

**DEPREME DAYANIKLI BİNA TASARIMINDA
AKTİF KONTROL**

**ACTIVE CONTROL IN EARTHQUAKE RESISTANT
BUILDING DESIGN**

Ünal Aldemir¹ Mehmet Bakioğlu²

SUMMARY

In this work, active mass dampers, used as active control devices for design of earthquake resistant building, are examined using instantaneous optimal closed loop control algorithm developed by Yang, J.N in 1987 and energy expressions related to the system are given. Nonlinear differential equations of motion of the structural system are solved numerically using Wilson- θ method. As an example, solutions of a eight story shear building subjected to a synthetic and Erzincan (1992) earthquakes are given.

ÖZET

Bu çalışmada depreme dayanıklı bina tasarımında aktif kontrol elemanları olarak kullanılan aktif kütle sönümleyiciler 1987'de Yang, J.N. tarafından non-linear sistemler için geliştirilen ani optimal kontrol algoritması ile kapalı bir çevrimde incelenmekte ve ayrıca sisteme ait enerji ifadeleri verilmektedir. Sistemin hareketini belirleyen non-linear diferansiyel denklemler sayısal olarak Wilson- θ yöntemi ile çözülmektedir. Örnek olarak bir sentetik ve Erzincan (1992) depremleri etkisi altında sekiz katlı bir kayma binasının çözümü yapılmaktadır.

¹Arş.Gör. İTÜ İnşaat Fak., 80626, Maslak, İstanbul

²Prof.Dr. İTÜ İnşaat Fak., 80626, Maslak, İstanbul

GİRİŞ

Yapıların dış etkiler karşısında hareketlerini azaltmak gayesi ile yapıya kontrol kuvvetleri adı verilen bir takım kuvvetler etki ettirilmesine yapı kontrolü adı verilmektedir. Bu kuvvetler yapıya ilave olarak konulan elemanların kendi iç bünyeleri tarafından sağlanır ise bu tip kontrole pasif kontrol adı verilmektedir. Taban izolasyonu, katı veya sıvı sönmüleyiciler, enerji yutucular gibi. İlave olarak konulan elemanlar yapı hareketlerini sistemde hazır olarak bulundurulmuş bir dış enerji kaynağını kullanarak azaltır ise bu tip kontrole da aktif kontrol adı verilmektedir.

Geniş anlamda aktif kontrol, kontrol kuvvetlerinin, dış etkilere göre, yapıya bir hareket vermesidir. Bu hareket yapının şeklini, fonksiyonunu değiştirebilir. Kısaca yapı çevre şartlarına uyum sağlamaya çalışır. Bu tip yapılara, kontrol kuvvetleri ile hareketi azaltılan yapılardan ayırt etmek için "Kinetik Yapılar" adı verilmektedir. Olaya geniş bir açıdan bakan, bu arada aktif kontrolü canlı organizmalar ile karşılaştıran güzel bir inceleme [10] da bulunmaktadır.

Uzay ve uçak endüstrisinde geliştirilen aktif kontrol yapı mühendisliğine 60 lı yıllardan itibaren fikir olarak girdi [10]. Sonradan, konu üzerinde Kobori ve Ark. tarafından "Akıllı Dinamik Yapılar" [2] adı altında çalışmalar yapıldı. Yao [9] nun kontrol teorisine dayanan çalışmasından sonra aktif kontrol üzerinde yoğun sistematik araştırmalar yapılmaya başlandı.

Aktif kontrolün gerekliliği, birinci olarak pasif kontrolün yetersiz kaldığı yerlerde ortaya çıkmaktadır. Pasif kontrol sistemlerinde deprem gibi değişken dış etkilere karşı kendini adapte edebilme yeteneği yoktur. Ayrıca taban izolasyonları verimli olarak ancak alçak binalara uygulanabilmektedir. Yüksek binalarda taban izolasyonlarında kaldırma kuvvetleri oluşabilme ve bu kuvvetler yapının stabilitesini bozarak devirme yapabilmektedir. Buna ek olarak büyük yatay deplasmanlardan dolayı depremlerden sonra kalıcı deformasyonlar oluşmakta ve bunlar zamanla birikerek sistem kullanılamaz hale gelmektedir.

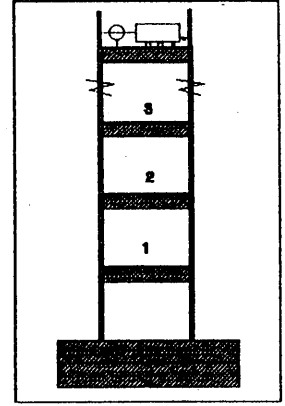
İkinci olarak, yapılarda esnekliğin artmasıdır. Gelişen malzeme teknolojisi, malzemelerin rijidliğini mukavemetleri ile aynı derecede artıramamıştır. Bu nedenle yeni malzemeler ile yapılan yapılar eskilere göre daha esnektirler. Ayrıca yapılarda yüksekliklerin artması da esnekliğin artmasına ayrı bir nedendir. Esnekliğin artması yapıda arzu edilmeyen etkiler meydana getireceği gibi insanların konforu bakımından da arzu edilmemektedir. Üçüncü olarak, yapılarda arzu edilen işlevlerin artmasıdır. Eskiden, yapılarda deprem esnasında can kaybı olmaması şartı ile bazı lokal hasarlara izin verilmekteydi. Bugün ise, bazı yapılarda, yapının taşıyıcı sistemi kadar içinde bulunan aletlerin hasar görmemesi istenmektedir (Haberleşme tesislerinin bulunduğu yapılar, hastahaneler, nükleer tesisler gibi). Ayrıca yapıdan beklenen işlevler yalnız depremde değil rüzgar gibi diğer dış etkilere de beklenmektedir. Dördüncü olarak, bazı yapıların tasarımında göz önüne alınan emniyetin artmasıdır. Günümüzde kritik işlev yapan (Nükleer tesis, açık deniz yapıları gibi) yapılarda daha fazla emniyet aranmaktadır.

Deplasman kontrolunun, konforun, emniyetin çok önemli olduğu yapıların, normal ömürleri boyunca sürekli değişen dış yüklere ve değişik kullanım amaçlarına göre kendilerini adapte edebilme özelliklerinin bulunması gerekmektedir. Bu özelliklerin yapılara kazandırılması için aktif kontrol çalışmaları başlatılmıştır [1]-[2], [4]-[10]

Bu çalışmada aktif kütle sönümleyiciler incelenmektedir. Çok katlı bir kayma binasının formülasyonu; aktif bir kütle sönümleyicisi ve iç sönüm hesaba katılarak verilmektedir. Kontrol algoritması olarak klasik kontrol teorisi yerine Yang, J.N. [6] tarafından non-linear sistemler için geliştirilen ani optimal kontrol algoritması kapalı bir çevrimde kullanılmaktadır. Ani optimal kontrol algoritmasında J performans indeksi her t anında minimize edilmektedir. Sisteme ait non-linear diferansiyel denklem durum vektörü kullanılarak Wilson- θ yöntemi ile sayısal olarak çözülmektedir. Örnek olarak bir sentetik ve Erzincan (1992) depreminin etkisi altında sekiz katlı bir kayma binasının sayısal çözümü verilmektedir.

FORMÜLASYON

En üst katta aktif kütle sönümleyici bulunan n katlı bir kayma binası Şek.(1) de görülmektedir. Sistemin serbestlik derecesi $SD=n+1$ 'dir.Sisteme $X_0(t)$ şeklinde yatay bir deprem ivmesi etkimesi halinde sistemin hareket denklemi matris formunda (1) de verilen şekildedir. Eşitlikte; M , (SD,SD) boyutlu diyagonal kütle matrisi olup elemanları kat ve aktif sönümleyici kütleleridir. $Y(t)$ vektörü, (SD) boyutlu davranış vektörü olup elemanları, kütlelerin



Şekil 1

(kat ve aktif sönümleyici) zemine göre rölatif yer değiştirmeleridir. $F_d(t)$ ve $F_s(t)$ vektörleri ise (SD) boyutlu olup sıra ile sönüm ve geri çağırıcı kuvvetlerdir. v , elemanları 1 olan (SD) boyutlu bir vektördür. H kontrol kuvvetlerinin yerlerini belirten $(SD*RD)$ (RD =Kontrol kuvveti sayısı) boyutlu bir matris ve $U(t)$ ise elemanları aktif kontrol kuvvetleri olan RD boyutlu bir vektördür.

$$M \ddot{Y}(t) + F_d(t) + F_s(t) = -M v \ddot{X}_0(t) + H U(t) \quad (1)$$

Lineer viskos sönüm ve lineer elastik geri çağırıcı kuvvet halinde $F_d(t)$ ve $F_s(t)$ vektörleri aşağıdaki şekilde yazılabilirler.

$$F_d(t) = C \dot{Y}(t) \quad , \quad F_s(t) = K Y(t) \quad (2)$$

Burada C ve K matrisleri, simetrik (SD,SD) boyutlu band matrisler olup sönüm ve rijidlik matrisleri olarak isimlendirilirler.

Yukarıda (1) de görülen $U(t)$ kontrol kuvveti, aşağıda (3) de verilen durum vektörü, $Z(t)$, (Eşitlikte T üssü transpozeyi göstermektedir.) kullanılarak,

$$Z(t) = [Y(t) , \dot{Y}(t)]^T \quad (3)$$

ve klasik lineer quadratik optimal kontrol teorisine göre aşağıda (4) de verilen performans indeksi J minimize edilerek bulunur.

$$J = \int_0^{t_b} [\dot{\mathbf{z}}(t) \mathbf{Q} \mathbf{z}(t) + \dot{\mathbf{u}}(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad (4)$$

Burada t_b deprem etkisinden daha uzun bir zaman olup \mathbf{Q}, \mathbf{R} matrisleri sıra ile positif semidefinit ve positif definit ağırlık matrisleridir.

Yang [6] tarafından, ani optimal kontrol olarak önerilen teoride yukarıda (4) de verilen performans indeksi yerine aşağıda (5) de verilen zamana bağlı J performans indeksi minimize edilmektedir.

$$J(t) = \dot{\mathbf{z}}(t) \mathbf{Q} \mathbf{z}(t) + \dot{\mathbf{u}}(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \quad (5)$$

Hesaplarda Yang [6] tarafından önerilen ani optimal kontrol teorisi ve kapalı çevrim kullanılacaktır. Ani optimal teorisine göre (5) eşitliğinde verilen performans indeksini çeşitli çevrimlerde minimize ettikten sonra, (1) eşitliğinin sayısal olarak Wilson- θ yönetimi ile çözülmesine ait detaylı bilgiler [7] de verilmektedir.

Yukarıda (1) de verilen eşitlik sol taraftan hız vektörünün transpozesi $\mathbf{Y}(t)^T$ ile çarpılıp, sıfır olarak belirlenen depremin başlangıç anından herhangi bir t anına kadar integre edilir ise aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{F}_d(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{F}_s(\tau) d\tau \\ = - \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{M} \mathbf{v} \dot{\mathbf{X}}_0 d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{H} \mathbf{U}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad 6$$

Yukarıda verilen eşitlikte ilk terim sistemin toplam rölatif kinetik enerjisi olup, integral sonucu aşağıda (7) de verilen şekildedir.

$$\int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}} d\tau = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}(t)^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}}(t) \quad (7)$$

İkinci terim ise sistem tarafından iç sönüm olarak

absorbe edilen enerjiyi göstermektedir. Üçüncü terim şekil değiştirme enerjisini göstermekte olup, lineer elastik sistemlerde;

$$\int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{F}_s(\tau) d\tau = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}(\tau)^T \mathbf{K} \mathbf{Y}(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{Y}(t)^T \mathbf{K} \mathbf{Y}(t) \quad (8)$$

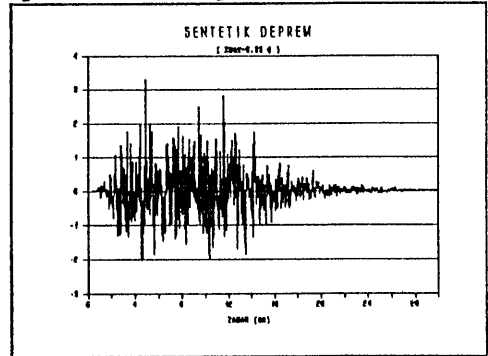
şeklindedir. Dördüncü terim t anına kadar sisteme giren rölatif deprem enerjisini ve beşinci terim ise kontrol enerjisini göstermektedir.

Sistemin enerji dengesini belirleyen (6) eşitliği yardımı ile kütle sönümleyicilerinin ve her katın çeşitli şekilde absorbe ettiği enerjileri ve kontrol için gerekli enerjiyi bulmak mümkündür.

SAYISAL UYGULAMA

Sayısal uygulama olarak bir sentetik ve Erzincan (1992) depremlerinin etkisi altında sekiz katlı bir kayma binasının çözümü yapılmıştır. Sentetik deprem kaydı Şekil (2) de görülmektedir. Sentetik depremin maksimum ivme değeri 0.33 g dir.

Binanın kat kütleleri eşit olarak m=450 ton ve her katta iç sönüm katsayısı c=1500 kN.sn/m alınmıştır. Bilineer elasto-plastik olarak kabul edilen malzemede akmadan önce $k_1=500000$ kN/m, aktıktan $k_2=0.1*k_1$ ve akma uzaması 2,5 cm kabul edilmiştir. Binanın hesaplanan doğal frekansları 6,15;

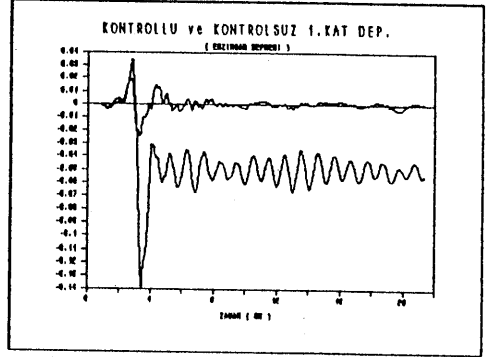


Şekil (2)

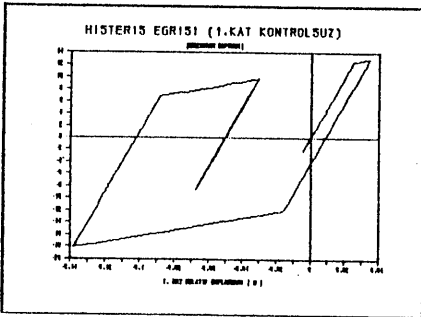
18,24; 29,71;, 56,68; 62,16; 65,532 rd/sn olarak bulunmuş olup birinci moda karşı gelen sönüm oranı %0,92 dir. Yapılan hesaplarda sentetik deprem halinde en alt katta zemine göre max. deplasman 2,39 cm ve taban kesme kuvveti 11951 kN bulunmuştur. Erzincan depremi etkisinde ilk katta max. deplasman 0,138 m ve taban kesme kuvveti 18179 kN bulunmuş olup ilk beş kat akma sınırını geçmiştir. Yapıyı elastik bölgede tutabilmek için

en üst kata bir tane aktif kütle sönümleyici yerleştirilmiştir. Sönümleyici kütlesi kat kütlelerinin %10,4'u olup $m_d=46,9$ ton'dur. Frekansı ise yapının birinci doğal frekansının %98'ine eşittir. Rijidliği $k_d=1676$ kN/m'dir. Sönüm oranı %8.1'dir. Aktif kontrol kuvveti olmadığı zaman bu kütle pasiftir. İlk olarak kütle pasif alınarak Erzincan Depremine göre hesap yapılmıştır. Bu durumda taban kesme kuvveti 18000 kN, 1.kat deplasmanı ise 0,135 m bulunmuştur. İlk beş kat yine akma sınırını aşmıştır. Aktif kontrolün etkisini görmek için

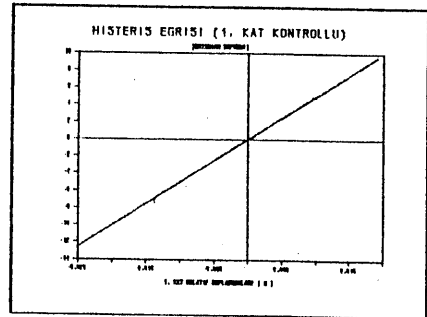
aynı kütle aktif alınarak aynı depreme göre yapı tekrar çözülmüştür. Çözümler $Q\dot{Q}$, Q matrisinin köşegen elemanı, $R\dot{R}$, R matrisinin köşegen elemanı olmak üzere farklı ($Q\dot{Q}/R\dot{R}$) oranları için elde edilmiştir. $Q\dot{Q}=14$ ve $R\dot{R}=0,00001$ değerleri için Erzincan depremine göre yapılan hesaplarda ilk katta max. 0,0247 cm deplaman ve 12375 kN kesme kuvveti, aktif sönümleyicide ise max. 9,1 m deplasman elde edilmiştir. Erzincan depremi etkisi altında, binanın kontrolsüz ve en üst katta aktif kütle sönümleyici olması halinde 1.kata ait deplasmanlar Şek.(3) de histeris eğrileri ise Şek.(4) ve Şek.(5) de görülmektedir.



Şekil (3)



Şekil (4)

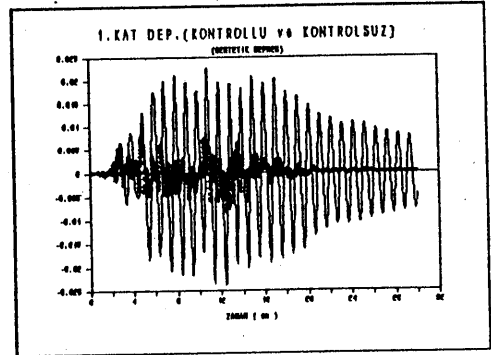


Şekil (5)

Şek.(6) da sentetik depreme ait kontrollü ve kontrolsüz hallerde depl. görülmektedir.

Tablo 1 de katların birbirlerine göre max. deplasmanları cm olarak verilmektedir. Tablo 2 de ise katlara gelen max. kuvvetler MN olarak verilmektedir. Her iki tabloda 1. ve 2. kolonda kontrollü ve kontrolsüz sentetik, 3.

4. ve 5.kolonda sıra ile kontrolsüz, pasif ve aktif kütle sönümleyicili Erzincan depremine ait değerler verilmektedir.



Şekil (6)

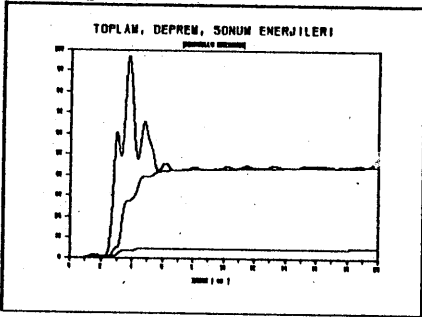
Tablo 1

Küt.No	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	2,39	0,83	13,86	13,50	2,47
2	2,24	0,67	10,33	10,00	2,19
3	1,99	0,51	5,93	5,70	1,98
4	1,73	0,58	3,93	3,75	1,69
5	1,54	0,55	2,75	2,69	1,52
6	1,27	0,64	2,37	2,32	1,47
7	0,95	0,70	1,81	1,74	1,54
8	0,53	0,74	0,99	0,93	1,65
Küt.S.	-	303,03	-	43,22	909,00

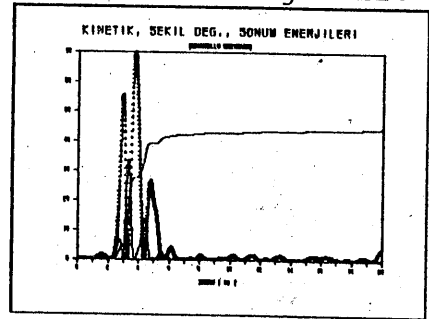
Tablo 2

Küt.No	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	11,95	4,16	18,18	18,00	12,38
2	11,19	3,36	16,42	16,26	10,93
3	9,95	2,55	14,21	14,10	9,88
4	8,63	2,88	13,21	13,13	8,43
5	7,69	2,75	12,63	12,59	7,59
6	6,34	3,18	11,86	11,61	7,33
7	4,74	3,52	9,07	8,70	7,68
8	2,66	3,70	4,96	4,66	8,26
Küt.S.	-	5,08	-	0,72	15,24

Şekil (7)-(8) de Erzincan depremine ait enerji eğrileri görülmektedir. Şek.(7) de en üstte olan eğri sisteme giren aktif kontrol ve rölatif deprem enerjilerinin toplamı göstermektedir. Bu eğri kısaca (6) eşitliğinin sol tarafındaki terimlerin toplamını göstermektedir. Altteki eğri rölatif deprem enerjisini ve ortadaki eğri ise sönüm enerjisini göstermektedir. Şekil (8) de (6) eşitliğinin sol tarafında bulunan rölatif kinetik enerji, şekil değiştirme enerjisi ve sönüm enerjisi görülmektedir. Şekilde (+) işareti ile gösterilen eğri şekil değiştirme enerjisine, bir noktadan sonra sabit giden eğri ise sönüm enerjisine aittir. Rölatif deprem enerjisi olarak belirtilen terim bağzan giriş enerjisi olarak isimlendirilmektedir. Burada sisteme aktif kontrolden giren enerji de bulunduğundan bu ayırım yapıldı. Ayrıca rölatif kelimesi integrasyonun hareketli zemine göre alınan bir sistemde yapılması nedeni ile kullanılmıştır. Sönüm ve şekil değiştirme enerjilerinde bir rölatiflik söz konusu değildir.



Şekil (7)



Şekil (8)

SONUÇ

Bu çalışmada, Erzincan (1992) depremine dayanamayan sekiz katlı bir binanın aktif kontrol olarak kullanılan bir kütle sönümleyici yardımı ile aynı depreme dayanıklı hale geldiği gösterilmiştir. Ayrıca aynı bina, max. ivmesi 0,33 g olan sentetik bir depreme dayanmasına rağmen binanın en üstüne aktif bir kütle sönümleyicisi konularak kat deplasmanları azaltılmıştır.

Kullanılan sayısal hesap yöntemi, sönüm kuvvetinin hızın ve geri çağırıcı kuvvetin yolun

fonksiyonu olması halinde geçerlidir. Bu durum uygulamada ortaya çıkan bir çok non-lineerliği kapsamaktadır. Verilen örneklerde olduğu gibi malzemelerde kuvvet deformasyon bağıntılarının non-linear olması halinde verilen sayısal hesap yönteminin faydası görülmektedir. Ayrıca bahsedilen hesap yöntemini esas alan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Son zamanlarda geliştirilen enerji söndürücülerin tasarımlarında enerji hesapları gerekmektedir [3]. Bu nedenle geliştirilen bilgisayar programına enerji hesapları eklenmiştir.

KAYNAKLAR

- (1) Aldemir, Ü., (1994), Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Aktif Kontrolün Kullanılması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- (2) Kobori, K., (1990), "Dinamik Akıllı Yapıların Teknolojik Gelişimi ve Geleceği", J.İnt. Mater. Syst. & Struc., 1, pp.391-407 (İngilizce).
- (3) Pinelli, J.P., Craig, I., J., Goodno, J., B., (1994) "Enerji Söndürücü Kaplamalı Bağlantıların Tasarım Kriterleri, Deprem Mühendisliği ABD 5. Milli konferansı., 1, 1003-1012. (İngilizce).
- (4) Reinhorn, A.M., Manolis, G.D., Wen, C.Y., (1987) "Elastik Olmayan Yapıların Aktif Kontrolü", J.Eng. Mech., ASCE, 113, pp.315-333, (İngilizce).
- (5) Soong, T.T., (1990), Aktif Yapı Kontrolü; Teori ve Uygulama, Longman Sci. & Tech., N.Y., (İngilizce).
- (6) Yang, J.N., Akbarpour, A., Ghaemmaghami, P., (1987) "Yapı Kontrolünde Yeni Optimal Kontrol Algoritmaları", J. Eng. Mech. ASCE, 113, 9, pp.1369-1386, (İngilizce).
- (7) Yang, J.N., Long, F.X., Wong, D. (1988) "Non Linear Yapıların Optimal Kontrolü", J.App.Mech, ASME, 55, pp.931-938, (İngilizce).
- (8) Yang, J.N., Danielians, A., Liu, S.C. (1991) "Binalarda Depreme Karşı Karışık Kontrol Sistemler", J.Eng.Mec.117, 836-853 (İngilizce).
- (9) Yao, J.T.P., (1972), "Yapı Kontrol Kavramı", J. Struc. ASCE, 98, pp.1567-1574, (İngilizce).
- (10) Zuk, W. (1968) "Aktif Kontrol Sistemlerinin Geçmişi ve Geleceği", Structural Control, North Holland, Amsterdam, pp.779-794 (İngilizce).