



Research Article / Araştırma Makalesi

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF CONTAINER CRANES AGAINST EARTHQUAKE INDUCED VIBRATION

C. Oktay AZELOĞLU*, Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Received/Geliş: 26.08.2011 Revised/Düzeltilme: 10.10.2011 Accepted/Kabul: 10.11.2011

ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control of container cranes against earthquake induced vibration. To accomplish this purpose, firstly a multi degree-of-freedom nonlinear dynamic model is developed including behavior of the container cranes under earthquakes and dynamics of soil and linear motors and then a Self-tuning Fuzzy Logic Controller (STFLC) is designed to reduce the vibrations of the crane structure. Vibration control using intelligent controllers, such as fuzzy logic has attracted the attention of structural control engineers during the last few years, because fuzzy logic can handle, uncertainties and heuristic knowledge and even non-linearities effectively and easily. The improved seismic control performance can be achieved by converting a simply designed static gain into a real time variable dynamic gain through a self-tuning mechanism. Performance of the designed STFLC and active vibration control system is simulated. The time history of ground motion of the Kobe earthquake ($M_w=7.2$) in 1995, which is a disturbance input, is applied to modeled container crane. Simulation results exhibit that superior earthquake induced vibration suppression is achieved by the use of designed controllers and active vibration control system. It is seen that this controller descends the effects of such accelerations substantially. It can be concluded that the controllers used may affect the structural design of cranes drastically and improves safety of cranes.

Keywords: Self-tuning fuzzy logic control, container cranes, nonlinear dynamic modeling, active vibration control, earthquake-induced vibration.

KONTEYNER KRENLERİNDE DEPREMDEN KAYNAKLANAN TİTREŞİMLERİN AKTİF KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada, konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimleri azaltmak için aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle konteyner krenlerinin deprem esnasındaki davranışlarını ortaya koyan, toprağın ve doğrusal motorların dinamiğini de içeren, çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir dinamik model geliştirilmiş, ardından titreşimleri azaltacak Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolörün (ÖUBMK) tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolör, çıkış kazancını modelden bağımsız, sistem performansına bağlı kural tabanı ile değiştirip geliştirerek kendini ayarlayabilen bulanık mantık tabanlı kontrolör yapısıdır. Kontrol kazancı, kontrolör mimarisine yerleştirilen bir öz uyarlama mekanizması ile her örneklem zamanında geliştirilen bulanık mantık kurallarınca dinamik olarak ayarlanarak, adaptif kontrolcü karakteri göstermektedir. Tasarlanan kontrolörün ve konteyner krenleri için önerilen aktif kontrol sisteminin performansı benzetim çalışmaları ile ortaya konmuştur. Benzetim çalışmalarında bozucu giriş olarak 1995 Kobe depremine ($M_w=7.2$) ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Sonuçlar önerilen aktif kontrol sisteminin ve tasarlanan kontrolörün konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Krenlerde bu sistemin kullanılması depremlerde konteyner krenlerinin hasar görmelerini ve yıkılmalarını engelleyerek krenlerin depreme yönelik güvenliğini sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler: Öz uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolör, konteyner krenleri, doğrusal olmayan dinamik model, aktif titreşim kontrolü, depremden kaynaklanan titreşimler.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: azeloglu@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 28 91

1. GİRİŞ

Depremlerin krenlere verdiği hasarların önemi ve dolayısıyla krenlerde depreme yönelik tedbirler alınmasının gerekliliği ancak 2000'li yıllara yaklaşıldığında anlaşılmaya başlandı. Depremlerin krenler üzerindeki etkisinin geç fark edilmesinin bir nedeni büyük kapasiteli krenlerin yaygın bir şekilde kullanılmıyor olmasıydı. Ancak son yıllarda dünya çapında üretim ve tüketimin artmasının doğal bir sonucu olarak daha büyük gemiler, daha büyük limanlar ve dolayısıyla daha büyük krenler kullanılmaya başlanmıştır. Diğer bir neden ise krenler üzerinde deprem etkilerini gözlemleyecek önemli bir deneyimin bulunmamasıydı. Ancak 1995 Kobe depreminin krenler üzerindeki yıkıcı etkisi bu konunun önemini ortaya koymuştur. Bu depremde büyük kapasiteli krenlerin kolayca hasar görmeleri ve yıkılmaları krenlerin depreme karşı dayanıklı hale getirilmesini gündeme getirmiştir. Şekil 1'de Kobe depreminde yıkılan bir konteyner kreni görülmektedir.



Şekil 1. 1995 Kobe depreminde yıkılan bir konteyner kreni (Fotoğraf: C. Scawthorn).

Literatürde krenlerin sismik davranışlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Kanayama ve Kashiwazaki [1], yapmış oldukları çalışmada konteyner krenlerinin büyük depremler altındaki dinamik davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, 1/25 ölçekli bir kren modeli oluşturulmuş ve sarsma masası üzerinde gerçek deprem verileri ile testler gerçekleştirilmişlerdir. Testler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmıştır. Çalışmada tekerleklerin raydan çıkması, ayaklarda burkulma ve devrilme olmak üzere krenlerin depremde maruz kaldığı üç temel hasar durumu incelenmiştir. Çalışmanın odak noktası krenlerin sismik davranışlarını gözlemlemektir. Kanayama ve diğerleri [2], yapmış oldukları çalışmada 1/8 ölçekli bir kren modeli oluşturmuş ve sarsma masası üzerinde gerçek deprem verileri ile testler gerçekleştirmişlerdir. Testler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmıştır. Çalışma krenlerin depremde maruz kaldığı üç temel hasar durumunu incelemiş ve kren yapısının deprem etkisi altındaki esnekliğinin gözlemlenmesi amacıyla odaklanmıştır. Otani ve diğerleri [3], yapmış oldukları çalışmada köprülülük krenlerde deprem etkisiyle oluşan düşey etkileri incelemiştir. Bu amaçla 1/8 ölçekli bir köprülülük kren model oluşturulmuş ve düşey eksenli bir sarsma masasında gerçek deprem verileri uygulanarak sistemde oluşan düşey titreşimler ve dinamik etkiler incelenmiştir. Kobayashi ve diğerleri [4], yapmış oldukları çalışmada konteyner krenlerinin sismik etkiler altındaki dinamik davranışlarını incelemiştir. Çalışmada krenin sadece tekerlek ray bağlantısına ait 1/8 ölçekli bir model oluşturulmuş ve sarsma masasında gerçek deprem verileri uygulanarak sistemde oluşan dinamik etkiler incelenmiştir. Çalışma deprem esnasında tekerlekler ile raylar arasındaki kontak problemini ve raydan çıkma davranışını incelemek üzerine odaklanmıştır. Soderberg ve Jordan [5], Koshab ve Jacobs [6], Jacobs ve diğerleri [7], jumbo

konteyner krenlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyacak çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda, bir jumbo konteyner krenin 1/20 ölçekli bir modeli üzerinde sarsma masasında deneyler gerçekleştirilmiş, ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan tek boyutlu model üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak kren yapıları için bir takım konstrüktif tedbirler ortaya koymuştur. Alınacak konstrüktif tedbirler bazı yerlere ilave kirişlerin yerleştirilmesi, kiriş kesitlerinin ise ilave takviyeler ile güçlendirilmesi üzerinedir. Ayrıca, Mitsubishi firması tarafından gerçekleştirilen bir izolasyon sistemi de önerilmektedir. Bu sistem portal ayaklar ile yürütme mekanizması arasına bir sönümleme mekanizmasının yerleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Sugano ve diğerleri [8], yapmış oldukları çalışmada farklı metotlar kullanarak depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını teorik olarak incelemiş, ayrıca 1/15 ölçekli bir kren modeli oluşturularak sarsma masası üzerinde testler gerçekleştirmiştir. Teorik çalışmada, kren modeli tek serbestlik dereceli basit bir kütle yay sistemi olarak modellenmiş, ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle iki ve üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ise, bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve testlerde titreşimleri sönümleyecek bir izolasyon sistemi denenmiştir. Sonuçta, farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, ayrıca izolasyon sistemi kullanılmasının kren yapısına gelen ivmeleri azalttığı ortaya konmuştur. Sağırılı ve diğerleri [9], gerçekleştirdikleri projede portal krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmanın teorik kısmında krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli bir matematik model geliştirilmiş, deneysel kısmında ise 1/20 ölçekli bir kren modeli oluşturularak sarsma masası üzerinde gerçek deprem verileri uygulanarak testler gerçekleştirilerek matematik modelin doğruluğu ortaya konmuştur. Sağırılı ve diğerleri [10], devam eden projelerinde konteyner krenlerinin sismik performanslarının artırılması üzerinde çalışmaktadırlar. Çalışma konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin zeminde yapılacak iyileştirmeler yoluyla azaltılması üzerine odaklanmıştır. Çalışmada 1/20 ölçekli bir konteyner kreni modeli oluşturulmuş ve sarsma masası üzerinde gerçek deprem verileri uygulanarak testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar zemin iyileştirmesi yapılması durumunda kren yapısına gelen ivmelerin azaldığını göstermektedir.

Son yıllarda depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulamaları üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yer değiştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup, titreşimlerin etkilerini yapıda bir karşı hareket üreterek sönümlemeye çalışan kontrol sistemleridir [11]. Literatürde yapısal sistemlerde depremden kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulaması içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [12, 13]. Aktif titreşim kontrolü ile ilgili çalışmalarda doğrusal motorların kullanılabilirliği literatürde teorik ve deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır [14, 12]. Krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif titreşim kontrolü yoluyla azaltılması ise yeni ve gelişmeye açık bir konudur. Bu yolla krenlerin deprem performanslarını arttırmak için yeni bir yöntem önerilmektedir. Literatürde bu konuda yapılan ilk çalışma Sağırılı ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [15]. Bu çalışmada portal krenlerde depremden kaynaklanan titreşimleri ortaya koyacak doğrusal olmayan bir dinamik model geliştirilmiş, ardından tasarlanan kontrolör ile kren yapısının stabilitesi sağlanmıştır. Çalışmada önerilen kontrolcü Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrol yapısıdır. Çalışmada bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmış ve tasarlanan kontrolörün performansı klasik PD kontrolör ile karşılaştırılarak sistemin başarısı ortaya konmuştur. Sonuçlar krenlerde aktif titreşim kontrolünün başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir.

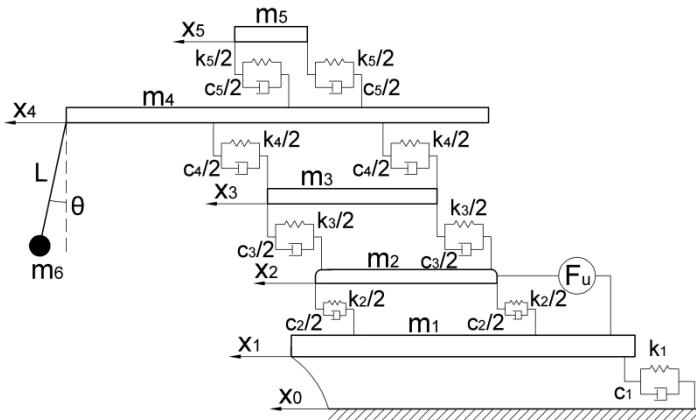
Bu çalışmanın amacı, konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan titreşimlerin aktif kontrolünü sağlamaktır. Çalışmada öncelikle konteyner krenlerinin deprem esnasındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir dinamik model geliştirilmiş, ardından aktif titreşim kontrolünü gerçekleştirecek Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolörün (ÖUBMK) tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kontrolörün performansı Kobe

depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonunun uygulandığı benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuş ve sonuç kısmında sistemin başarısı vurgulanmıştır.

2. MATEMATİK MODEL

Çalışmanın bu bölümünde deprem etkisindeki konteyner krenlerinde yapısal titreşimlerin incelenebilmesi için, toprağın ve doğrusal motorların dinamiğini de içeren, 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir model oluşturulmuştur. Depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, serbestlik derecesi sadece bu yönde katılmıştır. Deprem esnasında konteyner krenleri üzerindeki en büyük yıkıcı etkinin ayaklarda oluşması ve en büyük yer değiştirmelerin ise krenin köprü ve üst kısmında meydana gelmesi beklenmektedir. Bu nedenle, aktif kontrol zemin ile yürütme mekanizması arasında uygulanmış ve sistemde aktif izolatör olarak doğrusal motorlar kullanılmıştır.

Sistemin fiziksel modeli Şekil 2’de görülmektedir. Modelde, $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ sırasıyla, konteyner rıhtımı (zemin), yürütme mekanizması, rijit kirişler, köprü, üst kirişler ve yükün kütlesi, k_1 ve c_1 toprağın rijitliği ve sönümü, k_2, k_3, k_4 ve k_5 portal ayakların rijitliği, c_2, c_3, c_4 ve c_5 portal ayakların sönümü ve L halatın uzunluğudur. x_0 kren yapısına uygulanan bozucu deprem hareketini, x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 ilgili kısımların yer değiştirmelerini ve θ yükün salınım açısını ifade etmektedir.



Şekil 2. Depreme maruz bir konteyner kreninin eşdeğer fiziksel modeli.

Geliştirilen dinamik model şu kabulleri içermektedir; sistemin serbestlik derecesi yatay doğrultuda alınmıştır, tüm kütle, yay ve sönüm elemanlarının yatay doğrultuda etkili olduğu kabul edilmiştir, modelde yer alan tüm kütleler noktasal kütle olarak kabul edilmiştir, halat rijit ve kütlesiz olarak ele alınmıştır, toprağın rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir, doğrusal motorlar (4 adet) zemin ile yürütme mekanizması arasına yerleştirilmiştir.

Sistemin hareket denklemlerinin elde edilmesinde Lagrange yöntemi kullanılmıştır. Lagrange denklemini aşağıdaki gibi ifade edersek:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (i = 1, \dots, 6) \quad (1)$$

burada, E_k sistemin kinetik enerjisi, E_p sistemin potansiyel enerjisi, E_D sistemin sönüm enerjisi, q_i genelleştirilmiş koordinatlar ($x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta]^T$) ve Q_i dış kuvvetlerdir. Kren yapısının hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_d + F_u \quad (2)$$

Burada, F_d bozucu kuvvet vektörünü, F_u doğrusal motorlar tarafından üretilen kontrol kuvvetini göstermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedirler.

$$F_d = [-(c_1\dot{x}_0 + k_1x_0) \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad \text{ve} \quad F_u = [-F_u \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

Sistemin enerji denklemleri elde edilir, Lagrange denkleminde yerine yazılırsa konteyner krenine ait hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 = -(c_1\dot{x}_0 + k_1x_0) - F_u \quad (4)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + (k_2 + k_3)x_2 - k_2x_1 - k_3x_3 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 - c_3\dot{x}_3 = F_u \quad (5)$$

$$m_3\ddot{x}_3 + (k_3 + k_4)x_3 - k_3x_2 - k_4x_4 + (c_3 + c_4)\dot{x}_3 - c_3\dot{x}_2 - c_4\dot{x}_4 = 0 \quad (6)$$

$$(m_4 + m_6)\ddot{x}_4 + m_6L\ddot{\theta}\cos\theta + (k_4 + k_5)x_4 - k_4x_3 - k_5x_5 + (c_4 + c_5)\dot{x}_4 - c_4\dot{x}_3 - c_5\dot{x}_5 = 0 \quad (7)$$

$$m_5\ddot{x}_5 + k_5x_5 - k_5x_4 + c_5\dot{x}_5 - c_5\dot{x}_4 = 0 \quad (8)$$

$$m_6L^2\ddot{\theta} + m_6L\ddot{x}_4\cos\theta + m_6gL\sin\theta = 0 \quad (9)$$

Aktif titreşim kontrolü ile ilgili çalışmalarda doğrusal motorların kullanılabilirliği literatürde deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır. Bu tür bir doğrusal motorun denklemleri ve bobin sargı akımı ile kontrol kuvveti arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Ri + K_e(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = u \quad (10)$$

$$F_u = K_f i \quad (11)$$

u ve i sırasıyla bobin sargısının voltaj ve akımıdır. Burada u aynı zamanda kontrol voltaj girişidir. R ve K_e bobin sargısının direnç değeri ve etki eden voltaj sabiti, K_f bobin sargısının itme sabitidir. Denklemlerde bobin sargısının endüktans akımı ihmal edilmiştir.

3. ÖZ UYARLAMALI BULANIK MANTIK KONTROLÖR TASARIMI

Bulanık Mantık, Zadeh'in "Bulanık Kümeler" adlı yayınından günümüze kadar büyük bir gelişme göstermiştir [16]. Yapay zekânın konularından biri olan bulanık mantık, kontrol alanında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bulanık Mantık Kontrolör (BMK) tasarımı genellikle dört evreden oluşur. Bunlar; giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi ve ayarı; kural tabanının tasarımı ve çıkarım ile durulaştırma yöntemlerinin belirlenmesidir.

Bunların arasında, giriş ve çıkış ölçekleme faktörlerinin belirlenmesine ayrı bir önem gösterilmelidir. Zira çıkış ölçekleme faktörü, sistemin kararlılığı ve salınım eğilimi üzerinde oldukça etkiliyken; giriş ölçekleme faktörleri ise kontrolörün iyi seçilmiş bir çalışma bölgesi için temel hassasiyetini belirlemektedir [17].

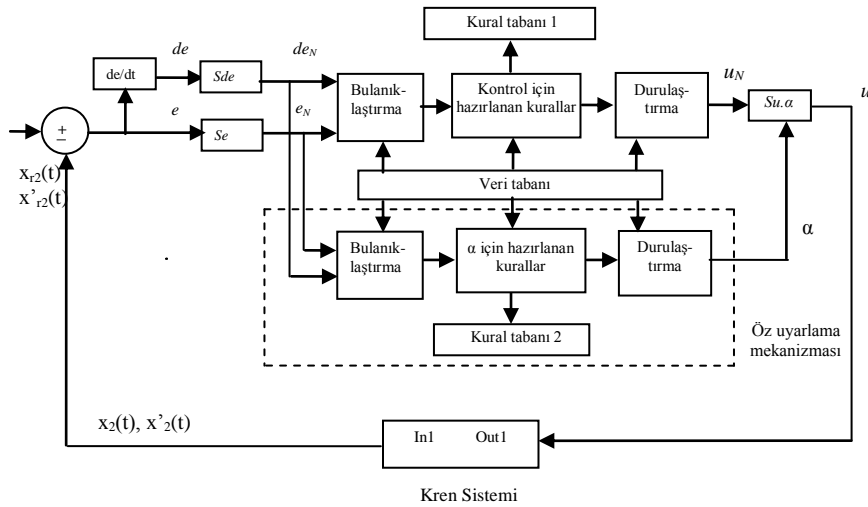
Çalışmada kullanılan kontrolör yapısı, kontrol edilen sistemin anlık durumuna göre kontrolörün çıkış kazancını çevrim içi olarak ayarlanmaktadır [18]. Dikkat edilirse bu yapı bir tür adaptif kontrolör yapısıdır. Diğer bulanık mantık kontrolcülerinde çıkış ölçekleme faktörleri olan değişkenler manuel olarak ayarlanır ve kontrolörün prosese uygulanması esnasında değerleri sabit tutulur. Ancak çıkış ölçekleme faktörlerinin sabit tutulması kontrolörün performansının belli bir aralıkta sabit tutulması anlamına gelir. Bu sakıncayı ortadan kaldırmak amacıyla bulanık kontrolörün çıkış ölçekleme katsayısını ayar eden bir öz uyarlama yapısı kontrolör mimarisine eklenmiştir. Bu öz uyarlama yapısı, var olan BMK'nın çıkış ölçekleme faktörünü yeni bir kural tabanı ile modifiye eder. Burada dikkat edilmesi gereken nokta aynı bulanıklaştırma mekanizmasının kullanılmasıdır. Bu nedenle bu yapı, ÖUBMK olarak adlandırılabilir. Önerilen

kontrolör yapısı Şekil 3’de gösterilmektedir. ÖUBMK’nın kontrol işareti ise (12) ifadesindeki gibi ifade edilebilir.

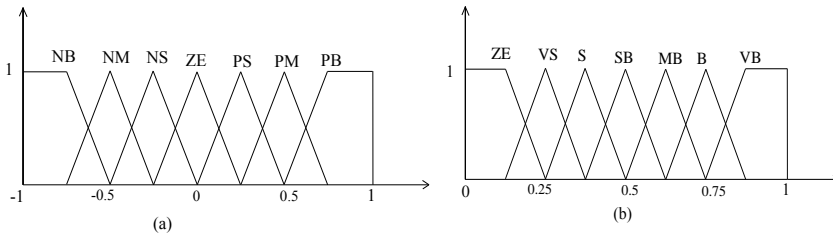
$$u_{\text{ÖUBMK}}(t) = S_u \alpha F\{e, de\} \quad (12)$$

Çalışmada önerilen öz uyarlama mekanizması Şekil 3’de kesikli çizgiyle (---) gösterilmektedir. BMK’nın giriş değişkenleri e , de ’yi ve çıkış değişkeni u ’yu bulanıklaştırmak için tanımlanan üyelik fonksiyonları $[-1 \ 1]$ ortak aralığında tanımlanmaktadır. $[0 \ 1]$ aralığında tanımlanan üyelik fonksiyonları α ’yı hesaplamak için kullanılmaktadır. Üyelik fonksiyonları olarak sınır değerleri hariç simetrik üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Komşu üyelik fonksiyonları arasında % 50’lik bir çıkışma vardır. Bu en tarafsız ve doğal seçimdir. Üyelik fonksiyonları Şekil 4’te gösterilmektedir. Dilsel değişkenler olarak kullanılan P, N, ZE, B, S, M, V sırasıyla Positive, Negative, Zero, Big, Medium, Small ve Very anlamına gelmektedir. Burada α ’yı hesaplamakta kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4(a)’da gösterilen üyelik fonksiyonlarının yatay eksenin sağ tarafına ötelenmesi ve $[0 \ 1]$ aralığına getirilmesi ile elde edilmiştir. Bunun için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır. Burada x $[-1, 1]$ aralığında herhangi bir yatay nokta ve y bu noktanın (b) deki yansımasıdır.

$$y = 0.5(x+1) \quad (13)$$



Şekil 3. ÖUBMK yapısının blok diyagramı.



Şekil 4. a) e , de ve u için üyelik fonksiyonları b) α kazancı için üyelik fonksiyonları

BMK'ün $[-1 \ 1]$ aralığında tanımlanmış giriş değerleri e_N , de_N , ve çıkış u_N için üyelik fonksiyonları ölçeklendirilmektedir. Giriş ve çıkış ölçeklendirme faktörlerinin ayarlanması işleminin optimal performansa ulaşılmasında oldukça önemli bir rolü vardır. e ve de 'nin gerçek değerleri, S_e ve S_{de} ölçekleme faktörleri ile $[-1 \ 1]$ aralığına taşınır. Çıkışın ölçekleme faktörü S_u ise klasik BMK'ün ölçeklendirilmiş çıkış değeri u_N 'i gerçek değer aralığına taşır. Klasik BMK'de çıkışın ölçeklendirme faktörü S_u iken ÖUBMK'de bu değer $S_u \cdot \alpha$ olur. Benzetim çalışmaları sonucu ayarlanan S_e , S_{de} ve S_u ölçekleme faktörleri Ek'de verilmiştir. Burada amaç e ve de 'ye bağlı olarak modelden bağımsız, performansa bağlı kural tabanı ile α kazanç yenileme katsayısını hesaplamaktır. ÖUBMK'ün giriş ve çıkış değişkenleri ile ölçekleme faktörleri arasındaki ilişkiler aşağıda tanımlanmaktadır.

$$e_N = S_e \cdot e \quad (14)$$

$$de_N = S_{de} \cdot de \quad (15)$$

$$u = (\alpha \cdot S_u) \cdot u_N \quad (16)$$

Bulanık mantık kural tabanı bulanık bir kontrolörde kontrol stratejisi açısından oldukça önemli etkiye sahiptir. BMK için kontrolör çıkışı u ; "EĞER $e = E$ ve $de = dE$ İSE O HALDE $u = U$ " kural yapısı ile hesaplanır. Kazanç yenileme faktörü α ise "EĞER $e = E$ ve $de = dE$ İSE O HALDE $\alpha = \alpha$ " kuralları ile hesaplanır. Öz uyarlamalı kontrolörün kazancı, kontrolör faaliyetten, sabit kalmaz ve kazanç yenileme faktörü α ile yenilenir. Bu sürekli kazanç değişiminin amacı, kontrolörün cevabını değişen koşullara rağmen istenilen özelliklere getirmektir. Bu durumda hazırlanan kontrolör basit bir adaptif geri beslemeli kontrolördür.

Kazanç ayarlama mekanizmasına ait kural tabanının oluşturulmasında aşağıdaki hususlar göz önüne alınmıştır:

a) Hata büyük iken ve e ve de aynı işarete sahipken (bu durumda hata sadece referanstan çok uzakta değil aynı zamanda giderek uzaklaşmaktadır) kazanç işareti durumu daha da kötüleştirmemek amacı ile çok büyük değerlere çıkartılır. Bu olay If e is PB and de is PS then α is VB veya If e is NM and de is NM then α is VB, şeklindeki kurallar ile gerçekleşir.

b) Hata küçük değerlerde iken üst ve alt aşımaları engellemek amacı ile If e is Z and de is NM then α is B tipinde kurallar kullanılmıştır. Bu kural şu anlama gelir: Proses çıkışı referans noktaya varmış ve üst aşım yaratacak şekilde referans noktadan uzaklaşmaktadır. Bu durumda büyük kazanç işareti yukarı doğru yönelmiş çıkışı çok sert bir şekilde engelleyerek küçük aşımalar neden olmaktadır. Benzer şekilde If e is NS and de is PS then α is VS şeklindeki kural ile de alt aşımalar engellenmeye çalışılmıştır. Referans nokta etrafındaki bu tarz geniş kazanç değişimleri sayesinde çatırtılar önlenmiş olur ve yerleşme zamanları da küçülür. Referans nokta etrafındaki bu tarz büyük genlik değişimleri ancak bu mimaride kullanılan öz uyarlama mekanizmasına benzer yöntemler ile sağlanabilir.

c) Ani bir yük değişimi meydana geldiği anda e küçük bir değere sahipse de çok büyük (e ile aynı işarete) değerler alır. Bu durumda yapılacak iş α kazancını çok büyük değerlere çıkartmaktır. Bu nedenle, yük değişimlerine karşı kontrolör If e is PS and de is PM then α is B veya If e is NS and de is NM then α is B, şeklindeki kurallar kural tabanına eklenmiştir [18].

Çizelge 1. u için Kural Tabanı

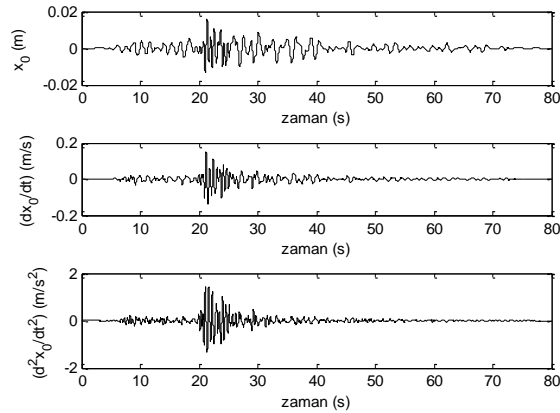
de/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

Çizelge 2. α için kural tabanı

de/e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE
NM	VB	VB	B	B	MB	S	VS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmalarında konteyner krenine ait doğrusal olmayan matematik modele bozucu giriş olarak 1995 Kobe depremine ait yer hareketinin zaman fonksiyonu uygulanmıştır. Kobe depreminin yer hareketi Şekil 5'de görülmektedir [19]. Kontrolör tasarımında ve benzetim çalışmalarında Matlab Simulink ve Fuzzy Toolbox kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında gerçek bir jumbo konteyner kreninin $\frac{1}{4}$ kapasiteli tiplerine ait parametreler kullanılmış olup [8], kren parametreleri, doğrusal motor parametreleri ve ÖUBMK giriş-çıkış ölçekleme faktörleri Ekte verilmiştir.

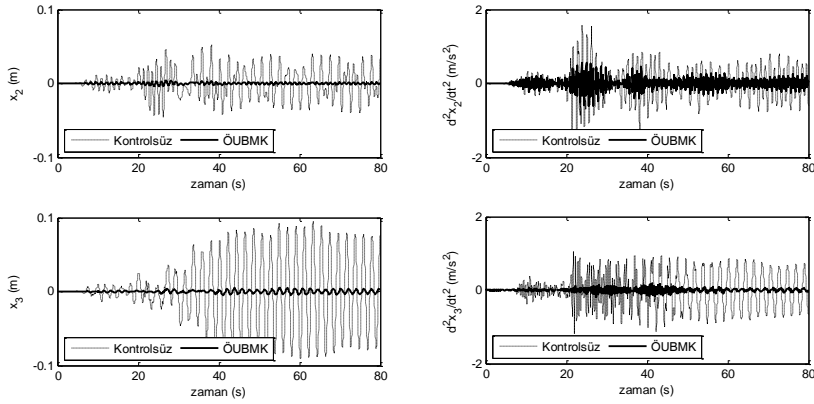


Şekil 5. Kobe depreminin yer hareketi.

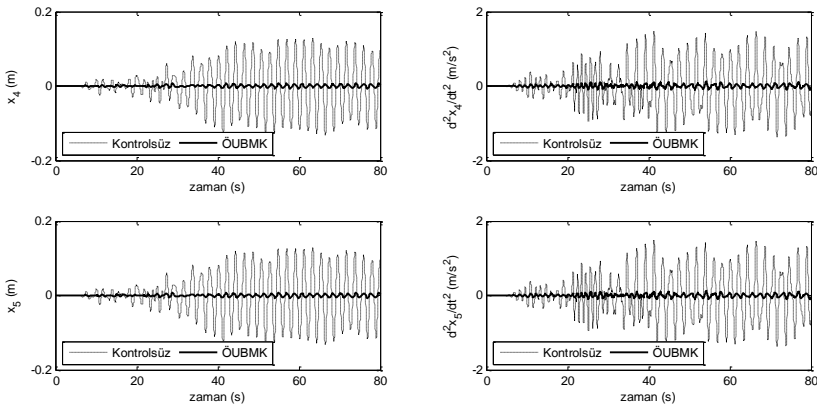
Benzetim çalışmalarının sonuçları Şekil 6 – 10'da verilmiştir. Şekil 6-8'de x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yer değiştirme ve ivme zaman cevapları kontrolsüz ve ÖUBMK'li olarak görülmektedir. Krenlerin depreme yönelik tasarımında güvenlik en önemli performans ölçütü olmaktadır. Genel olarak yapıların deprem güvenliği yer değiştirme cevaplarına bağlı olarak değerlendirilir. Sonuçlar ÖUBMK'ün depremden kaynaklanan titreşimleri etkili bir şekilde azalttığını ve krenin depreme yönelik güvenliğini sağladığını göstermektedir. Şekil 9'de ise her bir doğrusal motorun ürettiği kontrol kuvvetinin ve kontrol voltajının zaman cevabı yer almaktadır.

Şekil 10'da x_4 ve x_5 'in yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları kontrolsüz ve ÖUBMK'li olarak görülmektedir. Sistem altı serbestlik derecesine sahip olduğundan; 0.20, 0.45, 0.87, 1.21, 1.97, 2.61 Hz. olmak üzere altı adet doğal frekansı vardır. Bu değerler, kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır. Depremlerde özellikle 1. mod en tehlikeli mod olarak

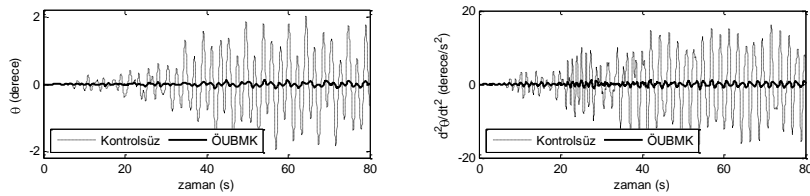
kabul edilmektedir. Amaçlandığı gibi rezonans değerleri özellikle 1. mod olmak üzere etkili şekilde bastırılmıştır.



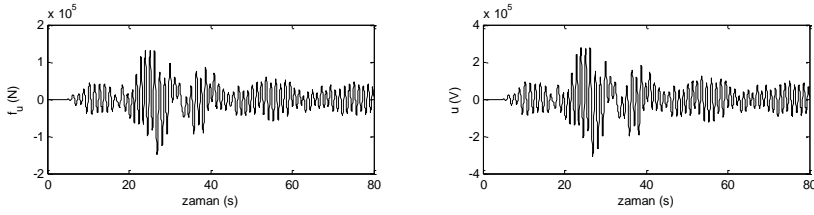
Şekil 6. x_2 ve x_3 'ün yer değiştirme ve ivme zaman cevapları.



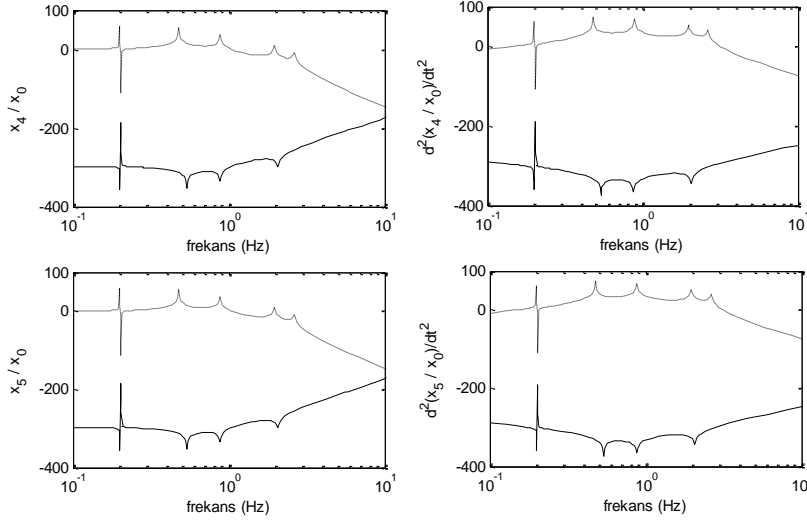
Şekil 7. x_4 ve x_5 'in yer değiştirme ve ivme zaman cevapları.



Şekil 8. θ 'nın yer değiştirme ve ivme zaman cevapları.



Şekil 9. Her bir doğrusal motorun ürettiği kontrol kuvveti ve kontrol voltajının zaman cevabı.



Şekil 10. x_4 ve x_5 'in yer değiştirme ve ivme frekans cevapları.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada konteyner krenlerinde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması sağlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle konteyner krenlerinin deprem esnasındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir dinamik model geliştirilmiş, ardından titreşimleri azaltacak kontrolörün tasarımı yapılmıştır. Kontrolör olarak, bulanık mantığın üstünlüklerine dayalı Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yapının diğer bulanık mantık kontrolörlerden üstünlüğü; hazırlanan kural tabanı ile adaptif kontrolcü karakterinde çalışarak, değişen şartlara karşı kontrolör çıkış kazancını dinamik olarak yenileyebilmesidir. Konteyner krenleri için önerilen aktif kontrol sisteminin ve tasarlanan kontrolörün performansı benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuştur. Benzetim çalışmalarında 1995 Kobe depreminin yer hareketinin zaman fonksiyonu sisteme bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Sonuçlar kren yapılarının aktif kontrolünde bu tip bulanık mantık tabanlı adaptif kontrolörlerin önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Konteyner krenlerinde bu sistemin kullanılması depremde kaynaklanan yapısal titreşimleri etkili bir şekilde azaltacak, hasar görmelerini ve yıkılmalarını engelleyerek güvenliğini sağlayacaktır.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Kanayama, T., Kashiwazaki, A., "A Study on the Dynamic Behavior of Container Cranes Under Strong Earthquakes", *Seismic Engineering* 364, 276-284, 1998.
- [2] Kanayama, T., Kashiwazaki, A., Shimizu, N., Nakamura I., Kobayashi, N., "Large Shaking Table Test of a Container Crane by Strong Ground Excitation", *Seismic Engineering*, 364, 243-248, 1998.
- [3] Otani, A., ve diğerleri, "Vertical Seismic Response of Overhead Crane", 'Nuclear Engineering and Design', Volume 212, 211-220, 2002.
- [4] Kobayashi, N., ve diğerleri, "Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem Between Wheels and Rails", 'Journal of Pressure Vessel Technology', Volume 126, 59-65, 2004.
- [5] Soderberg, E., Jordan, M., "Seismic Response of Jumbo Container Cranes and Design Recommendations to Limit Damage and Prevent Collapse", ASCE Ports 2007 Conference, San Diego, CA., 2007.
- [6] Koshab B., Jacobs L., "Seismic Performance of Container Cranes", Seismic Risk Management for Port Systems, NEESR Grand Challenge Third Annual Meeting, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, January 10, 2008.
- [7] Jacobs, L., DesRoches R., Leon, R.T., "Shake Table Testing of Container Cranes", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 14th WCEE, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [8] Sugano, T., Takenobu, M., Suzuki, T., Shiozaki, Y., "Design Procedures of Seismic-Isolated Container Crane at Port", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 14th WCEE, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [9] Sağırılı, A., Azeloğlu, C.O., Büyüksahin, U., "Krenlerde Hareketli ve Salınlımlı Yüklerin Kuvvet Geri Beslemeli Kontrolü ve Sismik Etkilere Maruz Krenlerin Dinamik Davranışlarının ve Stabilitésinin İncelenmesi", Y.T.Ü., 2010-06-01-KAP01, 2010.
- [10] Sağırılı, A., Azeloğlu, C.O., Edinçliler, A., "Krenlerin Sismik Performanslarının Zemin İyileştirilmesi Yoluyla Arttırılması", Y.T.Ü., 2011-06-01-KAP01, 2011.
- [11] Soong, T.T., Constantinou, M.C., "Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering", CISM Courses and Lectures No: 345, Springer-Verlag, Wien, New York 1994.
- [12] Guclu, R., Yazici, H., "Fuzzy Logic Control of a Non-linear Structural System against Earthquake Induced Vibration", *Journal of Vibration and Control*, Vol.13, No.11, 1535-1551, 2007.
- [13] Guclu, R., Yazici, H., "Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers.", *Journal of Sound and Vibration*, 318, 36-49, 2008.
- [14] Nishimura, H., Ohkubo, Y., Nonami, K., "6 Active Isolation Control for Multi-Degree-of-Freedom Structural System", Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, September, 1996.
- [15] Sağırılı, A., Azeloğlu, C.O., Guclu, R., Yazici, H., "Self-tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures against Earthquake Induced Vibration", *Nonlinear Dynamics*, 64, 375-384, 2011.
- [16] Zadeh, L., "Fuzzy Sets," *Journal of Information and Control* 8, 338-353, 1965.
- [17] Küçükdemiral, İ.B., "Nöral - Genetik Tabanlı Optimal Bulanık Kontrolörün Gerçeklenmesi ve DC Servomotorlara Uygulanması", Elektrik-Elektronik Fakültesi, Y.T.Ü., 2002.
- [18] Mudi R.K., Pal, N.R., "A Robust Self-Tuning Scheme For PI- and PD- Type Fuzzy Controllers", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 1, 2-16, 1999.
- [19] Kasımzade, A.A., "Structural Dynamics", Birsan Yayınevi, İstanbul, 2004.

EK

Konteyner krenine ait parametreler, doğrusal motor parametreleri ve ÖUBMK giriş-çıkış ölçekleme faktörleri.

$m_1 = 600000\text{kg}$	$k_1 = 18050000\text{N/m}$	$c_2 = 10680\text{Ns/m}$	$K_f = 2\text{N/A}$	$S_{del} = 0.6$
$m_2 = 63000\text{kg}$	$k_2 = 12448000\text{N/m}$	$c_3 = 1900\text{Ns/m}$	$K_e = 2\text{Volt}$	$S_{ul} = 20000000$
$m_3 = 38200\text{kg}$	$k_3 = 2210000\text{N/m}$	$c_4 = 2890\text{Ns/m}$	$S_e = 40$	
$m_4 = 105000\text{kg}$	$k_4 = 3360000\text{N/m}$	$c_5 = 650\text{Ns/m}$	$S_{de} = 0.4$	
$m_5 = 15000\text{kg}$	$k_5 = 765000\text{N/m}$	$L = 6\text{m}$	$S_{it} = 10000000$	
$m_6 = 20000\text{kg}$	$c_l = 26170\text{Ns/m}$	$R = 4.2\Omega$	$S_{el} = 60$	