Der Kiureghian, 1988'den).

ki bağıntı ile ifade edilir:

$$P(N_t = n) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Burada N_t belirli bir zaman aralığındaki (0,t) oluşum sayısı ve λ ise ortalama oluşum oranı ya da birim zaman içindeki oluşum sayısıdır. T_1 ilk olayın (veya depremin) oluşum zamanı olsun. $T_1 > t$ halinde t zamanı içinde hiçbir olayın meydana gelmediği gözlenir. Böylece

$$P(T_1 > t) = P(N_t = 0) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

bağıntısı elde edilir.

Probabilistik sismik tehlike analizinde yer ivmesi azalım ilişkilerindeki belirsizliğin de göz önünde bulundurulması bakımından Poisson dağılımı ve Normal dağılımın birlikte kullanılması söz konusudur. Yer iv-

mesi azalım ilişkilerindeki belirsizlik genellikle lognormal (logaritmik normal) dağılım ile ele alınmaktadır. Normal dağılım eğrisi ve ilgili parametreler Şekil 3'de verilmiştir.

Normal dağılımdaki parametreler sırasıyla X = normal dağılımdaki rastgele değişkeni,

μ_x = aritmetik ortalama,

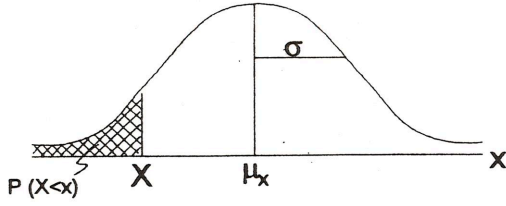
σ_x = standart sapmadır.

Normal dağılımdaki dönüşüm rastgele değişkeni ($\sigma_x^2 = 1$ ve $\mu_x = 0$ iken)

$$u = \frac{(X - \mu_x)}{\sigma_x}$$

olarak ifade edilir.

Lognormal dağılımda normal rastgele değişken $X = \ln A$ şekline dönüşür. Lognormal dağılımın standart sapması $\sigma_{\ln a}$ olup aritmetik ortalaması da



Şekil 3. Normal dağılım eğrisi ve ilgili parametreleri.

$$\mu_x = 1n\mu_a - \frac{1}{2} \sigma_{1n a}^2$$

bağıntısı ile ifade edilir. (4) no'lu bağıntıdaki μ_a a'nın (bu durumda yer ivmesi) aritmetik ortalamasıdır. Normal rastgele değişken u ise lognormal dağılımda

$$u = \frac{1n A - \mu_x}{\sigma_{1n a}} = \frac{1n A - 1n\mu_a + 0.5\sigma_{1n a}^2}{\sigma_{1n a}}$$

şekline dönüşür (Şekil 4).

(0,t) zaman aralığında proje sahasını etkileyecek a değerini aşan hiçbir depremin olmama ihtimali Poisson dağılımında

$$P_t(A \geq a) = e^{-\lambda_a t} \quad (6)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Bu bağıntıda

$$\lambda_a = \sum_i \sum_j \sum_k \lambda_{ijk} q_{ij} \quad (7)$$

olarak verilir ve proje alanı için a değerini aşmayan bütün depremlerin ortalama sayısı olarak ifade edilir. Alt yazmaları sırasıyla mesafe, magnitüd ve deprem kaynağını temsil ederler. q_{ij} ise belirli bir mesafe ve magnitüd değeri için yer ivmesinin aşılma ihtimalidir. (0, t) zaman aralığında proje sahasını etkileyecek a değerini aşan en az bir depremin olma ihtimali de

$$P_t(A \geq a) = 1 - e^{-\lambda_a t} \quad (8)$$

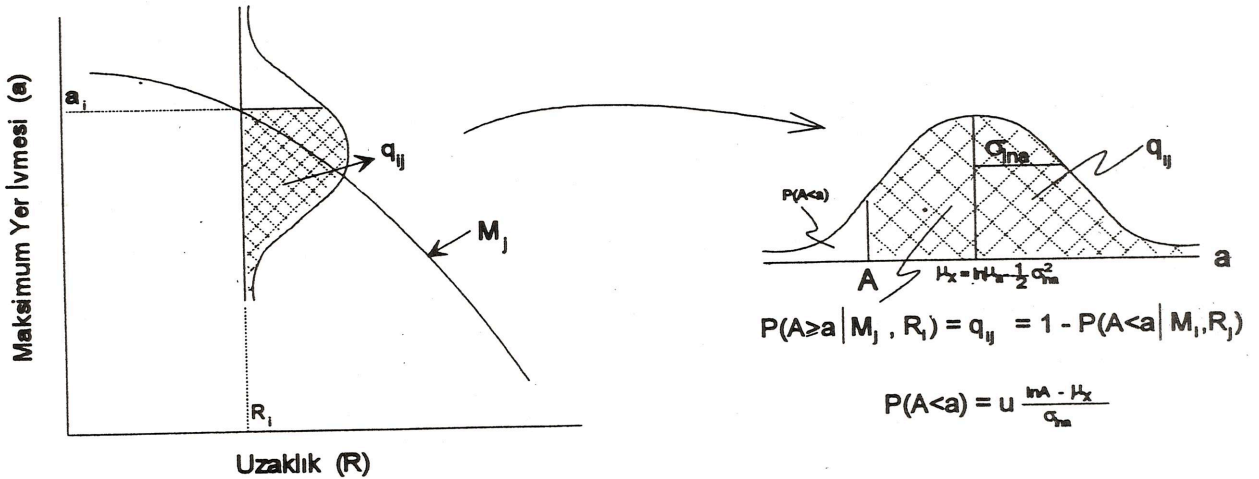
bağıntısı ile ifade edilir. λ_a ile dönüş periyodu (DP) arasında ilişki

$$DP = 1/\lambda_a$$

şeklindedir.

Sismik tehlike analizindeki önemli adımlardan biri, proje sahasına etkiyecek olan sismik zonlar ile aktif fayların sağlıklı bir şekilde belirlenmesidir. Deprem kaynak zonları geometri itibariyle nokta, çizgi ve alan şeklinde olabilir. Deprem oluşturabilen aktif volkanların bulunduğu yerler nokta tipi deprem kaynağına örnek gösterilebilir. Çizgisel kaynak daha çok faylar üzerinde dar ve uzunca alana yayılmış deprem kaynaklarını karakterize eder. Alan tipi kaynaklar ise genellikle irili ufaklı fayların bulunduğu bir alanda belirli bir patern oluşturmayan deprem episantırlarını çevreleyen deprem kaynağıdır.

Deprem kaynaklarının sismik ve tektonofizik davranışı bu kaynakların frekans-magnitüd ilişkileri ile tanımlanmaktadır. Bu tür bir ilişki, deprem tekerrür aralığını ve tehlikesini belirlemede temel unsuru oluşturduğu için sismoloji ve mühendislik dallarında sürekli bir araştırma konusu olagelmıştır (Araya ve Der



Şekil 4. Yer ivmesinin aşılma ihtimalinin hesaplanmasında kullanılan aşamaları gösteren grafik.

Kiureghian), 1988). Deprem oluşum frekansının deprem magnitudü ile ilişkisi genellikle Gutenberg-Richter bağıntısı olarak bilinen aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

$$\log N(M) = a - bM \quad (10)$$

Burada, $\log N(M)$ = belirli bir alanda ve zaman aralığındaki (çoğu zaman 1 yıl) M ' e eşit veya daha büyük deprem sayısı, 10^a = sıfırdan büyük magnitudlü depremlerin toplam sayısı, b = frekans-magnitud eğrisinin eğimidir.

Deterministik yaklaşımda olduğu gibi probabilistik yaklaşımda da bir deprem kaynağında oluşabilecek maksimum deprem büyüklüğünü belirleme zorunluluğu vardır. Deprem katalog verilerinin ihtiyaca cevap vermediği durumlarda Polo ve Slemmons (1990)'ın teklif ettiği maksimum deprem büyüklüğünü belirleme metodlarına başvurulabilir.

Bir deprem kaynağında herhangi bir noktada meydana gelen depremden kaynaklanacak yer hareketinin (çoğu zaman ivme) proje sahasındaki amplitüdü çoğu zaman bir azalım (atenasyon) ilişkisi ile belirlenir. Azalım ilişkileri genel olarak aşağıdaki bağıntıda verilen formatta verilir:

$$\log Y = a + bM + d \log \{R + c(M)\} + d'R + \epsilon \quad (11)$$

Burada Y = yer hareketi parametresi, M = deprem büyüklüğü, ϵ ise rastgele hata parametresidir. a , b , c , ve d' katsayıları çoğu zaman empirik verilerden elde edilir, (EERI Committee on Seismic Risk, 1989). Azalım ilişkileri konusunda bugüne kadar yapılan çalışmaların özetini Campbell (1985) ve Joyner ve Boore (1988)'de bulmak mümkündür.

Probabilistik sismik tehlike analizinde hangi azalım ilişkisinin kullanılacağı önemli bir araştırma konusudur. Gözönünde bulundurulması gereken önemli bir husus, proje sahasına uygulanacak en uygun azalım ilişkisinin seçilmesidir. Eğer proje sahasını kuşatan alan için bir azalım ilişkisi geliştirilmemişse sismotektonik açıdan proje sahasının özelliklerine benzer bölgeler için geliştirilmiş azalım ilişkileri kullanılmalıdır.

Sismik tehlike analizi yapmak üzere geliştirilmiş birçok program vardır. Bunlardan birkaçının özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

EQRISK Anderson (1978) tarafından geliştirilmiş ve kuvvetli yer hareketinin tekdüze tehlike spektrumunu

hesaplama kullanılmaktadır.

STASHA Chiang vd. (1984) tarafından geliştirilmiş ve üç temel kısımdan meydana gelir: a) data analizi, b) sismik kaynak modellemesi, c) sismik tehlike hesabı. Program deterministik ve probabilistik analizlerin her ikisini de yapabilmektedir.

SEIRISK III Bender ve Perkins (1987) tarafından geliştirilmiş ve sismik tehlike haritalaması yapmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu programın önceki sürümlerine göre (SEIRISK I ve II) deprem lokasyonu belirlenmesini de hesaba katması bakımından farklılık gösterir.

SEISPACK adlı program beş ayrı yazılım paketinden meydana gelmiş olup Gülkan vd. (1993) tarafından Türkiye'nin deprem bölgelerini haritalamada kullanılmıştır.

Bir proje alanı için elde edilen sismik tehlike analiz sonuçları genellikle iki şekilde değerlendirilir. Birincisinde sonuçlar bir dönüş periyodu-maksimum yer ivmesi grafiği şeklinde sunulur (Şekil 5). Probabilistik sismik tehlike analizinde bütün belirsizliklerin hesaba katılmasıyla "en iyi tahmin" eğrisi elde edilmeye çalışılır. Sonuçların ikinci sunum şekli ise belirli t zamanlarına karşılık gelen aşılma ihtimali-maksimum yer ivmesi grafiğidir (Şekil 6).

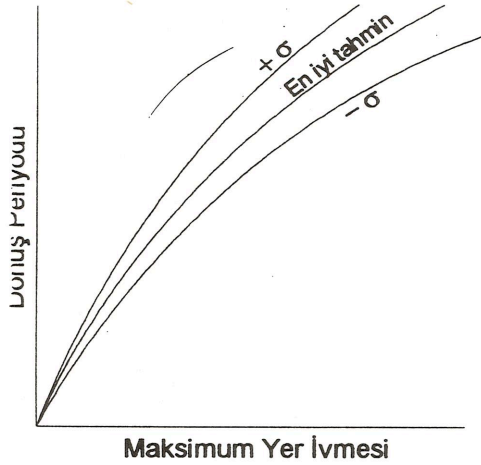
Eğer sismik tehlike analizi belirli bir grid oluşturan pekçok sayıda nokta için hesaplanırsa belirli dönüş periyodları ya da aşılma ihtimaline göre beklenen kuvvetli yer hareketi bir harita üzerinde konturlama ile gösterilebilir (Örnek: Gürkan vd., 1993; Algermissen vd., 1982).

SİSMİK TEHLİKE ANALİZ PROGRAMI: SISTEHAN

SISTEHAN, bir nokta için probabilistik sismik tehlike analizi yapmak amacıyla yazılmış bir programdır. Program yazımında FORTRAN 77 programlama dili kullanılmıştır. Program başlıca aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır:

- ana program
- program parçası (SOBRoutine) OKUYUCU
- " " MSFMAT
- " " MAGMAT
- " " İVMAT
- " " (FUNCTION) FI

Programın kolayca anlaşılabilmesini sağlamak ama-



Şekil 5. Probabilistik yaklaşımla elde edilen sonuçların dönüş periyodu-maksimum yer ivmesi şeklinde sunulması.

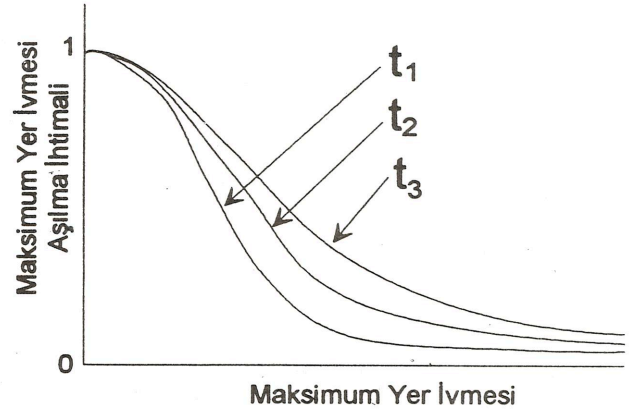
çıyla bir örnek problem hazırlanmıştır (Şekil 7). Programda kullanılan koordinat sistemi pozitif dikdörtgen koordinat sistemi olup yerin küreselliğinden kaynaklanan etkiler hesaba katılmamıştır. Koordinatların belirlenmesinde proje alanı ve sismik kaynakların konfigürasyonunu belirledikten sonra oluşacak bir dikdörtgenin sol alt köşesini referans noktası olarak almak oldukça kolaylık sağlayacaktır.

Program SISTEHAN; içerisinde değişiklik yapmak isteyen kullanıcıya kolaylık sağlamak amacıyla içeriğinin hemen her aşamasında açıklamalar verilmiştir.

Ana programın birinci temel fonksiyonu subroutine'leri çalıştırmaktan ibarettir. Subroutine'ler yoluyla gerekli matrisler oluşturulduktan sonra muhtelif maksimum yer ivmesi değerlerinin dönüş periyodları ile aşılma ihtimalleri hesaplanır ve sonuçlar ilgili dosyalara yazılır.

Subroutine OKUYUCU; proje alanının koordinatlarını, deprem kaynak sayısını, her bir deprem kaynağının köşe sayısı ve bu köşelerin koordinatlarını, deprem kaynaklarının yaklaşık orta nokta koordinatlarını, her bir deprem kaynağının a ve b katsayıları ile analize tabi tutulacak minimum ve maksimum deprem büyüklüklerini, analizde kullanılacak hücre boyutunu, magnitüd artış miktarını, analizde göz önünde bulundurulacak minimum ve maksimum yer ivmesi ile ivme artış değerini, pik yatay yer ivmesinin standart sapmasını ve aşılma ihtimali hesabı için zaman periyodunu DATAGIR isimli veri dosyasından okur.

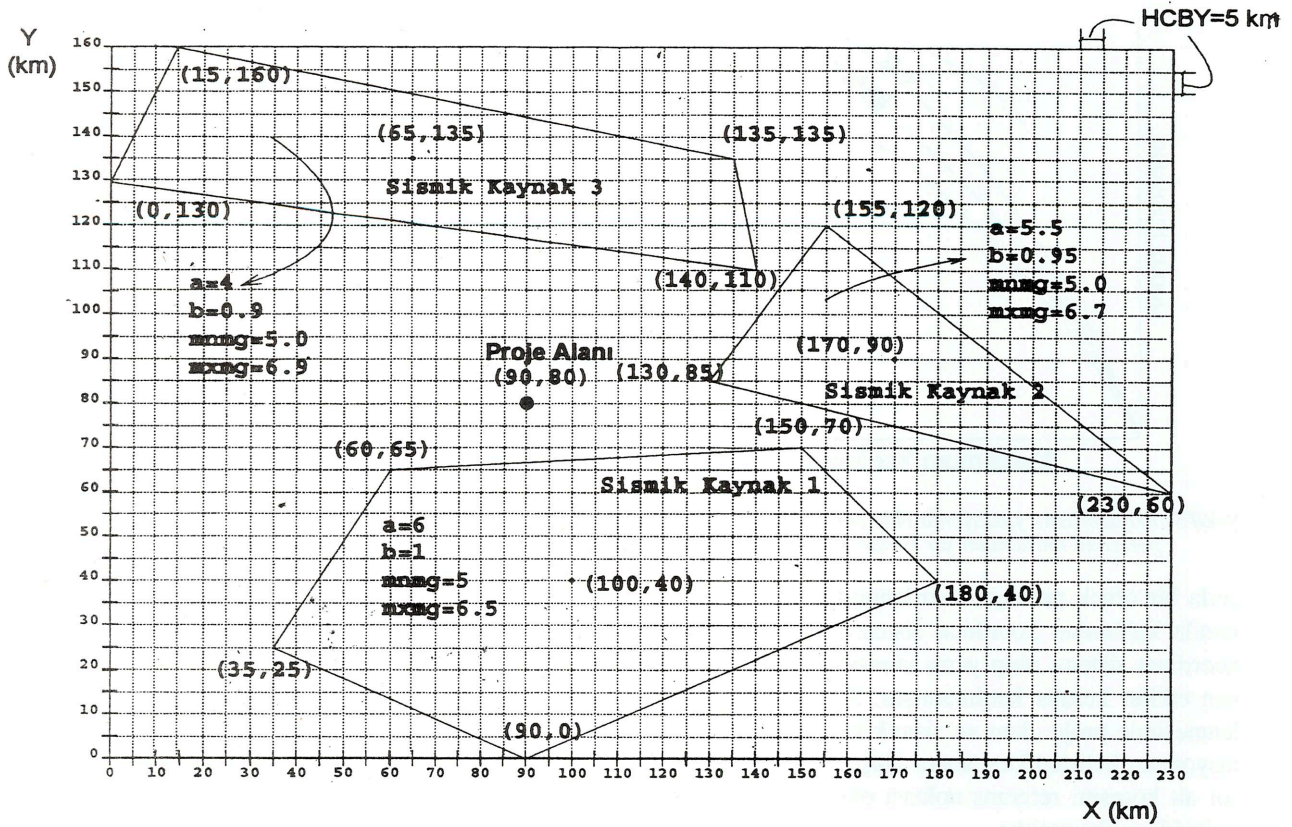
Subroutine MSFMAT; programın en uzun bölümünü oluşturur. Bu program parçasında yapılmak istenen, her bir deprem kaynağını karelere bölmek suretiyle



Şekil 6. Probabilistik yaklaşımla elde edilen sonuçların aşılma ihtimali-maksimum yer ivmesi grafiği şeklinde sunulması.

oluşturulan hücrelerin orta noktalarının proje alanına uzaklığını hesaplayarak bir matris içerisinde toplamaktan ibarettir. Bu program parçasında yapılan işlemlerin sırası aşağıdaki gibidir:

- kaynak alanın kenar uzunluklarının hesaplanması,
- kaynak alanın köşeleri arasında en küçük ve en büyük x ve y koordinatlarının hesaplanması,
- kaynak alanın bütün köşelerini içine alan en küçük dikdörtgenin oluşturulması (Şekil 8),
- oluşturulan dikdörtgenin daha önceden belirlenmiş olan hücre boyutuna göre karelere bölünmesi (Şekil 8) (hücre boyu genellikle 5 km ya da 1-10 km arasında seçilirse amaca uygun olacaktır),
- oluşan karelerin orta noktalarının koordinatlarının belirlenmesi,
- kaynak alanın kenarları üzerinde belirli aralıklarla noktalar oluşturulması (Şekil 8) (hücreboyunun yarısı kadar nokta aralığı amaca uygundur),
- kenar üzerinde oluşturulan bu noktaların koordinatlarının belirlenmesi,
- hücrelerin (karelerin) orta noktalarının kaynak alan yaklaşık orta noktasına olan uzaklıklarının (a olsun) kenar çizgisi üzerinde oluşturulan noktaların kaynak yaklaşık merkezine olan uzaklığıyla (b olsun) karşılaştırılması (a < b ise hücre kaynak alan içinde, değilse dışarıda bırakılır) (Şekil 8, 9 ve 10).
- kaynak alan içinde kalan hücrelerin koordinatlarının belirlenmesi ve
- kaynak alan içinde kalan hücrelerin orta noktaları-



Şekil 7. Örnek olarak sunulan probleme ait verilerin koordinat sisteminde gösterilmesi.

nın proje alanına olan uzaklığının hesaplanarak bir matris içinde toplanması.

Subroutine MAGMAT adlı program parçası ile her bir deprem kaynağı için belirlenmiş olan minimum magnitüd-maksimum magnitüd aralığı dm kadar parçalara bölünür. Her bir dm aralığının alt ve üst magnitüd sınırlarına karşılık gelen deprem sayısı bulunur. Alt ve üst sınırlarda oluşan deprem sayılarının farkı, dm aralığı için yıllık deprem sayısını (lamda) verecektir (Şekil 11). Bu işlem her bir kaynak alan için tekrar edilir ve elde edilen değerler bir matris içinde toplanır.

Subroutine IVMAT program parçasıyla daha önceden mesafe ve magnitüd matrislerinde kaydedilen değerler Joyner ve Boore (1988) azalım ilişkisine uygulanarak bir maksimum yer ivmesi matrisi oluştururlar. Joyner ve Boore azalım ilişkisi sadece örnek olarak göstermek amacıyla seçilmiş olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\log y = a + b(M-6) + c(M-6)^2 + d \log r + kr + s \quad (12)$$

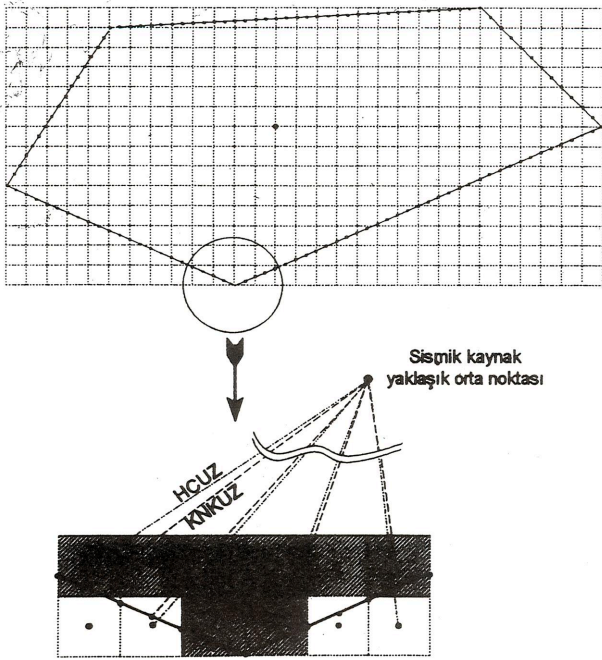
Burada, y = maksimum yatay yer ivmesi (g cinsinden), M = deprem büyüklüğü, a = 0.43, b = 0.23, c = 0.0, d = -1.0, k = -0.0027, s: zemin etkisini hesaba katan parametre (anakaya için s=0) ve

$$r = (r_0^2 + h^2)^{1/2}$$

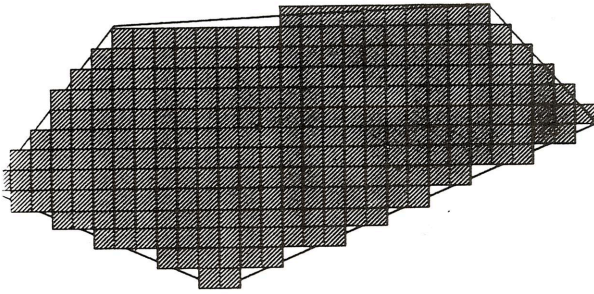
Bu bağıntıda r_0 = proje alanı ile episantır arasındaki en kısa mesafe (km) ve $h = 8.0$ 'dir.

Joyner ve Boore (1988)'un teklif ettiği (12) no'lu bağıntı $5 \leq M \leq 7.7$ deprem büyüklükleri için geçerlidir. Joyner ve Boore bağıntısı için maksimum yer ivmesi standard sapması $\sigma_{\log y} = 0.28$ (ya da $\sigma_{1ny} = 0.645$) olarak verilmiştir.

Başka bir azalım ilişkisi kullanmak gerektiğinde Subroutine IVMAT'ı seçilen azalım ilişkisine göre değiştirmek kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca, seçilecek başka azalım ilişkisine ait standart sapmayı da uygun şekilde veri dosyasına (datagir) koymak gereklidir. Birden



Şekil 8. Sismik kaynağın içinde kalan hücreleri belirlemede kullanılan mantığın şematik gösterimi.

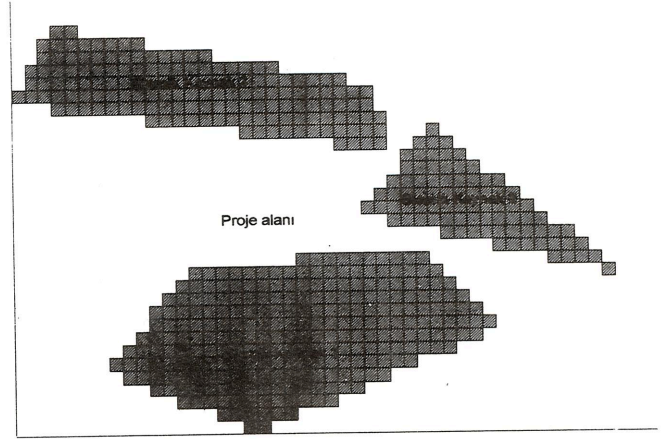


Şekil 9. Poligon (üçgen, beşgen, vs) şeklinde tanımlanan sismik kaynağın orjinal sınırları ile sismik kaynak için tutulmuş olan hücrelerin karşılaştırmalı olarak gösterimi.

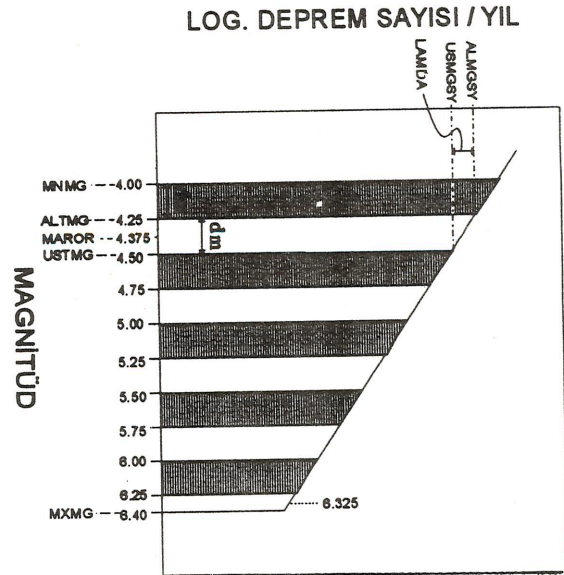
fazla azalım ilişkisi kullanmak suretiyle sonuçları karşılaştırmalı olarak elde etmek mümkündür. Bunun için yine programda değişiklik yapılması gereklidir.

Function FI program parçasıyla ana program içinde hesaplanan U'ya karşılık gelen probabilitte değeri hesaplanmaktadır.

Program SISTEHAN'ın kaynak kodu EK-1'de sunulmuştur. Program kişisel bilgisayarda (PC) kullanılmak üzere yazılmıştır. Mainframe sistemlerinde kullanılabilmesi program içerisinde küçük bir değişiklik yapılmasını gerektirebilir. PC ile kullanılmak istendiğinde



Şekil 10. Bütün sismik kaynakların hücrelere bölünmüş olarak temsil edilmesi.



Şekil 11. Magnitüd matrisi oluşturulmasında kullanılan deşiklenlerin şematik gösterimi.

kaynak kodunun bir derleyici ile koşturulabilir (.exe) şekle getirilmesi gereklidir. 486/66 türündeki bir PC'de programın çalışma süresi 15 saniyenin altındadır.

EK-1'de verilen kaynak kodu koşturulabilir hale getirildikten sonra programdan elde edilen sonuçlar dönüş periyodu-maksimum yer ivmesi şeklinde birinci çıktı dosyasında (sonuç 1) saklanır. Belirli bir zaman dilimi için hesaplanan aşılma ihtimalleri de ikinci çıktı dosyasına (sonuç 2) yazılır.

Hazırlanan örnek probleme ait verilerin muhafaza edildiği dosyanın örneği EK-2'de; Dönüş periyodu-

ivme hesabı için elde edilen sonuçların listesi EK-3'te ve aşılma ihtimali-yer ivmesi için elde edilen sonuçların listesi EK-4' te sunulmuştur.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Sismik tehlike analizini probabilistik yaklaşımla hesaplamak amacıyla çekirdek sayılabilecek kısa ve kolay anlaşılabilir bir program hazırlanmıştır. Programda, belirli büyüklükteki yer ivmesi değerlerine (cm/sn^2) karşılık gelen dönüş periyodları ile belirli bir zaman periyodu içerisinde maksimum yer ivmesinin aşılma ihtimalinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Sismik tehlike analizindeki input parametreleri oluşturan kaynak alan sınırları, kaynak alan için minimum ve maksimum magnitüd değerleri ve a ve b katsayıları ile azalım ilişkilerinin sonuçlar üzerindeki etkisi büyüktür. Başlıca 3 ana grupta toplanan belirsizlikleri hesaba katmakla elde edilecek sonuçların daha güvenilir olacağı aşikardır.

Proje alanı ile sismik kaynakların koordinatları pozitif dikkörtgen koordinat sistemine göre hazırlanmıştır. Bölgesel ölçekteki problemlerde kullanıcının yerin küreselliğini de hesaba katması gerekebilir.

DEĞİNİLEN BELGELER

- Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Thenhaus, P.C., Hanson, S.L., and Bender, B.L., 1982, Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocity in rock in the contiguous United States: U.S. Geological Survey Open-File Report, 82-1033.
- Anderson, J.G., 1978, Program EQRISK: A computer program for finding uniform risk spectra of strong earthquake ground motion: Report, U. of Southern California, Dept. of Civil Engineering.
- Araya, R. and Der Kiureghian, A., 1988, Seismic hazard analysis; improved models, uncertainties and sensitivities. Earthquake Engineering Research

Center, Report No. UCB/EERC-90/11, University of California, Berkeley, CA, 155 p.

Bender, B. and Perkins, D.M., 1987, SEIRISK III: A computer program for seismic hazard estimation: U.S. Geol. Surv. Bull. No.1772.

Campbell, K.W., 1985, Strong motion attenuation relations a ten-year perspective: Earthquake Spectra, 1(4), 759-804.

Chiang, W-L., Guidi, G.A., Mortgart, C.P., Schoof, C.C. and Shah, H.C., 1984, Computer programs for seismic hazard analysis: A User Manual, Report No.62, The J. A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, California.

EERI Committee on Seismic Risk, 1989, The basics of seismic risk analysis: Earthquake Spectra, 5(4), 675-702.

Gülkan, P., Koçyiğit, A., Yüçemen, M.S., Doyuran, V. ve Başöz, N., 1993, en son verilere göre hazırlanan Türkiye deprem bölgeleri haritası: ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, Rapor No. 93-01.

Joyner, W.B. and Boore, D.M., 1988, Measurement, characterization and prediction of strong ground motion: Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2, Recent Advances in Ground Motion Evaluation, 43-102.

Polo, C.M. and Slemmons, D.B., 1990, Estimation of earthquake size for seismic hazards, in Krietzsky, E.L. and Slemmons, D.B., editors, Neotectonics in Earthquake Evaluation: Reviews in Engineering Geology, 8, 1-28.

TERA Corporation, 1980, Seismic hazard analysis for the Savannah River Plant, South Carolina: Report by TERA Corporation, 2150 Shattuck Ave. Berkeley, California.

Sismik Tehlike Analizi

EK-1 Program SISTEHAN'ın kaynak kodu

*

*

PROGRAM SISTEHAN

*

*

*

Ana programda kullanılan değişken ve matrislerin tanımı:

*

* IVSAY : Analize tabi tutulan minimum ve maksimum ivme değerleri arasında IVAR ile belirlenen ivme sayısı

* A : Dönüş periyodu veya ihtimal hesabında kullanılan ivme (cm/sn²)

* MNIV : Deprem tehlike analizinde hesaba katılan minimum ivme (cm/sn²)

* IVAR : " " " " ivme artışı (cm/sn²)

* KYSYS : Sismik kaynakların toplam sayısı

* SAYHC : Sismik kaynak için hücre sayıcısı

* SAYMAR : " " " " magnitüd aralık sayıcısı

* U : Normal dağılım dönüşüm rastgele değişkeni

* YERIVM : Azalım ilişkisi ile hesaplanan maksimum yer ivmesi (cm/sn²)

* SIGLNA : Azalım ilişkisi standart sapması

* QIJ : Belirli bir ivme değerinin azalım ilişkisi ile belirlenen ivme değerinden küçük olma ihtimali

* KURLAM : Lamda değerlerini kümülatif olarak toplar

* G : İvme değerlerini yerçekim ivmesi yüzdesine dönüştürür

* DP : Yerçekim ivmesinin dönüş periyodu

*

program SISTEHAN

real r(10,1000),mgn,maror(10,20),ktsa(10),ktsb(10),mnmg(10),

+ mxmg(10),lksx,lksy,hcby,kynkx(10,8),kynky(10,8),mrx(10),

+ mry(10),yerivm(10,1000,20),lamda(10,1000,20),dm,mniv,mxiv,

+ ivar,siglNa,a(50),qij,kurlam(50),dp(50),probiv(50),g,u,zaman

integer ksys,sayhc(10),saymar(10),kksys(8),ivsay

common /cmn1/ksys,sayhc,r,saymar,mgn,maror

common /cmn2/dm,ktsa,ktsb,mnmg,mxmg

common /cmn3/lksx,lksy,hcby,kksys,kynkx,kynky,mrx,mry

common /cmn4/mniv,mxiv,ivar,siglNa,ivsay,zaman

common /cmn5/yerivm,lamda

open(10,file='sonuc1')

open(11,file='sonuc2')

call dataoku

call msfmat

call magmat

call ivmat

write (10,*) (a) a(g) Dönüş Periyodu'

write (11,*) (a) a(g) Aşılma İhtimali'

do 50 n = 1,ivsay

a(n) = mniv+(n-1)*ivar

do 30 i = 1,ksys

do 20 j = 1,sayhc(i)

do 10 K = 1,saymar(i)

*

* Normal dağılım dönüşüm rastgele değişkeninin (u) hesaplanması

*

u = (log(a(n))-(log(yerivm(i,j,k))-5*siglNa**2))/siglNa

*

* P (A >= a) = qij ya da P (A < a) = 1-qij ihtimalinin hesaplanması

*

qij = 1-fi(u)

*

* Lamdanın kümülatif olarak hesaplanması

*

kurlam(n) = kurlam(n)+lamda(i,j,k)*qij

10 continue

20 continue

Sismik Tehlike Analizi

```
30 continue
   g = a(n)/980.665
*
*
* Dönüş periyodunun hesaplanması
*
   dp(n) = 1./kumlam(n)
   write (10,40) a(n),g,dp(n)
*
* Aşılma ihtimalinin hesaplanması
*
   probiv(n) = exp(-kumlam(n)*zaman)
   probiv(n) = 1-probiv(n)
   write(11,45) a(n),g,probiv(n)
40 format (1x,f7.2,5x,f6.4,5x,f10.3)
45 format (1x,f7.2,5x,f6.4,5x,f10.3)
50 continue
   end
*****
*
*           SUBROUTINE DATAOKU
*
*****
* Program parçasında kullanılan değişken ve matrislerin tanımı
*
* LKSX : Proje sahası x koordinatı
* LKSY : " " y "
* HCBY : Hücre boyutu (km)
* DM : Magnitüd artış miktarı
* KKSYS : Sismik kaynak köşe sayısı
* KYNKX : " " köşesi x koordinatı
* KYNKY : " " y
* MRX : Sismik kaynak yaklaşık orta noktası x koordinatı
* MRY : " " y
* KTSA : " " a katsayısı
* KTSB : " " b
* MNMG : " " için deprem tehlike analizinde hesaba katılacak
*           minimum deprem büyüklüğü
* MXMG : Sismik kaynak için deprem tehlike analizinde hesaba katılacak
*           maksimum deprem büyüklüğü
* MXIV : Deprem tehlike analizinde hesaba katılan maksimum ivme (cm/sn2)
*
*****
subroutine dataoku
  real r(10,1000),mgn,maror(10,20),dm,ktsa(10),ktsb(10),mnmng(10),
+   mxmg(10),lksx,lksy,hcby,kynkx(10,8),kynky(10,8),mrx(10),
+   mry(10),mniv,mxiv,ivar,siglna,zaman
  integer ksys,sayhc(10),saymar(10),kksys(8),ivsay
  common /cmn1/ksys,sayhc,r,saymar,mgn,maror
  common /cmn2/dm,ktsa,ktsb,mnmng,mxmg
  common /cmn3/lksx,lksy,hcby,kksys,kynkx,kynky,mrx,mry
  common /cmn4/mniv,mxiv,ivar,siglna,ivsay,zaman
  open (20,file='datagir')
  read (20,*) ksys,lksx,lksy,hcby,dm
  do 110 i = 1,ksys
    read(20,*) kksys(i),(kynkx(i,j),kynky(i,j),j=1,kksys(i)),
+   mrx(i),mry(i)
110 continue
  do 120 j = 1,ksys
    read (20,*) ktsa(j),ktsb(j),mnmng(j),mxmg(j)
120 continue
  read (20,*) mniv,mxiv,ivar,siglna
  ivsay = (mxiv-mniv+ivar)/ivar,zaman
  return
end
```

Sismik Tehlike Analizi

```
*****
*
*           SUBROUTINE  MSFMAT
*
*****
*
* Program parçasında kullanılan değişken ve matrislerin tanımı
*
* KNUZ : Sismik kaynak kenar uzunluğu
* MINX :      köşeleri arasında en küçük x koordinatı
* MINY :      köşeleri arasında en küçük y koordinatı
* MKSX :      köşeleri arasında en büyük x koordinatı
* MKSY :      köşeleri arasında en büyük y koordinatı
* HCSYX : Dikdörtgen içine alınmış kaynağın x kenarı boyunca hücre sayısı
* HCSYY :      köşeleri arasında en büyük y koordinatı
* HCX : Dikdörtgen çerçeve içine alınmış hücrelerin x koordinatı
* HCY :      köşeleri arasında en büyük y koordinatı
* KNSAYX : Sismik kaynağın kenarı üzerindeki nokta sayısı (x eksenine göre)
* KNSAYY :      köşeleri arasında en büyük y koordinatı
* KNKX :      noktanın x koordinatı
* KNKY :      noktanın y koordinatı
* HCUZK : Dikdörtgen içindeki hücrelerin sismik kaynak yaklaşık merkezine
*         uzaklığı (km)
* KNKUZ : Sismik kaynak kenarı üzerindeki noktanın sismik kaynak yaklaşık
*         merkezine uzaklığı (km)
* ENYKN : Hücre merkezine en yakın kenar noktasının sismik kaynak yaklaşık
*         merkezine uzaklığı (km)
* KNAR : Hücre merkezine en yakın kenar noktasını arayıcı
* HCTUTX : Sismik kaynak içinde kalan hücrenin x koordinatı
* HCTUTY :      hücrenin y koordinatı
* R : Hücrenin proje alanına uzaklığı (km)
*
*****
subroutine msfmat
real r(10,1000),mgn,maror(10,20),lksx,lksy,hcby,kynkx(10,8),
+ kynky(10,8),mrx(10),mry(10),knar,knuz(8),hcx(1000),hcy(1000),
+ hcuzk(1000),knkx(500),knky(500),hctutx(10,1000),enykn,
+ hctuty(10,1000),minx,mksx,miny,mksy,knkuz(500)
integer ksys,kksys(8),hcsyx,hcsyy,say1,say2,sayhc(10),knsayx,
+ knsayy,tut,saymar(10)
common /cmn1/ksys,sayhc,r,saymar,mgn,maror
common /cmn3/lksx,lksy,hcby,kksys,kynkx,kynky,mrx,mry
do 265 nn=1,kksys
do 205 i=1,kksys(nn)
if (i.eq.kksys(nn)) then
kynkx(nn,i+1) = kynkx(nn,i)
kynky(nn,i+1) = kynky(nn,i)
endif
*
* Kaynak alanın kenar uzunluğunun hesaplanması
*
knuz(i) = sqrt((kynkx(nn,i)-kynkx(nn,i+1))**2+(kynky(nn,i)-
+ kynky(nn,i+1))**2)
205 continue
*
* Kaynak alanın köşeleri arasında minimum x ve minimum y değerine
* sahip nokta(lar)nın belirlenmesi
*
minx = kynkx(nn,1)
miny = kynky(nn,1)
do 210 j=1,kksys(nn)
if (kynkx(nn,j).lt.minx) minx = kynkx(nn,j)
if (kynky(nn,j).lt.miny) miny = kynky(nn,j)
210 continue
*
* Kaynak alanın köşeleri arasında maximum x ve maximum y değerine
```



```
* sahip nokta(lar)nın belirlenmesi
*
  mksx = kynkx(nn,1)
  mksy = kynky(nn,1)
  do 215 k=1,kksys(nn)
    if (kynkx(nn,k).gt.mksx) mksx = kynkx(nn,k)
    if (kynky(nn,k).gt.mksy) mksy = kynky(nn,k)
  215 continue
*
* Kaynak alanı içine alacak en küçük dikdörtgenin oluşturulması
*
  hcsyx = (mksx-minx)/hcby
  hcsyy = (mksy-miny)/hcby
  say1 = 0
  do 225 L=1,hcsyx
    do 220 m=1,hcsyy
      say1 = say1+1
    *
  * Dikdörtgen içindeki hücrelerin (karelerin) orta noktalarının x ve y
  * koordinatlarının belirlenmesi
  *
    hcx(say1) = (minx-hcby/2)+m*hcby
    hcy(say1) = (miny-hcby/2)+L*hcby
  220 continue
  225 continue
  say2 = 0
  *
* Kaynak alan kenarlarını hücre boyutunun yarısı kadar aralıklara
* bölerek noktalar oluşturulması
*
  do 240 n=1,kksys(nn)
    if (n.eq.kksys(nn)) then
      kynkx(nn,n+1) = kynkx(nn,1)
      kynky(nn,n+1) = kynky(nn,1)
    endif
    knsayx = abs((kynkx(nn,n)-kynkx(nn,n+1))/(hcby/2))
    knsayy = abs((kynky(nn,n)-kynky(nn,n+1))/(hcby/2))
  *
* Kaynak alanın kenarının eğimi 45 dereceden az ise bölümlendime
* x ekseninde yapılır
*
  if (knsayx.ge.knsayy) then
    do 230 i=1,knsayx
      say2 = say2+1
      knkx(say2) = kynkx(nn,n)-((kynkx(nn,n)-kynkx(nn,n+1))/knsayx)*i
      knky(say2) = kynky(nn,n)-((kynky(nn,n)-kynky(nn,n+1))/knsayx)*i
    230 continue
  else
  *
* Kaynak alanın kenarının eğimi 45 dereceden büyük ise bölümlendime
* y ekseninde yapılır
*
    do 235 j=1,knsayy
      say2=say2+1
      knkx(say2) = kynkx(nn,n)-((kynkx(nn,n)-kynkx(nn,n+1))/knsayy)*j
      knky(say2) = kynky(nn,n)-((kynky(nn,n)-kynky(nn,n+1))/knsayy)*j
    235 continue
  endif
  240 continue
  *
* Dikdörtgen içindeki hücrenin orta noktasının kaynak alan yaklaşık
* orta noktasına uzaklığının hesaplanması
*
  do 245 i=1,say1
    hcuzk(i)=sqrt((mrx(nn)-hcx(i))**2+(mry(nn)-hcy(i))**2)
  245 continue
```

Sismik Tehlike Analizi

```
*
* Kaynak alan kenarları üzerinde belirlenen noktaların kaynak alan
* yaklaşık orta noktasına uzaklığının hesaplanması
*
  do 250 j=1,say2
    knkuz(j)=sqrt((mrx(nn)-knkx(j))**2+(mry(nn)-knky(j))**2)
  250 continue
  sayhc(nn) = 0
*
* Dikdörtgen içindeki hücrelerin merkezlerine en yakın kenar noktasının
* aranması
*
  do 260 k=1,say1
    enykn=sqrt((hcx(k)-knkx(1))**2+(hcy(k)-knky(1))**2)
    do 255 L=1,say2
      knar=sqrt((hcx(k)-knkx(L))**2+(hcy(k)-knky(L))**2)
      if (knar.le.enykn) then
        enykn = knar
        tut = L
      endif
    255 continue
*
* Hücrenin orta noktasının kaynak alan yaklaşık orta noktasına uzaklığını,
* hücreye en yakın kenar noktasının kaynak alan yaklaşık orta noktasına
* uzaklığı ile karşılaştırılarak dikdörtgenin içinde ancak kaynak alanın
* dışındaki hücrelerin atılması
*
  if (hcuzk(k).le.knkuz(tut)) then
    sayhc(nn) = sayhc(nn)+1
    hctutx(nn,sayhc(nn)) = hcx(k)
    hctuty(nn,sayhc(nn)) = hcy(k)
  endif
  260 continue
  265 continue
*
* Kaynak alan içinde kalan hücrelerin proje alanına uzaklığının hesaplanması
*
  do 275 i=1,kysys
    do 270 j=1,sayhc(i)
      r(i,j) = sqrt((hctutx(i,j)-lksx)**2+(hctuty(i,j)-lksy)**2)
    270 continue
  275 continue
  return
end
*****
*
* SUBROUTINE MAGMAT
*
*****
* Program parçasında kullanılan değişken ve matrislerin tanımı
*
* MGARSYS : Sismik kaynak için minimum ve maksimum deprem büyüklükleri
*           arasında dm'ye göre hesaplanmış magnitüd aralık sayısı
* ALTMG : Magnitüd aralığı alt değeri
* USTMG : " " " üst "
* MAROR : " " " orta "
* ALMGSY : " " " alt değerine karşılık gelen yıllık deprem sayısı
* USMGSY : " " " üst "
* LAMDA : " " " alt ve üst sınırlarına karşılık gelen yıllık
*         deprem sayısı farkı (dolayısıyla, sözkonusu sismik kaynağa ait
*         hücrenin verilen magnitüd aralığı için yıllık deprem sayısı)
*
*****
subroutine magmat
real r(10,1000),mgn,maror(10,20),yerivm(10,1000,20).
```



```
+ lamda(10,1000,20),almtg,ustmg,almgsy,usmgsy,
+ ktsa(10),ktsb(10),dm,mnmg(10),mxmg(10)
integer ksys,sayhc(10),saymar(10),mgarsy
common /cmn1/ksys,sayhc,r,saymar,mgn,maror
common /cmn2/dm,ktsa,ktsb,mnmg,mxmg
common /cmn5/yerivm,lamda
do 540 i = 1,ksys
*
* Kaynak alan için verilen minimum ve maksimum deprem büyüklüğü arasındaki
* aralık sayısının dm'ye göre belirlenmesi
*
mgarsy = (mxmg(i)-mnmg(i))/dm
if ((mxmg(i)-mnmg(i)).ne.(mgarsy*dm)) mgarsy=mgarsy+1
do 530 j = 1,sayhc(i)
k = 1
510 almtg = mnmg(i)+(k-1)*dm
if(k.eq.mgarsy) then
ustmg = mxmg(i)
else
ustmg = mnmg(i)+k*dm
endif
maror(i,k) = (almtg+ustmg)/2
almgsy = 10**(ktsa(i)-ktsb(i)*almtg)
usmgsy = 10**(ktsa(i)-ktsb(i)*ustmg)
lamda(i,j,k) = (almgsy-usmgsy)/sayhc(i)
if (k.eq.mgarsy) go to 530
k = k+1
go to 510
530 continue
saymar(i) = k
540 continue
return
end
*****
*
* SUBROUTINE IVMAT
*
*****
* Program parçasında kullanılan değişken ve matrislerin tanımı
*
* MGN : Deprem büyüklüğü
*
*****
subroutine ivmat
real r(10,1000),mgn,maror(10,20),yerivm(10,1000,20),
+ lamda(10,1000,20)
integer ksys,sayhc(10),saymar(10)
common /cmn1/ksys,sayhc,r,saymar,mgn,maror
common /cmn5/yerivm,lamda
do 330 i = 1,ksys
do 320 j = 1,sayhc(i)
do 310 k = 1,saymar(i)
r(i,j) = (r(i,j)**2+64)**0.5
if (r(i,j).le.10) r(i,j)=10
mgn = maror(i,k)
yerivm(i,j,k)=(10**(0.43+0.23*(mgn-6)-alog10(r(i,j))-0.0027*
+ r(i,j)))*980.665
310 continue
320 continue
330 continue
return
end
```

Sismik Tehlike Analizi

```
*****
*
*           FUNCTION FI
*
*****
real function fi(u)
sp = .2316419
b1 = .3193815
b2 = -.3565638
b3 = 1.781478
b4 = -1.821256
b5 = 1.330274
if (u.lt.0) then
  sx = -u
else
  sx = u
endif
zx = 1./sqrt(44./7.)*exp(-.5*sx**2)
if (sx.le.6.) then
  t = 1./(1+sp*sx)
  s = 1-zx*(t*(b1+t*(b2+t*(b3+t*(b4+b5*t))))))
else
  s = 1-1./sx*zx
endif
if (u.lt.0.) s = 1-s
fi = s
return
end
```

EK-2: Program SISTEHAN için input dosyası

```
3 90 80 5 0.25
5 90 0 180 40 150 70 60 65 35 25 100 40
3 130 85 230 60 155 120 170 90
4 0 130 140 110 135 135 15 160 65 135
6 1 5.0 6.5
5.5 0.95 5.0 6.7
4 0.9 5.0 6.9
25 500 25 0.645 100
```

EK-3: Dönüş periyodu olarak hesaplanan çıktı listesi.

(a)	a(g)	Dönüş Periyodu
25.00	.0255	.209
50.00	.0510	.682
75.00	.0765	1.739
100.00	.1020	3.818
125.00	.1275	7.594
150.00	.1530	14.058
175.00	.1785	24.633
200.00	.2039	41.307
225.00	.2294	66.808
250.00	.2549	104.813
275.00	.2804	160.201
300.00	.3059	239.367
325.00	.3314	350.593
350.00	.3569	504.488
375.00	.3824	714.524
400.00	.4079	997.599
425.00	.4334	1374.882
450.00	.4589	1872.580
475.00	.4844	2522.890
500.00	.5099	3365.077

EK-4: Aşılma ihtimali olarak elde edilen çıktı listesi
(örnek problemde 100 yıl için hesaplandı)

(a)	a(g)	Aşılma İhtimali
25.00	.0255	1.000
50.00	.0510	1.000
75.00	.0765	1.000
100.00	.1020	1.000
125.00	.1275	1.000
150.00	.1530	.999
175.00	.1785	.983
200.00	.2039	.911
225.00	.2294	.776
250.00	.2549	.615
275.00	.2804	.464
300.00	.3059	.341
325.00	.3314	.248
350.00	.3569	.180
375.00	.3824	.131
400.00	.4079	.095
425.00	.4334	.070
450.00	.4589	.052
475.00	.4844	.039
500.00	.5099	.029