

BİLGİLENDİRME EKİ 7D.
ARTIMSAL MOD BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ İLE İTME ANALİZİ

7D.0. Simgeler

- $a_n^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda n'inci moda ait modal ivme
- a_{yn} = n'inci moda ait eşdeğer akma ivmesi
- C_{Rn} = n'inci moda ait spektral yerdeğiştirme oranı
- $d_n^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda n'inci moda ait modal yerdeğiştirme
- $\bar{F}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımına ait birikimli spektrum ölçek katsayısı
- $M_{j,x}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda, (j) plastik kesidinde x eksenine etrafında oluşan eğilme momenti
- $\tilde{M}_{j,x}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında $\Delta\bar{F}^{(i)} = 1$ alınarak yapılan doğrusal (lineer) mod birleştirme analizi sonucunda, (j) plastik kesidinde x eksenine etrafında hesaplanan eğilme momenti
- $M_{j,y}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda, (j) plastik kesidinde y eksenine etrafında oluşan eğilme momenti
- $\tilde{M}_{j,y}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında $\Delta\bar{F}$ alınarak yapılan doğrusal (lineer) mod birleştirme analizi sonucunda, (j) plastik kesidinde y eksenine etrafında hesaplanan eğilme momenti
- m_s = Herhangi bir (s) serbestlik derecesinin kütlesi
- $N_j^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda, (j) plastik kesidinde oluşan aksenal kuvvet
- $\tilde{N}_j^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında $\Delta\bar{F}$ alınarak yapılan doğrusal (lineer) mod birleştirme analizi sonucunda, (j) plastik kesidinde hesaplanan aksenal kuvvet
- R_{yn} = n'inci moda ait Dayanım Azaltma Katsayısı
- $r_j^{(i)}$ = (i)'inci itme adımı sonunda, herhangi bir (j) noktasında veya kesidinde oluşan tipik yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme veya iç kuvvet
- $\bar{r}_j^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında $\Delta F^{(i)} = 1$ alınarak yapılan doğrusal (lineer) mod birleştirme analizi sonucunda, (j) noktasında veya kesidinde hesaplanan tipik yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme veya iç kuvvet
- $S_{aen}^{(1)}$ = İtme analizinin ilk adımında n'inci moda ait doğrusal elastik spektral ivme

- $S_{den}^{(1)}$ = İtme analizinin ilk adımında n'inci moda ait doğrusal elastik spektral yerdeğiştirme
- T_B = 6.4'de tanımlanan ivme spektrumundaki karakteristik periyod
- $T_n^{(1)}$ = Başlangıçtaki (i=1) itme adımında n'inci titreşim moduna ait doğal titreşim periyodu
- $\alpha_{jk,x}$ = (j) plastik kesidinde x eksenine etrafındaki momentle ilgili olarak (k)'inci akma düzlemini veya çizgisini tanımlayan katsayı
- $\alpha_{jk,y}$ = (j) plastik kesidinde y eksenine etrafındaki momentle ilgili olarak (k)'inci akma düzlemini veya çizgisini tanımlayan katsayı
- β_{jk} = (j) plastik kesidindeki aksel kuvvetle ilgili olarak (k)'inci akma düzlemini veya çizgisini tanımlayan katsayı
- $\Delta a_n^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında n'inci moda ait modal ivme artımı
- $\Delta d_n^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında n'inci moda ait modal yerdeğiştirme artımı
- $\Delta \tilde{F}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında artımsal spektrum ölçek katsayısı
- $\Delta f_{sn}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında n'inci doğal titreşim modu için sistemin herhangi bir (s) serbestlik derecesine etkiyen deprem yükünün artımı
- $\Delta u_{sn}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında n'inci doğal titreşim modu için sistemin herhangi bir (s) serbestlik derecesine ait yerdeğiştirme artımı
- $\Phi_{sn}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında, o adımdaki plastik kesit konfigürasyonu gözönüne alınarak belirlenen n'inci mod şeklinin (s) serbestlik derecesine ait genliği
- $\Gamma_{xn}^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında, x doğrultusundaki deprem için n'inci doğal titreşim moduna ait katkı çarpanı
- ω_B = 6.4'de tanımlanan ivme spektrumundaki T_B karakteristik periyoduna karşı gelen doğal açısal frekans
- $\omega_n^{(i)}$ = (i)'inci itme adımında, o adımdaki plastik kesit konfigürasyonu gözönüne alınarak belirlenen n'inci titreşim moduna ait doğal açısal frekans
- $\omega_n^{(1)}$ = Başlangıçtaki (i=1) itme adımında n'inci titreşim moduna ait doğal açısal n frekans
- $\omega_n^{(p)}$ = En sondaki (i=p) itme adımında n'inci titreşim moduna ait doğal açısal n frekans

7D.1. Giriş

7D.1.1 – 7.6.5'de açıklanan *Artımsal Eşdeğer Deprem Yüklü Yöntemi* ile itme analizinin en önemli sakıncası, taşıyıcı sistemin deprem davranışının sadece birinci (deprem doğrultusunda hakim) doğal titreşim modundaki davranıştan ibaret olduğunun varsayılmasıdır. Bu nedenle yöntem, çok katlı olmayan ve deprem doğrultusuna göre planda simetrik veya simetriğe yakın olan binalarla sınırlıdır. Bu koşullara uymayan binalarda uygulanmak üzere birden fazla titreşim modunun gözönüne alındığı çok sayıda itme analizi yöntemi önerilmiş ise de, bu yöntemlerin büyük bölümü taşıyıcı sistemin global dayanım ve deformasyon kapasitelerinin belirlenmesi ile yetinmektedir. Tanımlanan belirli bir depremin etkisi altında performans değerlendirmesi için gerekli olan istem büyüklüklerini elde etmeyi amaçlayan yöntemlerin sayısı çok sınırlıdır [1–5]*. Bu Bilgilendirme Eki'nde açıklanan *Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi* ile itme analizinde [4,5], her bir plastik kesitin oluşumunda tüm modların katkıları gözönüne alınabilmekte; plastik dönmeler ile iç kuvvet istemleri, itme analizi dışında ek analizlere gerek kalmaksızın, doğrudan elde edilebilmektedir.

7D.1.2 – Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ile itme analizinde, ardışık iki plastik kesit oluşumu arasındaki her bir itme adımında “*adım adım doğrusal elastik*” davranış esas alınır. Modal ölçeklendirme ile monotonik olarak arttırılan modal yerdeğiştirmeler gözönüne alınarak, her adımda *mod birleştirme kuralları*'nın uygulandığı bir *doğrusal (linear) davranış spektrumu analizi* gerçekleştirilir. Bu analizin sonuçlarından yararlanılarak, adım sonunda sistemde oluşan plastik kesit belirlenir; yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme, iç kuvvet artımları ile bunlara ait birikimli değerler ve sonuçta deprem istemine karşı gelen maksimum değerler hesaplanır [4,5].

7D.2. Modal ölçeklendirme

7D.2.1 – Ardışık iki plastik kesit oluşumu arasındaki herhangi bir (i)'inci *doğrusal* itme adımında, tipik bir n'inci doğal titreşim modu için taşıyıcı sistemin herhangi bir (s) serbestlik derecesine ait yerdeğiştirme artımı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\Delta u_{sn}^{(i)} = \Phi_{sn}^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \Delta d_n^{(i)} \quad (7D.1)$$

7D.2.2 – Denk.(7D.1)'de yer alan ve (i)'inci itme adımında n'inci moddaki *modal yerdeğiştirme artımı*'nı temsil eden $\Delta d_n^{(i)}$ 'nin, bir önceki itme adımının sonundaki modal yerdeğiştirmeye eklenmesi ile, (i)'inci adım sonunda *birikimli (kümülatif) modal yerdeğiştirme* aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$d_n^{(i)} = d_n^{(i-1)} + \Delta d_n^{(i)} \quad (7D.2)$$

* Bu Bilgilendirme Eki'nin sonunda listelenen referansların numaralarını göstermektedir.

Modların görelî katkılarının gözönüne alınabilmesi için birikimli modal yerdeğiştirme, tek serbestlik dereceli sistemlere özgü *eşit yerdeğiştirme kuralı*'na göre, aynı modda birinci adımdaki ($i=1$) *elastik spektral yerdeğiştirme* $S_{den}^{(1)}$ ile orantılı olarak tanımlanır:

$$d_n^{(i)} = S_{den}^{(1)} \tilde{F}^{(i)} \quad (7D.3)$$

Burada $\tilde{F}^{(i)}$, (i)'inci itme adımında bütün modlar için sabit olduğu varsayılan *birikimli spektrum ölçek katsayısı*'nı göstermektedir. **Denk.(7D.2)** ve **Denk.(7D.3)**'ün sonucu olarak, n 'inci moddaki modal yerdeğiştirme artımı aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\Delta d_n^{(i)} = S_{den}^{(1)} \Delta \tilde{F}^{(i)} \quad (7D.4)$$

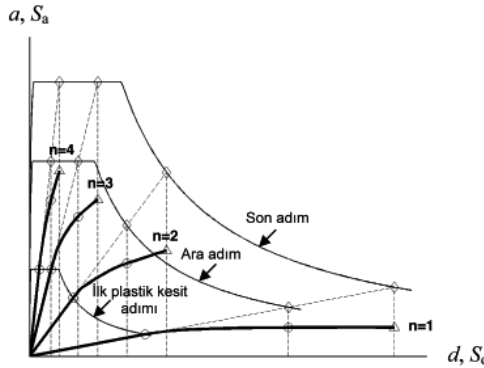
Burada $\Delta \tilde{F}^{(i)}$, yine (i)'inci adımda bütün modlar için sabit varsayılan *artımsal spektrum ölçek katsayısı*'dır. Böylece her bir itme adımındaki tüm modal yerdeğiştirme artımları, tek bir parametreye bağlı olarak ifade edilmiş olmaktadır. Artımsal ve birikimli spektrum ölçek katsayıları arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\tilde{F}^{(i)} = \tilde{F}^{(i-1)} + \Delta \tilde{F}^{(i)} \leq 1 \quad (7D.5)$$

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan ve birinci itme adımı ($i=1$) için tanımlanan *elastik spektral yerdeğiştirme* $S_{den}^{(1)}$, aynı adım için 2.4'e göre tanımlanan elastik spektral ivmeden elde edilebilir:

$$S_{den}^{(1)} = \frac{S_{aen}^{(1)}}{(\omega_n^{(1)})^2} \quad (7D.6)$$

7D.2.3 – Denk.(7D.3) ve **Denk.(7D.4)** ile verilen modal ölçeklendirme bağıntıları, yeni bir plastik kesitin olduğu her bir itme adımı sürecinde elastik spektral yerdeğiştirmenin monotonik olarak arttırılmasına karşı gelmektedir. Diğer deyişle, spektral yerdeğiştirmeler bakımından deprem etkisi, sıfırdan başlayarak her bir itme adımında belirli bir miktarda büyütölmüş olmaktadır.



Şekil 7D.1

Denk.(7D.6)'dan yararlanılarak “spektral yerdeğiştirme (S_d) – spektral ivme (S_a)” koordinatlarında çizilen davranış spektrumunun, sistemdeki ilk plastik kesitin olduğu doğrusal elastik birinci adım sonundaki ölçeklendirilmiş durumu ($\tilde{F}^{(1)} \leq 1$) **Şekil 7D.1**'de gösterilmiştir. Spektrumun daha sonraki herhangi bir (i)'inci ara adım sonundaki ölçeklendirilmiş durumu da ($\tilde{F}^{(i)} \leq 1$) aynı şekilde görülmektedir. (p)'inci son itme adımı sonunda ise, eşit yerdeğiştirme kuralı uyarınca, elastik davranışspektrumunun kendisine varılmaktadır ($\tilde{F}^{(p)} = 1$). “Modal yerdeğiştirme (d) – modal ivme (a)” koordinatları ile tanımlanan ve aşağıda elde edilecek olan modal kapasite diyagramları da, gözönüne alınan tipik bir taşıyıcı sistemin ilk dört modu için, şematik olarak **Şekil 7D.1**'de gösterilmiştir.

7D.3. Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ile İtme Analizi Algoritması

Yukarıda açıklanan modal ölçeklendirme işlemi esas alınarak, artımsal mod birleştirme yöntemi ile yapılacak itme analizinin ana adımları aşağıda özetlenmiştir:

7D.3.1 – Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi'nin pratik uygulamasında, her bir (i)'inci itme adımında $\Delta\tilde{F}^{(i)} = 1$ alınarak doğrusal bir *Mod Birleştirme Analizi* yapılır. Analizde, bir önceki adım sonundaki eksenel kuvvetler esas alınarak, ikinci mertebe etkileri hesaba katılabilir. Gözönüne alınacak mod sayısı, birinci itme adımındaki (i=1) modal büyüklükler esas alınarak **2.8.3**'e göre belirlenir. Bu analizde;

- (a) **Denk.(7D.1)** ve **Denk.(7D.4)**'e göre tipik n'inci mod için deprem verisi olarak birinci itme adımındaki (i=1) *elastik spektral yerdeğiştirme* $S_{den}^{(1)}$ gözönüne alınır. Bu giriş bilgisi, tüm itme adımlarında değişmeksizin aynen kullanılır.
- (b) Bütün yerdeğiştirme, şekil değiştirme ve iç kuvvet büyüklüklerine modal katkıların hesabı için **2.8.4**'te belirtilen *Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı* kullanılır. Bu kuralın uygulanmasında kritik sönüm oranı bütün modlarda 0.05 olarak alınır.

7D.3.2 – Ardışık iki plastik kesit oluşumu arasındaki herhangi bir (i)'inci itme adımı sonunda, taşıyıcı sistemin herhangi bir (j) noktasında veya kesidinde oluşan herhangi bir yer değiştirmeyi, plastik şekil değiştirmeyi veya iç kuvveti temsil eden *tipik büyüklük* $r_j^{(i)}$, bilinmeyen olarak sadece (i)'inci adıma ait artımsal ölçek katsayısı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$r_j^{(i)} = r_j^{(i-1)} + \tilde{r}_j^{(i)} \Delta\tilde{F}^{(i)} \quad (7D.7)$$

Bu bağıntıya ilişkin tanımlar aşağıda verilmiştir:

- (a) $\tilde{r}_j^{(i)}$, $\Delta\tilde{F}^{(i)} = 1$ alınarak (i)'inci itme adımında **7D.3.1**'e göre yapılan doğrusal (lineer) mod birleştirme analizi sonucunda, (j) noktasında veya kesidinde

7D.3.5 – (i)'inci itme adımında $\Delta\tilde{F}^{(i)}$ elde edildikten sonra;

- (a) Birikimli spektrum ölçek katsayısı, $\tilde{F}^{(i)}$, **Denk.(7D.5)**'ten hesaplanır.
- (b) Taşıyıcı sistemin herhangi bir (j) noktasında veya kesidinde oluşan herhangi bir tipik yerdeğiştirme, plastik şekil değiştirme veya iç kuvvet büyüklüğü, $r_j^{(i)}$, **Denk.(7D.7)**'ye göre elde edilir.
- (c) Gözönüne alınan tüm modlara ait modal yerdeğiştirme artımları **Denk.(7D.4)**'ten hesaplanır. (i)'inci itme adımının sonundaki birikimli modal yer değiştirmeler ise **Denk.(7D.2)** veya **Denk.(7D.3)**'ten elde edilir.

7D.3.6 – (i)'inci adımda tüm modlara ait *modal ivme* artımları aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\Delta a_n^{(i)} = (\omega_n^{(i)})^2 \Delta d_n^{(i)} \quad (7D.11)$$

Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi'nin burada açıklanan formülasyonunda doğrudan kullanılmamakla birlikte, tanım olarak n'inci modda (s) serbestlik derecesine etkileyen *modal deprem yükü artımı* $\Delta f_{sn}^{(i)}$, modal ivme artımı $\Delta a_n^{(i)}$ 'ye bağlı olarak aşağıda verilmiştir:

$$\Delta f_{sn}^{(i)} = m_s \Phi_{sn}^{(i)} \Gamma_{xn}^{(i)} \Delta a_n^{(i)} \quad (7D.12)$$

(i)'inci itme adımının sonundaki birikimli modal ivme değerleri ise aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$a_n^{(i)} = a_n^{(i-1)} + \Delta a_n^{(i)} \quad (7D.13)$$

7D.3.7 – Yatay ekseninde modal yerdeğiştirmelerin, düşey ekseninde ise modal ivmelerin temsil edildiği tipik *modal kapasite diyagramları* **Şekil 7D.1**'de gösterilmiştir. Tanım olarak, n'inci moda ait tipik kapasite diyagramında ardışık iki plastik kesit oluşumu arasındaki doğru parçasının eğimi, **Denk.(7D.11)** uyarınca o adımda n'inci modun doğal açısal frekansının karesine, $(\omega_n^{(i)})^2$, diğer deyişle n'inci özdeğere eşittir. Plastik şekil değiştirmelerin yaygınlaşması sonucunda, ikinci mertebe etkileri nedeni ile bazı modların özdeğerleri, dolayısıyla ilgili modal kapasite diyagramlarının eğimleri, belirli bir itme adımından sonra negatif değerler alabilirler. İkinci mertebe etkilerinin mod şekillerini değiştirebileceği dikkate alınmalıdır. Modal deprem istemi üzerindeki etkileri ise genellikle terkedilebilir düzeydedir.

7D.3.8 – Her bir itme adımının tamamlanmasından sonra, o adım sonunda oluşan plastik kesit gözönüne alınarak sistem rijitlik matrisinde gerekli değişiklikler yapılır ve yeni itme adımı için işlemlere başlanır. Bir veya iki eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki kesitlerde plastikleşmeyi izleyen itme adımlarında **7.6.4.7** gözönüne alınmalıdır.

7D.6. Referanslar

- [1] Chopra, A.K, Goel, R.K (2002). A modal pushover analysis for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; **31**(3): 561-582.
- [2] Goel, R.K, Chopra, A.K, (2004). Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses: SAC Buildings. *Earthquake Spectra*; **20**(1): 225-254.
- [3] Goel, R.K, Chopra, A.K, (2005). Extension of Modal Pushover Analysis to compute member forces. *Earthquake Spectra*; **21**(1): 125-139.
- [4] Aydınoğlu, M. N. (2003). An incremental response spectrum analysis based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering*; **1**(1): 3-36.
- [5] Aydınoğlu, M. N. (2004). An improved pushover procedure for engineering practice: Incremental Response Spectrum Analysis (IRSA). *International Workshop on Performance-based Seismic Design: Concepts and Implementation*, edited by P. Fajfar and H. Krawinkler, Bled, Slovenia, 28 June – 1 July 2004, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, PEER Report 2004/05: 345-356