

**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ YAPILARIN AKTİF
KONTROLÜ**

101192

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Bekir Bora GÖZÜKİZİL
(501980071011)**

101192

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Haziran 2000
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Haziran 2000**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zekai CELEP

Prof. Zekeriya POLAT

HAZİRAN 2000

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, deprem etkisi altında olan aktif kontrollü 8 katlı bir yapının 3 farklı deprem için lineer davranışı incelenmiştir.

Tez çalışmam sırasında bilgilerinden yararlandığım herkese teşekkür ederim. Diğer yandan beni bugünkü konumuma getiren başta aileme, tüm öğretmenlerime ve değerli meslektaş ağabeyim Kıvan İpekar'a teşekkürlerimi sunarım.

Bekir Bora GÖZÜKIZIL

Haziran 2000



İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	IV
SEMBOL LİSTESİ	V
ÖZET	VI
SUMMARY	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu	1
2. YAPILARIN KONTROLÜ	5
3. KONTROL ALGORİTMALARI	9
3.1. Klasik lineer optimal kontrol teorisi	9
3.2. Ani optimal kontrol algoritması	16
4. SAYISAL ÖRNEKLER	20
5. SONUÇ	21
EKLER	22
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	35

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Aktif kontrol sisteminin çalışma prensipleri.....	6
Şekil 3.1 : n katlı binanın ayrıklaştırılmış modeli.....	10



SEMBOL LİSTESİ

A	: Sistem matrisi
B	: Kontrol kuvvetleri yer matrisi
c_i	: i. katın sönüm değeri
C	: Sönüm matrisi
$f(t)$	: Dış kuvvet vektörü, deprem ivmesi
G	: Kontrol kazanç vektörü
H	: Hamiltonian matris
J	: Performans indeksi
k_i	: i. katın rijitliği
K	: Rijitlik matrisi
m_i	: i. katın kütlesi
M	: Kütle matrisi
Δt	: Zaman aralığı
P	: Riccati matrisi
λ	: Lagrange çarpanı, eş durum vektörü
Q	: Simetrik pozitif semidefinit ağırlık matrisi
R	: Simetrik pozitif definit ağırlık matrisi
u	: Kontrol kuvvet vektörü
x	: Deplasman vektörü
Z	: Durum vektörü

DEPREM ETKİSİNDEKİ YAPILARIN AKTİF KONTROLÜ

ÖZET

Tarihsel süreç olarak yapı tasarımı üç safhaya ayrılabilir. Bunlardan klasik dönem sadece statik kuvvetlerle ilgilenir ve tasarlanan yapının depreme karşı koyacak yeter rijitlik de olması prensibine dayanır. İkinci dönem ise modern çağdır. Modern çağda yapı tasarlanırken dinamik analize de başvurulur, hangi durumlarda dinamik analize başvurulacağı yönetmelikler de belirtilir. Bu iki dönemde de yapılar dinamik kuvvetlere kendi başlarına karşı koyarlar, bu sebeple sistem yeter rijitlikte ve süneklikte olmalıdır. Bu ise kesit alanlarının büyümesine veya kullanılan malzeme dayanımının artmasını gerektirir. Yapısal tasarım açısından üçüncü dönem ise yapının dinamik kuvvetlere karşı, bir geri besleme sistemi yardımıyla kendini adapte edebilmesi prensibine dayanır. Aktif veya pasif kontrol sisteminin kullanılmasının sebebi, şiddetli depremlerde veya rüzgarda, hastane ve iletişim merkezleri gibi yapıların içindeki değerli eşyaların korunması da olabilir. Asıl amaç insan hayatını kurtarmak olmakla birlikte, yapının güvenliği, işlevselliği dolayısıyla gerilme ve deplasman gibi iç kuvvetleri de sınır değerleri aşmamalıdır. Sınır durumlar güvenlik yönünden veya konfor bakımından seçilir ve genelde deplasmanlar kontrol altına alınarak azaltılmaya çalışılır.

Yapısal kontrol yeni binaların tasarımında veya mevcut binaların onarımında, şiddetli deprem kuvvetlerine ve rüzgarlara karşı koymak açısından son derece önemlidir. Özellikle yapının ana taşıyıcı sisteminin zarar görmemesine çalışılır. Bununla birlikte kontrol elemanlarının tasarımında sadece tek bir uygun çözüm bulunmaz.

Seçilen kontrol sisteminin performansı her deprem için farklıdır. Deprem kaydının büyüklüğü ve frekans içeriği kontrol algoritmasının optimalliğini etkiler. Bu yüzden kontrol mekanizmasının seçimi, oluşturulması sürekli araştırılan bir konudur. En etkin kontrol yasası görece kat ötelemelerinin, en az kontrol kuvvetiyle minimum seviye de tutmak şeklinde tanımlanabilir.

Bütün titreşen yapılar iç gerilmeler ve kesit çatlamaları yoluyla plastik şekil değiştirmeler yardımıyla giriş enerjisini yayarlar. Bazı yapıların kritik sönüm oranları düşük olduğundan orta şiddetteki depremlerde bile fazla titreşirler. Örneğin çelik yapıların sönüm oranları düşük olduğundan fazla deplasman yaparlar. Bu tür yapılarda kontrol sisteminin uygulanması yerinde olabilir.

Aktif kontrollü sistemlerde dış güç kaynağı kontrol kuvvetlerini uygulayan aktüatörleri harekete geçirmeye yarar. Kontrol kuvvetleri uygun olarak seçilen algoritmaya göre hesaplanır, seçilen algoritma hata üretimini azaltmak ve yapı stabilitesini korumak için mümkün olduğunca basit seçilmelidir. Dış enerjiye ihtiyaç duyulması aktif kontrolün en belirgin özelliğidir. Hatta kütlece ve boyutca büyük olan binalarda bu enerji gereksinimi pratik olarak sağlanamayabilir. Aktüatörlere yollanan sinyaller, sistem mukabelesinin sensörler yardımıyla ölçüm değerlerinin fonksiyonudur.

Aktif kontrol elemanları birden fazla mod için geniş bir frekans ortamında etkilidir. Bu sebeple aktif kontrol daha çok, yüksek modların etkili olduğu yüksek ve narin yapılarda uygundur. Aktif kontrol sisteminin tasarımında maliyeti, yerleşimi, güvenilirliği ve bakımı göz önünde bulundurulmalıdır. Aktif kontrollü yapılar depreme karşı verdikleri tepki bakımından pasif kontrollü binalardan üstündür.

Ayrıca tasarım aşamasında sistemin uygun seçilmesi ile rijitlik iyi bir şekilde dağıtılabilir ki bu yapının dinamik yüklere daha iyi karşılık vermesini sağlar. Kontrol algoritmasının optimallliği yapının tavrı ile gerekli kontrol enerjisi arasındaki dengeyi ifade eden ikinci dereceden tanımlanan performans indeksi ile yapılır. Optimallliği sağlayan performans indeksinde kullanılan Q ve R ağırlık matrislerinin uygun seçimidir. Bir çok durumda yapı kayma çerçevesi olarak alınır, kayma çerçevesinde kolonların yatay yerdeğiştirmesinde sadece kesme kuvvetinin etkili olduğu varsayılır. Döşemelerin kolonlara kıyasla sonsuz rijit olduğu kabul edilerek yapı kütlelerinin kat döşemelerinde toplandığı varsayılır.

Pasif kontrol sistemleri herhangi bir dış enerjiye ihtiyaç duymazlar, daha ekonomik ve uygulanmaları daha kolaydır. Bununla birlikte aktif kontrol kadar da etkin değildirler. Çünkü çoğunlukla yapının birinci moduna göre ayarlanırlar. Pasif kontrol elemanları dış etkiyi üzerlerine alırlar yada yapı içinde dağıtırlar. Dış etkiyi üzerlerine alanlar yapıyı iki kısma bölerler. Yatayda esnek düşeyde rijit pasif kontrol elemanlarının bulunduğu alt yapı ve rijit üst yapı. Böylece dinamik yükleme altında alt yapı fazla deformasyon yaparken üst yapıda görece kat ötelemeleri önlenmiş olur. Kinetik enerjiyi genelde ısı enerjisine çeviren pasif sistemler ise yapının rijitliğini, sönümünü artırarak enerjinin yapı içinde dağılmasını sağlarlar ve enerjiyi bütün modlara yayarlar. Pasif kontrol sistemi yapının yeniden düzenlenmesi gibidir, diğer kontrol sistemlerine oranla ucuzdur ve dış enerji verilmediği için doğası gereği yapı stabilitesini bozmaz. Diğer taraftan bir aktif kontrollü sistemde uygulama hataları ciddi sorunlar yaratabilir, yapı stabilitesi tehlikeye girebilir.

Karma kontrollü yapılar aktif ve pasif kontrollü sistemlerin bir arada kullanılması ile oluşur ve çıkış noktası pasif kontrolün performansını arttırmaktır. Pasif kontrol sistemi dinamik kuvvetin etkisini tüm yapıya dağıtırken, aktif kontrol elemanları yapının büyük deprem kuvvetlerinde karşı koyabilme kabiliyetini arttırırlar. Ayrıca pasif kontrol elemanının aktif kontrol ile birlikte kullanılması enerji gereksinimini azaltır. Karma kontrollü sistemler aktif kontrollü sistemlere oranla daha az enerji kullanırlar. Karma kontrolün bir diğer yararı deprem sırasında herhangi bir elektrik kesintisi anında aktif kontrol elemanı devre dışı kalırken pasif kontrol elemanları hala çalışıyor olacaktır. Bununla birlikte karma kontrol sistemler diğer kontrol sistemlerine göre daha komplekslerdir.

Yarı-aktif kontrollü binalar aktif kontrolün bir grubudur çoğunlukla kontrol edilebilir pasif kontrol elemanları olarak düşünülebilirler. Enerji gereksinimleri çok azdır. Karşı koyucu kuvvetler aktif olmayan elemanlar yardımıyla yaratılır. Sisteme verdikleri enerji yok denecek kadar az olduğundan stabilite problemi ortaya çıkmaz. Pasif kontrolün güvenilirliğini ve aktif kontrolün uyum sağlayabilme yeteneğini yani aktif ve pasif kontrolün en iyi özelliklerini bünyelerinde bulundurlar.

Yapısal kontrolün en önemli sorunlarından biri yapının gerçek gerilmeleri hakkında çok az bilgiye sahip olmamızdır. Bu sebeple dış ortamdaki değişimi ölçmek için duyurga (algılayıcı) da denilen sensörler kullanılır. Yapının çeşitli yerlerine konan sensörler ölçtükleri giriş verilerini elektrik sinyallerine çevirirler.

Yapısal kontrol de düşünülmesi gereken diğer konular:

-Zemin hareketinin doğru olarak tayin edilmesi için yapı-zemin ilişkisinin bilinmesi gerekir.

-Yapının yatay yöndeki hareketinin yanında düşey yöndeki hareketi ve burulma etkiside düşünülmalıdır.

-Sensörler ve aktüatörler yapı içinde en uygun yerlere konulmalıdır.

-Bakım, güvenilirlik, enerji gereksinimi, aktüatörlerin ve sensörlerin hata toleransı, kullanılan elektronik aygıtlar önemli araştırma konusudur.

-Deneysel çalışmalara da özen gösterilmeli aktüatör ve sensörlerin seçimi ve etkinliği test edilmelidir.

Tasarım aşamasında ise

-Bilgisayar donanımının güvenilirliği,

-Kontrol algoritmasının gücü,

-Zaman gecikmesi faktörü,

-Aktüatör kuvvetinin büyüklüğü,

-Yapısal kontrol uygulanmış yapının güvenilirliği (stabilitesi)

- Ekonomik unsurlar da düşünülmalıdır.

Bu tezde depremlerin ve şiddetli depremlerin yapılar üzerindeki zararlı etkisini azaltmak için 1987 yılında Jahn N.Yang tarafından geliştirilen ani optimal kapalı-çevrim kontrol algoritması kullanılmıştır, içinde açık çevrim bulunduran hiçbir kontrol algoritması yapı mühendisliğine uygulanamaz çünkü açık çevrim deprem kaydının önceden elimizde olmasını gerektirir. Ani optimal kontrolde amaç, kontrol vektörü $u(t)$ ve yapı davranış vektörü $z(t)$ ye göre kuadratik seçilen performans indeksi J 'nin her t anında minimize edilmesine dayanır.

Bu çalışmada, ani optimal kapalı kontrol algoritması kullanılarak deprem kuvveti etkisindeki yapının kat deplasmanları elde edilmiştir. Kontrol algoritmasının etkisini göstermek için üç adet örnek Matlab programı yardımıyla çözülmüştür. Formülasyon bir boyutlu lineer yapı için AMD (Aktif Kütle Sönümleyici) kullanılarak verilmiştir. Burada en önemli nokta ağırlık matrisi Q ve R 'nin seçimi olmaktadır. Çünkü Q ve R ye atanan değerler sayesinde yapı davranışı elastik bölgede tutulabilir.

Yapı çok serbestlik dereceli ve deprem kuvveti bir doğrultudan etkililerek idealize edilmiştir. Sekiz katlı yapının herbir katının kütleleri, rijitlikleri, sönümleri eşit alınmıştır. Aktif kütle sönümleyici en üst kata yerleştirilmiştir. Kontrol her zaman aralığında Q ve R ağırlık matrisleri aracılığıyla düzenlenir. Verilen formülasyon, bütün lineer yapılar için geçerlidir.



ACTIVE CONTROL OF EARTHQUAKE EXCITED STRUCTURES

SUMMARY

The history of structural design can be divided into three eras. Much of the classical era for civil structural design dealt with only static loads (earthquake resisting system is rigid system). Second is the modern era of structural design added specifications on the dynamic response (mode shapes). The engineering structure has traditionally relied on its self-ability to dissipate the input energy by earthquake and wind (causing increase of element section areas or strength of material, earthquake resisting system is rigid-flexible system must have enough strength, rigidity and ductility to resist earthquake). Third is the postmodern era of an integrated approach to the design of structure and the feedback systems (passively or actively controlled systems). The goals of the postmodern era are to increase the survivability of the building (or equipment within the building, e.g. operation of sensitive equipment in hospitals, communication centers, computer rooms) in the presence of extraordinary excitations from winds and earthquakes. The objective is not only to minimize the effects of potentially large destructive forces and human life, but also assure structural safety and maintain the building's functions and facilities (keep the stresses and strains and accelerations and displacements at a specified set of locations within the structure specified bounds in the presence of any disturbances, winds or earthquakes, less than a certain size. Some of these output limitations are selected for human comfort (accelerations) and some are selected for human safety (stresses), usually related to displacements.

Structural control can be an important part of designing new structures and retrofitting existing structures to protect from extreme loads of earthquakes and winds. The primary objective of the control systems to be considered is to prevent both structural and non-structural damage under a maximum credible earthquake. When designing controllers there is no theory available that can select a model that is best (or even appropriate) for control design. The performance of a control strategy varies from one earthquake ground motion to another (the magnitude and frequency content of the excitation will clearly influence an optimum design). Hence, modelling for control design remains a vital research issue. (A most effective control law is defined as one which can limit the story drift to a target level with a minimum amount of control effort)

All vibrating structures dissipate energy due to internal stressing, cracking, plastic deformations; the larger the energy dissipation capacity the smaller the amplitudes of vibration. Some structures have very low damping on the order of 1% of critical damping and consequently experience large amplitudes of vibration even for moderately strong earthquakes.

An active control system has an external source powers control actuators that apply forces (counteracting control forces) to the structures. The regulation of the control force is done according to an appropriate algorithm (a complicated algorithm caused the control system to be complex, thus generating errors and instability). External power using to effect the control action is an essential feature of active control systems. These forces can be used to dissipate energy in the structure, required control force values can be quite large to limit its practical application in the case of large and massive buildings. The signals sent to the control actuators are a function of the response of the system measured with physical sensors (optical, mechanical, electrical, chemical). Active devices can be designed to influence a number of vibration modes (active dampers can be effective over a much wider frequency range). Hence, active control is most suited for tall and slender structures, where the response can be influenced by a number of natural modes. The design of an active control system requires the consideration of cost-effectiveness and the ease of instalation, also an active system has to be robust, reliable, and easy to maintain. The effects of the active control are obviously superior to the passive control in decreasing the response of structure vibration.

Moreover, structural optimization enables optimum redistribution of the stiffness of a structure, to resist more efficiently the earthquakes. The optimality of the control forces is with respect to a performance measure (performance index represents a balance between structural response and control energy), the quadratic cost functional of structural response and control energy. The combined structure-control system is then optimized with respect to the structural weight objective function. The structure is idealized as a shear building. A shear building is deflected by shear forces only, the total mass of structure is concentrated at the level of the floors, the floors are infinitely rigid as compared to the columns, and the deformation of the structure is independent of the axial forces present in the columns.

A passive control system does not require an external power source and they are more economic and easy in applications of engineering. Such systems have inherent limitations. For example they are generally tuned to the first mode vibration. Passive control techniques are mainly divided into two parts of the absorption and dissipation. The absorber for vibration control makes use of a subsystem, which is set on the main structure and vibrates with it, to share partly the vibrating energy in order to reduce the amplitude of the main structure. Dissipating device uses designed dissipators to dissipate the vibration energy. Passive energy dissipation systems encompass a range of materials and devices for enhancing damping, stiffness and strength. The capability to enhance energy dissipation in the structural systems may be achieved either by conversion of kinetic energy to heat, or by transferring of energy among vibrating modes. The energy in a passively controlled structural system cannot be increased by the passive control devices. A passive control system, incorporated into the original design of structure, is usually relatively inexpensive and inherently stable. The distinguishing difference between passive and active control is that passive control does not make any-real time changes in the system and hence cannot destabilize a conservative system. On the other hand, an active control can destabilize if the implementation errors (choosing an incorrect stiffness, damping, or mass) are serious enough, the fact that control decisions are made in real time.

A hybrid control system is the combined use of active and passive control systems in order to improve the performance of a passive control scheme (e.g. a base isolated structure with actively controlled actuators to enhance performance). The rationale of hybrid systems for earthquake resistant design is the following, a passive system (isolation system) produces a dynamic decoupling of the structure from its foundation and gives a resistant scheme to relative motion with large deformation capability, while an active system contributes to the improvement of the dynamic performance of the structure by providing a resistant scheme to absolute motion. Alternatively, passive control may be added to an active control scheme to decrease its energy requirements. The essential difference between an active and a hybrid control scheme is the amount of external energy used to control. A benefit of hybrid control is that, in the case of power failure, the passive component of the control still offers some degree of protection (reliability), unlike an active control system. But it is also often more complicated.

Semiactive control systems are a class of active control systems for which the external energy requirements are smaller than typical active control systems. In fact, many can be operated by the battery power, which is critical during seismic events when the main power source to the structure may fail. In the semiactive control methods, the counter-active control forces are created by reactive devices with variable damping and/or stiffness characteristics. Semiactive devices (often viewed as controllable passive devices) do not add mechanical energy to the structural system, therefore bounded-input, bounded-output stability is guaranteed (unlike active control, semi-active control does not have the stability problem). Semiactive control strategies provide the reliability of passive devices and adaptability of active systems (combination of the best features of both passive and active control systems).

One of the problems facing structural control is that very little is known about the actual stresses and strains in earthquake vibrations of structures. Sensors measure changes in external environmental conditions. Sensors, as future smart material systems, are required to determine the mechanical, electromagnetic, chemical, and other properties of the host material and the surrounding environment in order to automatically allow the required adaptive material response. In their simplest form, sensors may be considered as linear system elements that transform input structural information, such as strain, into output electrical information, such as a time-varying electrical voltage or current. Ideal sensor elements have an output response that is exactly linear and noise free.

Other issues in control that need to be addressed are as follows:

- Soil-structure interaction effects are important in that accurate definitions of base motions
- Control of horizontal and vertical response of the structure should be considered and it is noted that research is needed on the torsional response of buildings.
- Optimal location and configuration of actuators and sensors should be addressed
- The maintainability, reliability, power requirements of the control system, and fault tolerance and redundancy in actuators, sensors, and electronics are important issues that need extensive research.

-Experimental work is also necessary for the testing of control system components (efficient actuators, suitable sensors). Laboratory and full-scale experiments should be performed for testing.

On the other hand numerous factors of practical importance should be also considered in evaluating the efficiency of a specific structural control. Among these factors are

- Energy requirements
- Safety and serviceability (interstory drift, floor acceleration, base shear, total energy input to structure and overturning moments)
- Hardware reliability
- Control algorithm robustness
- Time delay (should be minimized)
- Actuator force/stroke/velocity requirements
- Overall reliability of controlled structure
- Economical considerations (total system cost, space to install system)

In this study, using the instantaneous optimal closed-loop control algorithm floor displacements of structure under seismic excitation are obtained. To illustrate the effectiveness of this control algorithm three numerical examples are solved by using Matlab routine. In formulation, a one-dimensional linear building structure implemented by an AMD (Active Mass Damper) control system is assumed. Structure is idealized by multi degree of system and subjected to one-dimensional ground acceleration. An eight-storey building in which masses, stiffnesses and damping coefficient of each storey are equal. An active mass damper is installed on the top floor of the building. Control efficiency is regulated at every time instant by the weighting matrices Q and R . Formulation is valid for all linear structures.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. KONU

Depreme dayanıklı yapı tasarımı düşüncesi yapı tarihi kadar eskidir. Eskiden insanlar çeşitli yöntemler kullanarak yapılarını depreme karşı korumaya çalışmışlardır. İnsanların bu konuda ne kadar başarılı oldukları yaşanan depremlerden test edilerek, eski çağlardan günümüze kadar gelen yapılardan belli olmaktadır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında ilk düşünülecek önlem, taşıyıcı sisteminde yapılacak düzenlemelerdir. Örneğin taşıyıcı sistemin düzenli olarak seçilmesi, tasarlanması, faydalı bir özelliktir.

Bunun yanında yapıyı depreme karşı mümkün olduğu kadar izole etmek de depreme karşı sıkça kullanılan önlemdir. Yapının depreme karşı izolasyonunun yapı temellerine uygulanmasının (taban izolasyonu) dayandığı ilke deprem sırasında fazla enerji girişini önlemek için yapı ile zemin arasındaki bağ rijitliğini azaltmaktır.

Depreme karşı bir diğer önlem ise sisteme deprem sırasında giren enerjinin bir kısmını yapıya ilave edilen elemanlara aldırıp bu elemanlarda deprem enerjisini söndürmektir.

Yapısal kontrole başlıca şu sebeplerden dolayı ihtiyaç duyulur:

- a) Yeni malzemelerin dayanımları artarken elastisite modülleri aynı oranda artmamaktadır. Bu nedenle yeni malzemelerle yapılan binalarda az malzeme kullanılmasına karşın binalar daha esnek olmaktadır (Yapılardaki esneklik). Ayrıca yeni malzemelerde mukavemet artışı, yüksek yapı yapmaya imkan verdiğinden yapılar daha yüksek ve esnek olmaktadır. Yüksek binaların üst katları daha fazla deplasman yaparak konfor problemlerine sebep olur.
- b) Eskiden yapılar can kaybı olmayacak şekilde tasarlanmaktaydı. Bir depremde yapının bazı bölümleri can kaybı olmayacak şekilde çöker veya işlevlerini yapamaz hale gelebilirdi.

Şimdi düşünölen güvenlik kriterinde ise depremden sonra haberleşme ve hastane gibi önemli yapılar işlevlerine devam edebilmelidir. (Güvenlik kriteri yükselmiştir)

c) Çok önemli yapılarda yalnız yapı değil içindeki aletlerin güvenliğinin sağlanması gerekir. Nükleer tesislerde, önemli haberleşme merkezlerinde yapı kadar içindeki aletlerin güvenliği de önemlidir.

d) Yıkıldığı zaman çevreye büyük zararlar verecek nükleer tesis, yüksek kule, açık deniz yapılar için de kontrol uygulanması tercih edilebilir.

Geliştirilen yapısal kontrol elemanları genelde üç kısımda toplanır: Pasif kontrol, Aktif kontrol ve Karma kontrol.

1.2. PASİF KONTROL

Pasif kontrol elemanlarının bir kısmı, sisteme giren deprem enerjisini ısı enerjisine çevirir. Bir kısmı ise kendi üzerine alır. Sonuçta yapıların dış etkiye karşı tepkisini azaltırlar. En fazla kullanılan pasif kontrol elemanlarından biri, ayarlı kütle sönümleyicilerdir. Bunlar yapıda bir yaya bağı olarak hareket edebilirler. Kütle yapı kütlelerinin %1'i kadardır. Yay kütle sisteminin periyodu yapının birinci modunun periyoduna göre ayarlanır. Bu tip kütleler genelde binanın en üst katına veya temel seviyesine konulur. Bazı durumlarda iki kütle kullanılır. Yapının burulma titreşimlerini önlemek için birbirine dik iki doğrultuda hareket ederler. Bu tip pasif kontrol elemanları daha çok binalarda rüzgarın, köprülerde ise trafiğin meydana getirdiği titreşimlerde etkili olmaktadır.

Kütleler yerine içinde sıvı bulunan tanklar da pasif kontrol elemanı olarak kullanılır. Sıvı sistemler daha ucuz ve uygulanması daha kolaydır.

Bina temellerine konan elastik mesnetler, taban izolasyonu için kullanılan elemanlar içinde önemli bir gruptur. Elastik mesnetler düşey doğrultuda rijit, yatay doğrultuda esnektir.

Bu nedenle yatay doğrultuda olan deprem kuvvetinin az kısmını binaya iletirler. Her depremden sonra üzerinde kalıcı deformasyonlar oluşabilir. Bu tip elemanlar yüksek binalarda kullanılmaz.

Sürtünme sönümleyicileri sisteme giren enerjiyi sürtünme plakaları yardımı ile ısı enerjisine çevirirler.

Bu tip elemanlar yapı temellerine konulabileceği gibi yapı içinde kirişlerin altına konulabilir. Bu elemanlar birbirleri üzerinde kaymaya başlayınca devreye girerler. Sürtünme katsayısı ayarlanarak elemanların devreye gireceği etki limiti belirlenir.

Yukarıda belirtilen elemanlar dışında viskoelastik sönümleyiciler, viskos sıvı sönümleyiciler gibi çeşitli sönümleyiciler bulunmaktadır. Pasif kontrol sistemleri kinetik enerjiyi başka formlara çevirir veya kendi üzerlerine alırlar. En önemli özellikleri sisteme ilave enerji vermezler.

1.3. AKTİF KONTROL

Yapı tasarımında en önemli konu sistemin dayanabileceği dış etkinin şiddetinin belirlenmesidir. Dış etkinin şiddeti büyük alındığında yapı boyutları büyük olur ve sistem ekonomik olmaz. Dış etkinin şiddeti küçük alındığında ise daha büyük şiddetli dış etkilere karşı sistem dayanamaz. Bu soruya şu anda en iyi cevap verebilecek kontrol sistemi aktif kontrol sistemidir.

Aktif kontrolde, yapının tepkisini belirli ölçüler içinde tutmak için geri besleme sisteminin belirlediği ve her an değişen kontrol kuvvetleri kontrol süresince yapıya uygulanır. Dış etki olmadığı zaman yapıya kontrol kuvveti uygulanmaz, yapıya dış etki gelip yapı bu dış etkiye tepki gösterince, kontrol sistemi sensörleri yardımıyla bu tepkiyi ölçer ve tepkinin belirli ölçüler içinde olacak şekilde kontrol kuvvetlerini yapıya uygular. Kısaca kontrol sistemi, yapının tepkisini her an ölçer ve bu tepkileri kontrol kuvvetleri yardımıyla istenilen seviyede tutar. Kontrol kuvvetleri sistemde hazır bulundurulan enerji yardımıyla üretilir. Yapının rijitlik ve sönüm gibi parametrelerini kontrol algoritmasına göre kontrol kuvveti ile her an değiştirir ve bu sayede yapının dış etkilere tepkisi öngörülen limitler içinde bulunur. Bu tip yapılara dinamik bakımdan akıllı yapılar ismi verilmektedir. İlk akıllı bina 1989 yılında Japonya’da yapılan Kyobashi Seiwa Building’tir.

On bir katlı ve çelik taşıyıcı sistemi olan bu binanın genişliği 4.0m derinliği 12.45m ve yüksekliği 32.8m dir. Yapının bodrum katı kazıklı temeller üzerine oturmaktadır. Yapının en üst katında biri 4ton ve diğeri 1ton olan iki tane aktif kütle sönümleyicisi vardır.

Binanın ikinci aktif kütle sönümleyicisinin görevi burulma titreşimlerini azaltmaktır. Binadaki aktif kontrol sistemi şiddetli rüzgarlarda ve orta şiddetli depremlerde bina titreşimlerini azaltacak şekilde tasarlanmıştır.

Binada bulunan sensörler 6.ve 11.kata yerleştirilmiştir. Kurulduğundan beri sistemin şiddetli rüzgarlarda ve depremde başarı ile çalıştığı gözlenmiştir [1]

Aktif kontrolün çok daha olumlu sonuçlar vermesine rağmen pasif kontrolün daha ucuz ve dış enerji istememesi gibi avantajları vardır. Aktif kontrol sisteminin belirgin özelliği dış kaynaklı enerjiye ihtiyaç göstermesi ve içinde bir geri besleme sisteminin bulunmasıdır.

1.4. KARMA KONTROL

Karma sistemler, içinde pasif ve aktif kontrol elemanlarının bulunduğu sistemlerdir. Pasif kontrol elemanları aktif kontrol elemanlarının yükünü azaltarak, sistemde bulundurulması gereken enerjiyi azaltır.

Ayrıca gelişen malzeme bilimi ve teknoloji sayesinde gelecekte çok daha ileri kontrol sistemlerinin uygulanması düşünülmektedir. Kontrol sistemlerinde her geçen gün yeni malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan piezoelektrik malzemeler herhangi bir mekanik kuvvete karşı elektrik akımı oluşturabilirler ki bunlar yapıdaki titreşimlerin algılanmasında kullanılırlar, veya bunun tersi olarak uygulanan elektrik akımına karşı mekanik kuvvetle cevap verebilirler bunlarda kontrol kuvvetlerinin uygulanmasında kullanılırlar.

Elektroreolojik sıvılar ise ortamın sıcaklığı değiştirilmediği halde sıvı ve katı halde bulunabilirler. Elektrik alanda viskozitelerini kısa bir süre içerisinde değiştirerek sertleşirler. Yani elektrik alanın şiddeti ne kadar büyük ise sıvı o derece sertleşir ve sıvının akışı engellenir. Genelde yarı aktif kontrol sistemlerinin tasarımında titreşim sönümleyici malzemesi olarak kullanılırlar. Gerekli elektrik alanı sistemdeki kontrol ünitesi tarafından sağlanır. Özellikle bu tür yeni malzemeler daha çok karma kontrolde ve yarı-aktif kontrol sistemlerinde kendini gösterir. [2]

Artık dinamik bakımdan akıllı binalar düşünce aşamasını geçmiştir ve uygulamaları yapılmaktadır. Geriye kalan, uygulama tekniklerinin geliştirilip çok yüksek olan maliyetlerinin azaltılmasıdır.

BÖLÜM 2

YAPILARIN KONTROLÜ

Klasik depreme dayanıklı yapı tasarımında rijit yapı anlayışı hakimdir, yapılar sürekli değişen ortamın dinamik karakterine kendini adapte edebilme özelliğinden yoksundurlar, dış kuvvetlere karşı koymada sadece kütleleri ve rijitlikleri esas alınır. Amaç, perdeler ve kuşaklama elemanlarıyla çok kuvvetli depremlerde bile binanın relatif deplasmanını minimumda tutmaktır

Yeni yapı malzemelerinin dayanımlarının artması, fakat buna karşılık malzeme elastisite modülünün aynı oranda artmamasından dolayı, yapılar gittikçe daha yüksek dayanımlı, fakat daha esnek olmaktadır. Özellikle yüksek yapıların deplasmanını kontrol edebilmek ve aynı zamanda konforu sağlamak, klasik tasarımla veya pasif kontrollü sistemlerle sağlanamaz ki bu durum aktif kontrolün gerekliliğini ortaya koyar.

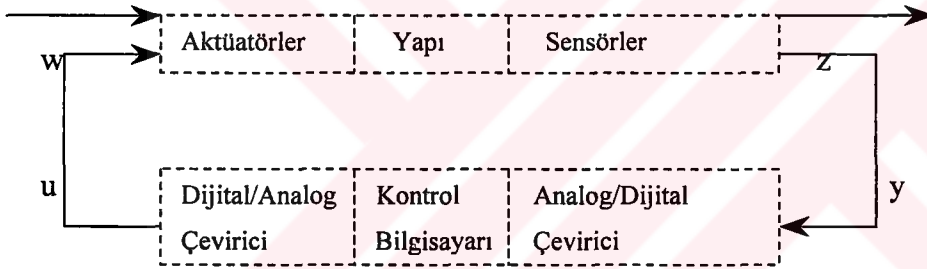
Aktif yapı kontrolünün esası şu prensiplere dayanır:

- a) Dış etkileri (deprem, rüzgar gibi) veya yapının davranışı veya her ikisini de ölçmek için yapının belirli yerlerine sensörler yerleştirilir.
- b) Ölçülen bilgi değerlendirilir (filtreleme) ve seçilen kontrol algoritmasına göre gerekli kontrol kuvvetleri kontrol bilgisayarında hesaplanır.
- c) Gerekli kontrol kuvvetleri aktüatörler yardımıyla sisteme uygulanır.

Aktif kontrol sistemleri tek başına kullanıldığında, kontrol kuvvetlerinin uygulanması için gerekli enerji miktarı çok büyü (Enerji kaynağı sorunu). Bu ise, çok büyük aktif kontrol sistemlerinin ve enerji kaynaklarının yapıya yerleştirilmesi ve bunların bakımını gerektirir (Maliyet sorunu).

Aktif kontrolde, yapısal karakteristikler (rijitlik, sönüm gibi) değiştirilebilir. Aktif kontrolden genelde istenen, yapı mukabelesini en azından elastik sınırlar içinde tutmaktır. Bunu sağlamak için ise kontrol kuvvetlerini arttırmak (dolayısıyla gerekli enerji miktarının ve maliyetin artması) ile mümkündür. İşte kontrolün etkili olması, Q ve R matrislerine atanan değerlere bağlıdır.

Atanan değerlerin herbirinin sistemde fiziki bir manası vardır. Etkin bir kontrol için bu değerlerin herbirinin çok anlamlı olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Aktif kontrollü yapılarda, kendini yükün şiddetine göre ayarlayan yapılar, yapının depreme karşı tavrı sensörler ile ölçülerek kontrol bilgisayarına iletilir. Bilgisayarda işlenen veri seçilen algoritmaya bağlı olarak uygulanacak kontrol kuvvetleri hesaplanır, aktüatör denilen harekete geçirici aletlere iletilir ve karşı kuvvet yaratılır. Bu durum Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Yapılan işlemler belli zaman aralıklarında sürekli tekrarlanır. Sensörler yalnız yapının tepkisini, yapının titreşimlerini, ölçüyorsa kapalı çevrim, aynı zamanda deprem titreşimlerini de ölçüyorsa kapalı-açık çevrim söz konusudur. Kontrol kuvvetinin deprem ivmesine de bağlı olduğu kapalı açık çevrim ve açık çevrim algoritmaları, kapalı çevrim algoritmasından daha iyi sonuçlar vermekle birlikte uygulanamazlar. Çünkü bu algoritmalar kontrol aralığının tamamında depremin önceden bilinmesini gerektirir. Oysa deprem kaydı önceden bilinemez.



Şekil 2.1 Aktif kontrol sisteminin çalışma prensibi

Aktif kontrol sistemlerinden AMD (Aktif kütle sürücü) binaya monte edilmiş yardımcı bir kütle ve yardımcı kütleyi yöneten, harekete geçiren, aktüatörden oluşur. Bu tür sistemlerde oluşturulacak kuvvet büyüktür. Bu sebeple sistemde hazır bulundurulması gereken enerji maliyeti arttırır. Ayrıca yüksek şiddetli depremlerde ortaya çıkacak büyük kontrol kuvvetlerinin uygulanması zordur, deprem sırasında yangın çıkmaması için enerji hatları kesilir, ve bu kuvvet oluşturulsa bile yapının stabilitesinin bozulma riski fazladır, özellikle AMD sistemlerinde kontrol kuvveti büyük olduğundan bu risk her zaman vardır. [3]

AVS (Aktif rijitlik değiştirici) sisteminde aktüatör yoktur, kirişlerin altına konan ters V şeklindeki diyagonal çubukların arasına bağlanan valf sisteminden oluşur, valfin hareketi, kapalı veya açık duruma geçmesi, yapının rijitliğini değiştirir.

Bu tür sistemlerde enerji sadece valfin açılıp kapanmasında kullanılır, kullanılan enerji az olduğundan AMD sistemine göre daha ekonomiktir ayrıca valfin harekete geçme zamanı, daha kısa olduğundan zaman kayıplarından dolayı yapının stabilitesinin bozulma riski AMD sistemine kıyasla düşüktür. [4]

Yapıya aktif kontrol uygulanmadan önce diğer izalasyon sistemleri düşünölmelidir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı taban izolasyonudur. Taban izolasyon sistemlerinde kullanılan malzeme çoğunlukla kauçuk esaslıdır, özelliği düzeyde çok rijit, yatayda ise oldukça esnektir bunun sonucunda taban izolasyonunda büyük deplasman, üst yapıda ise küçük deplasman oluşur. Bir yapıya temel izolasyonu uygulanırsa yapının frekansı azalır, periyodu büyöyür, periyotdaki artış yatay deplasmanların daha da büyömesine sebep olur. Fakat yatay doğrultudaki deplasmanların büyük bölümü esnek olan taban izolasyon sistemine iletilir. Dolayısıyla taban izolasyon sisteminde büyük deformasyonlar oluşurken, rijit üst yapı tabana göre küçük yatay deplasmanlar yapar. Katlar arasındaki relatif yerdeğiştirme küçük kaldığı için, üst yapı deprem sırasında hemen hemen şekil değiştirmeyen rijit bir yapıymış gibi davranır

Taban izolasyon sistemleri kolay uygulanabilirler, buna karşılık deprem kuvvetlerine karşı kendilerini adapte edemezler. Taban izolasyon sistemindeki büyük deplasmanlardan dolayı üzerlerinde kalıcı deformasyonlar oluşabilir. Dolayısıyla daha sonra meydana gelen depremlerde bu durum sistemin stabilitesini bozabilir. Ayrıca yüksek katlı binalarda devrilme momentlerini arttırırlar. Bu nedenle daha çok düşük katlı ve orta yükseklikteki binalarda uygulanırlar. Yüksek yapılarda devrilme momentlerini arttırarak, yapının stabilitesini bozarlar. [5]

Pasif sistemler , yapıya ilave sönüm ve rijitlik katarlar. Deprem sırasında enerjiyi şekil değiştirerek sönümlerler, çoğunlukla yumuşak çelik veya özel kauçuktan üretilirler, ve yapıya giren enerjinin belirli noktalarda toplanmasını sağlarlar. Bu sayede yapının ana taşıyıcı elemanları zarar görmez.

Örneğin diyagonaller (kuşaklar) arasına yerleştirilen hidrolik enerji yutucu elemanlar kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine çevirerek deprem enerjisinin yapı içinde dağılmasını ve yapının sönümleme kapasitesinin artmasını sağlar. Viskoelastik sönümleyicilerde enerji çelik plakalarla sınırlanmış viskoelastik tabakalarda oluşan kayma deformasyonu ile sağlanır. Ayarlı sıvı sönümleyiciler ise deprem sırasında kabın içersinde bulunan sıvının hareketinden oluşan türbilans ile deprem enerjisinin yutulması prensibine dayanır.

Pasif kontrol sistemlerinin en önemli üstünlükleri aktif kontrole göre daha az teknoloji gerektirmeleri, maliyetlerinin görece düşüklüğü, ayrıca sistemin güvenliğinin sağlanması için karmaşık hesaplara gerek duyulmamasındadır. Bununla birlikte pasif sistemler belirli sınırlar içinde etkilidirler, genelde belirli bir depreme ve birinci modal titreşime ayarlıdır, bu yüzden boyutlandırıldıkları deprem şiddetinde etkilidirler. Bu özelliği aktif kontrole karşı en büyük dezavantajıdır.

Bu noktadan hareketle karma kontrollü sistemler geliştirilmiştir. Karma (hibrid) kontrollü sistemler aktif kontrolün ve pasif kontrolün üstünlüklerini barındırırlar. Aktif kontrolün her deprem şiddetindeki etkinliği ve pasif kontrolün güvenilirliğini bir arada bulundururlar. Ayrıca aktif ve pasif kontrol sistemlerini birlikte kullandıklarından, aktif kontrol sistemi devreden çıksa bile pasif kontrol sistemi halihazırda çalışıyor olacaktır. Karma kontrol sistemlerinin ortaya çıkış nedeni aktif kontrol sistemlerinin enerji ihtiyacını en aza indirmek olmakla birlikte pasif kontrol sistemlerinin etkinliğinin artırılması da düşünülmüştür. [6-7]

BÖLÜM 3

KONTROL ALGORİTMALARI

3.1. KLASİK LİNEER OPTİMAL KONTROL TEORİSİ

Eğer kontrol sisteminin parametreleri zamanla değişmiyorsa, sabitse, lineer kontrol sistemi söz konusudur. Buna göre sistem hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{E\}f(t) + [D]\{u(t)\} \quad (3.1)$$

Bu ifadede $x(t)$: $(n \times 1)$ boyutlu deplasman, $u(t)$: $(r \times 1)$ boyutlu kontrol kuvvet vektörüdür.

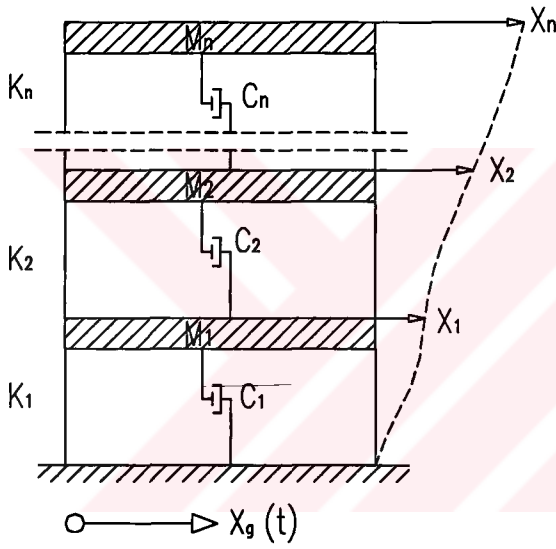
Sistemin serbestlik derecesi n olmak üzere:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & m_3 & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & m_n \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & 0 \\ & -c_3 & c_3 + c_4 & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & 0 & & \ddots & \ddots & -c_n \\ & & & & -c_n & c_n \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & 0 \\ & -k_3 & k_3 + k_4 & . & \\ & & . & . & . \\ & 0 & & . & . & -k_n \\ & & & & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

(n*n) boyutlu M sistem kütle, C sistem sönüm ve K sistem rijitlik matrisleri hesaplanırken yapı Şekil 3.1 deki gibi idealize edilebilir.



Şekil 3.1. n katlı bir binanın ayrıklaştırılmış modeli

C sistem sönüm matrisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir. [8]

ξ_i : i. mod için sönüm yüzdesi

ω_i : i. mod frekansı

Φ_i : i. modal vektör

m_i^* : Genelleştirilmiş kütle matrisi ($\Phi_i' M \Phi_i$)

$$[C] = [M] \left[\sum_{i=1}^n \frac{2\xi_i \omega_i}{m_i} \{\Phi_i\} \{\Phi_i\}' \right] [M] \quad (3.2)$$

E matrisi dış yüklerin uygulandığı yerleri belirten matristir. Eğer dış kuvvet deprem kuvveti ise:

$E = -Mv$, v : bütün elemanları bir olan $(n*1)$ boyutlu vektör, $f(t)$: her t anında ölçülen skaler dış kuvvet vektörü ve D : $(n*r)$ boyutlu kontrol kuvvetleri yer matrisi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & \\ & -1 & 1 & & & 0 \\ & & -1 & 1 & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & 0 & & & -1 & 1 \\ & & & & & -1 \end{bmatrix}$$

$(n*r)$ boyutlu D matrisi en genel haldedir. Bütün katlarda kontrol yoksa, ilgili kontrol elemanlarına karşı gelen kolonlar alınmalıdır. Örneğin sadece en üst katta kontrol kuvveti uygulanıyorsa ($r=1$) D matrisinin en son kolonu alınır.

$D = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ -1 \ 1]'$ $(n*1)$ boyutlu vektör haline dönüşür.

Bir yapının en üst katına aktif kütle sönümleyici yerleştirdiğimizi düşünelim. Bu durumda aktif kütle sönümleyicinin kütlesi (m_d), rijitliği (k_d) ve sönümü (c_d) tarif edilen matrislere eklenmelidir. Böylece ilgili matrislerin boyutları : $M(n+1*n+1)$, $C(n+1*n+1)$, $K(n+1*n+1)$, $x(n+1*1)$ ve $u(1*1)$ olur.

(3.1) nolu 2.mertebe diferansiyel denklem sistemini daha kolay çözebilmek için, bu denklem sistemini 1.mertebeden diferansiyel denklem takımına indirgeyebiliriz.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t) \quad (3.3)$$

Bu denklem parametreleri (M, C, K) zamanla değişmeyen lineer sistemlerin dinamiğini durum uzayı formunda ifade etmektedir. Sistemin herhangi bir durumu (en az sayıdaki değişkenler kümesi), durum uzayında bir nokta ile ifade edilir.

(3.3) nolu denklemde;

$$z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}_{2n \times 1}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{(n \times n)} & I_{(n \times n)} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{(n \times r)} \\ M^{-1}D \end{bmatrix}_{2n \times r}$$

$$H = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0_{(n \times 1)} \\ I_{(n \times 1)} \end{Bmatrix}_{2n \times 1}$$

olarak hesaplanır.

Optimal kontrolde yapıya uygulanacak olan kontrol kuvvetleri belirli bir amaç fonksiyonunun minimize edilmesinden elde edilir. Yani optimallik kavramı seçilen amaç fonksiyonu (ve problemin kısıtları) altında değişir. Belirli bir problem için optimal olan çözüm diğer bir problemin çözümünde optimal olmayabilir.

(3.3) nolu diferansiyel denklem sistemini optimal şartlar altında çözebilmek için aşağıdaki fonksiyon tanımlanır (ki bu fonksiyonun adı Performans İndeksi dir.)

Yapı kontrolünde, performans indeksi genellikle $z(t)$ ye ve $u(t)$ ye göre ikinci dereceden seçilir.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \{z'(t) Q z(t) + u'(t) R u(t)\} dt \quad (3.4)$$

Buradan kolayca görülebileceği gibi ilk terimin içinde $z(t)$ -sistemin mukabelesini ikinci terimin içinde $u(t)$ -sisteme uygulanması gereken kontrol kuvvetinin büyüklüğünü dolayısıyla; $(2n \times 2n)$ boyutlu semidefinit Q matrisi güvenliği, $(m \times m)$ boyutlu pozitif definit R matrisi ekonomiyi ifade eder.

Örneğin Q matrisinin elemanlarına atanan değerler büyükse emniyet ekonomiden daha önemli, tersine R matrisinin elemanlarına büyük değerler atanıyorsa ekonomi (maliyet) emniyetten daha önemli demektir. Bu iki kısım birbiriyle ters orantılı olduğundan ikisi de aynı anda minimize edilemez, optimallik burdan kaynaklanır.

Sistem hareket denklemi (3.3) ile performans indeksi (3.4) Lagrange çarpanı $\lambda(t)$ ile birleştirilir

$$L = \int_0^{t_f} z'(t)Qz(t) + u'(t)Ru(t) + \lambda'(t) \{ Az(t) + Bu(t) + Hf(t) - \dot{z}(t) \} dt \quad (3.5)$$

Hamiltonian, $\bar{H}$; Lagrangian L 'nin integrantıdır.

$$\bar{H} = z'(t)Qz(t) + u'(t)Ru(t) + \lambda'(t) \{ Az(t) + Bu(t) + Hf(t) - \dot{z}(t) \} \quad (3.6)$$

Lagrangian L 'in birinci varyasyonu

$$\delta L = \cancel{\lambda'(t_f)} \delta z(t_f) + \cancel{\lambda'(0)} \delta z(0) + \int_0^{t_f} \left\{ \dot{\lambda} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} \right\} \delta z + \frac{\partial \bar{H}}{\partial u} \delta u \} dt \quad (3.7)$$

olarak bulunur.

Optimal kontrol için $\delta L = 0$ olmalıdır.

$z(0)$ = Başlangıç durumu sabit olarak verildiği için $\delta z(0) = 0$ ve ayrıca

$\lambda(t_f)$: Sınır koşulu = 0 dır.

Dolayısıyla optimallik için;

$$\dot{\lambda}' + \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial u} = 0 \quad (3.9)$$

şartları sağlanmalıdır. Bu son iki denklemden;

$$\dot{\lambda}(t) = -A' \lambda(t) - 2Q z(t) \quad (3.8.a)$$

$$u(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B' \lambda(t) \quad (3.9.a)$$

Kapalı çevrimde $\lambda(t)$ ile $z(t)$ arasında lineer bir bağıntı olduğu kabul edilir.

$$\lambda(t) = P(t) z(t) \quad (3.10)$$

(3.10) dan

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{P}(t) z(t) + P(t) \dot{z}(t) \quad (3.11)$$

(3.10) ve (3.11) denklemlerini (3.8.a) ve (3.3) de yerine yazarsak,

$$\left[\dot{P}(t) + P(t)A - \frac{1}{2} P(t) B R^{-1} B' P(t) + A' P(t) + 2Q \right] z(t) + P(t) H f(t) = 0 \quad (3.12)$$

elde edilir. Bu denklem Riccati diferansiyel denklemi olarak bilinir. $P(t)$ pozitif semidefinit Riccati matrisidir. $[0, t_f]$ aralığında hemen hemen sabittir. $P(t)=P$ ve $\dot{P}(t)=0$; ayrıca $f(t)$ dış kuvvet vektörü sıfır alınırsa, (ki bu optimalliği bozan bir durumdur, çünkü $P(t)$ Riccati matrisinin optimal çözüm vermesi için $f(t)$ dış etki teriminin, diğer bir deyişle deprem ivme kaydının kontrol aralığında sıfıra eşit veya sıfır ortalamaya sahip, beyaz gürültü, olması gerekir) .

(3.12) denklemi

$$PA - \frac{1}{2} P B R^{-1} B' P + A' P = 0 \quad (3.13)$$

olarak bulunur. (3.13) denkleminin çözümünden $P(t)$ bulunmalıdır.

$$G(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B' P(t) : \text{Kontrol kazancı olarak adlandırılırsa}$$

ve (3.10), (3.9a) da yerine konursa kontrol kuvvetleri ,

$$u(t) = -\frac{1}{2} R^{-1} B' P(t) z(t) = G(t) z(t) \quad (3.14)$$

olarak hesaplanır. Deplasmanları bulmak için, sistem hareket denkleminde (3.3) de (3.14) yerine konursa

$$\dot{z}(t) = (A + BG) z(t) + Hf(t) \quad (3.15)$$

denklemden $z(t)$ hesaplanır. Uygulanan kontrol algoritmasının etkisi (3.3) denklemindeki sistem matrisi A (sistemin karakteristiklerini m_i , c_i , k_i içerir) nın, (3.15) denkleminde $(A + BG)$ ye dönüşmesiyle kendini ifade eder. Sistem matrisindeki bu değişiklik sistemin modal sönüm oranlarını ve modal frekanslarını değiştirir.

3.2. ANİ OPTİMAL KONTROL ALGORİTMASI

Deprem etkisi altındaki binalarda sadece kapalı-çevrim kontrol algoritması uygulanabilir. Fakat bu da tamamıyla optimal değildir. Çünkü $P(t)$ Riccati matrisi bulunurken yer ivmesi sıfır alınmıştır. Diğer yandan klasik optimal açık çevrim yada kapalı açık çevrim kontrol algoritmalarıda uygun değildir. Çünkü performans indeksi J tanım olarak , $[0, t_f]$ aralığında gerçekleştirilmesi gereken bir integraldir. Dolayısıyla çözüm için deprem yer ivmesinin zaman geçmişi elimizde olması gerekir. Oysa deprem yer ivmesi sensörler yardımıyla o anda ölçülebilen bir büyüklük olmasına rağmen önceden nasıl olacağı bilinemez. Yani, herhangi bir 't' anında, elimizde o 't' anına kadar ölçülen deprem kaydı mevcuttur.

Bu düşünceyle, zamana bağlı performans indeksi tanımlanır ve bu düşünceden hareketle ani optimal kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Ani optimal kontrol algoritmasının uygulanmasındaki prensip $t+\Delta t$ anındaki hesaplamada t anındaki veriden yararlanılmasıdır.[9-10]

Yapılan deneysel çalışmalar ani optimal kontrol algoritmalarının mevcut diğer kontrol algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Ani optimal kontrol teorisinde zamana bağlı performans indeksi (J) her t anında minimize edilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$J(t) = z'(t) Q z(t) + u'(t) Q u(t) \quad (3.16)$$

(3.3) nolu durum denkleminde $z(t)$ vektörünü (ki bu vektör içinde hem kat deplasmanlarını hem de kat hızlarını içerir) her t anında bulmak için önce (3.3) nolu denklem birbirinden bağımsız denklemler haline getirilir.

$T(2n \times 2n)$ modal matrisinin kolonları, A matrisinin özvektörlerinden oluşsun.

$$\{z(t)\} = [T] \{y(t)\} \quad (3.17)$$

dönüşümü (3.3) denkleminde uygulanırsa

$$T \dot{y}(t) = A T y(t) + B u(t) + H f(t) \quad (3.18)$$

$$\dot{y}(t) = T^{-1} A T y(t) + T^{-1} [B u(t) + H f(t)] \quad (3.18.a)$$

$$\dot{y}(t) = \theta y(t) + \Lambda(t) \quad (3.18b)$$

(3.18b) deki

$$\theta = T^{-1} A T \quad (3.19)$$

ve

$$\Lambda(t) = T^{-1} [B u(t) + H f(t)] \quad (3.20)$$

şeklindedir.

θ : Köşegen matristir ve köşegen elemanları A matrisinin kompleks özdeğerleridir.

(3.18b) nolu diferansiyel denklemin çözümü :

$$y(t) = \int_0^t e^{\theta(t-\tau)} \Lambda(\tau) d\tau \text{ olarak hesaplanabilir.}$$

$$y(t) = \int_0^{t-\Delta t} e^{\theta(t-\tau)} \Lambda(\tau) d\tau + \int_{t-\Delta t}^t e^{\theta(t-\tau)} \Lambda(\tau) d\tau \quad (3.21)$$

$y(t)$ iki integral ifadesinin toplamından oluşmaktadır. İlk integral $= e^{\theta\Delta t} y(t-\Delta t)$ ve ikinci integral yeterince küçük bir Δt aralığı için yaklaşık (integral geometrik anlamda bir eğrinin altında kalan alan olduğuna göre) $\cong (\Delta t/2) [e^{\theta\Delta t} \Lambda(t-\Delta t) + \Lambda(t)]$ olarak hesaplanabilir

Sonuç olarak ;

$$y(t) \cong e^{\theta\Delta t} y(t-\Delta t) + (\Delta t/2) [e^{\theta\Delta t} \Lambda(t-\Delta t) + \Lambda(t)] \quad (3.22)$$

(3.17) den

$$y(t-\Delta t) = T^{-1} z(t-\Delta t) \quad (3.23)$$

(3.23) , (3.22) de; (3.22) de (3.17) de yerine konursa

$$z(t) = T y(t) = T e^{\theta\Delta t} T^{-1} z(t-\Delta t) + (\Delta t/2) T [e^{\theta\Delta t} \Lambda(t-\Delta t) + \Lambda(t)] \quad (3.24)$$

(3.20) den t yerine $t-\Delta t$ koyarak

$$\Lambda(t-\Delta t) = T^{-1} [Bu(t-\Delta t) + Hf(t-\Delta t)] \quad (3.25)$$

ve (3.25), (3.22) de yerine konursa

$$z(t) = T e^{\theta\Delta t} T^{-1} z(t-\Delta t) + (\Delta t/2) T [e^{\theta\Delta t} T^{-1} \{Bu(t-\Delta t) + Hf(t-\Delta t)\} + \{Bu(t) + Hf(t)\}] \quad (3.26)$$

elde edilir.

Burada ifadeyi sadeleştirmek için $(t-\Delta t)$ anında bütün dinamikleri kapsayan $D(t-\Delta t)$ vektörü aşağıdaki gibi tanımlanırsa ,

$$D(t-\Delta t) = e^{\theta \Delta t} T^{-1} \{ z(t-\Delta t) + (\Delta t/2) [Bu(t-\Delta t) + Hf(t-\Delta t)] \} \quad (3.27)$$

(3.26) ifadesi

$$z(t) = T D(t-\Delta t) + (\Delta t/2) [Bu(t) + Hf(t)] \quad (3.28)$$

şekline gelir. (3.28) denkleminde iki bilinmeyen vardır ($z(t)$ ve $u(t)$) Dolayısıyla bir denkleme daha ihtiyaç vardır. Bu ise performans indeksinin, (3.16) denkleminin minimize edilmesi ile elde edilir.

Optimal kontrol problemini çözmek için (3.16) ve (3.3) denklemleri Lagrange çarpanı $\lambda(t)$ ile birleştirilir. Lagrangian L ;

$$L = \int_0^{t_f} z'(t)Qz(t) + u'(t)Ru(t) + \lambda'(t) \{ z(t) - T D(t-\Delta t) - (\Delta t/2) [Bu(t) + Hf(t)] \}$$

Hamiltonian $\bar{H}$ (Lagrangian L 'nin intagrantıdır)

$$\bar{H} = z'(t)Qz(t) + u'(t)Ru(t) + \lambda'(t) \{ z(t) - T D(t-\Delta t) - (\Delta t/2) [Bu(t) + Hf(t)] \} \quad (3.29)$$

Sonuç olarak J , Performans indeksini minimize etmek için (3.29) dan

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = 0 \longrightarrow 2Qz(t) + \lambda(t) = 0 \quad (3.30a)$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial u} = 0 \longrightarrow 2Ru(t) - (\Delta t/2)B' \lambda(t) = 0 \quad (3.30b)$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial \lambda} = 0 \longrightarrow z(t) - T D(t-\Delta t) - (\Delta t/2) [Bu(t) + Hf(t)] = 0 \quad (3.30c)$$

Ani optimal kapalı çevrim kontrolünde kontrol vektörü $u(t)$, veya eşdurum vektörü $\lambda(t)$, geri besleme mukabele vektörü $z(t)$ ile regüle edilir.

$$\lambda(t) = \eta z(t) \quad (3.31)$$

(3.30a) dan

$(2Q + \eta) z(t) = 0$ elde edilir. $z(t) \neq 0$ olduğundan

$$\eta = -2Q \rightarrow \lambda(t) = -2Qz(t) \quad (3.32)$$

ve (3.30b) den $u(t)$ kontrol kuvvet vektörü :

$$u(t) = (-\Delta t/2) R^{-1} B' Q z(t) \quad (3.33)$$

(3.33) denklemi (3.30c) de yerine konarak düzenlenirse

$$z(t) = [I + (\Delta t/2)^2 B R^{-1} B' Q]^{-1} [TD(t-\Delta t) + (\Delta t/2) Hf(t)] \quad (3.34)$$

Sonuç olarak ani optimal kontrol teorisinde klasik optimal kontroldeki $P(t)$ Riccati matrisinin bulunmasına gerek yoktur. Bulunması gerekenler (3.27) , (3.33) ve (3.34) denklemlerindeki ifadelerdir.

BÖLÜM 4

SAYISAL ÖRNEKLER

Ani optimal kontrol algoritmasının etkinliği 3 adet deprem üzerinde çözülmüştür. Bu depremler 1992-Erzincan, 1998-Ceyhan ve 1999-Bolu depremleridir ve ölçülen pik ivme değerleri:

1992-Erzincan depremi için max.ivme: 390 cm/sn^2

1998-Ceyhan depremi için max ivme : 223 cm/sn^2

1999-Bolu depremi için max ivme : 806 cm/sn^2

Seçilen yapı %2 sönümlü 8 katlı binadır. Her kat aynı kütleyle sahiptir ve 345.6 tondur, ayrıca her katın rijitliği 340400 kN/m ve sönüm katsayıları 2937 ton/sn olarak seçilmiştir.

R ağırlık matrisinin köşegen elemanları 10^{-3} ve diğer elemanları sıfır olarak seçilmiştir.

Q matrisinin kısımları Q_{11} ve Q_{12} sıfır matrisler olarak Q_{21} ve Q_{22} sfırdan farklı seçilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} [Q_{11}] & [Q_{12}] \\ [Q_{21}] & [Q_{22}] \end{bmatrix}$$

$$Q_{21} = \begin{bmatrix} -33.5 & -67 & -100.5 & -134 & -167.5 & -201 & -234.5 & -268 & 375.6 \\ -33.5 & -67 & -100.5 & -134 & -167.5 & -201 & -234.5 & -268 & 32.2 \end{bmatrix}$$

$$Q_{22} = \begin{bmatrix} 67.5 & 135 & 202.5 & 270 & 338.5 & 405 & 472.5 & 540 & 32.2 \\ 5.8 & 11.6 & 17.4 & 23.2 & 29 & 34.7 & 40.5 & 46.3 & 5.7 \end{bmatrix}$$

ve Q matrisi bir katsayı ile çarpılmaktadır. Bu katsayı 67 olarak seçilmiştir.

Sonuçlar grafikler de verilmiştir.

BÖLÜM 5

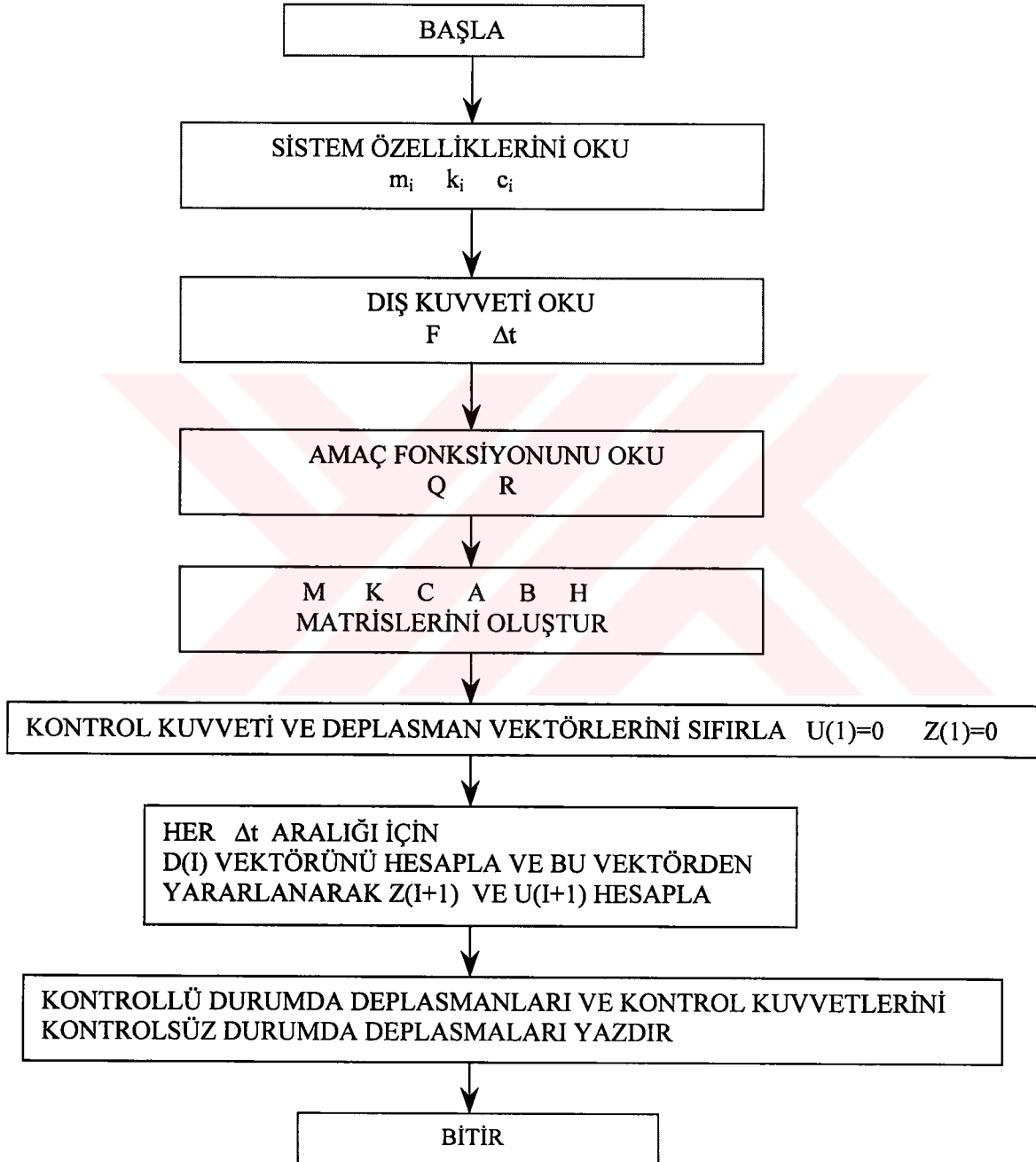
SONUÇ

Sonuçlardan da görüldüğü gibi bir depremin gücünün belirlenmesinde sadece max ivme değeri baz alınmamalıdır. Depremin şiddeti kadar dağılımı da kontrol mekanizmasını etkiler. Ayrıca R ve Q matrislerinin sabit alınması kontrol mekanizmasının her deprem için iyi sonuç vermesine engel olur. Dolayısıyla eğer biz kontrol algoritmasının daha iyi sonuç vermesini istiyorsak Q ve R matrisleri sabit alınmayıp her t anında geri beslenen yapı mukabelesine göre değiştirilmelidir.

Bununla birlikte eğer Q matrisine büyük değerler atarsak veya R matrisine küçük değerler atarsak deplasmanlar azalır. Bu yüzden artan kontrol kuvvetleri maliyet artışına sebep olur. Tüm sorun optimal Q ve R nin bulunmasıdır. Günümüzde kontrol algoritmalarının çözümünden çok bu optimalliğin nasıl sağlanacağı hususunda Q ve R ağırlık matrislerinin seçimiyle ilgili çalışmalar sürmektedir.

Yapı kütlelerinin artması veya rijitliğinin artması yada sönüm oranının artması oluşan deplasmanları azaltırken, uygulanan kontrol kuvvetinin de artmasına sebep olur.

Ek A. Ani Optimal Kontrol için (lineer sistem) akış diyagramı



Ek B. Ani Optimal Kontrol için (lineer sistem) bilgisayar programı

```
% echo on
% Bu -MATLAB- programı herhangi dış yük altındaki
% sistemin kontrol kuvvetlerini hesaplar
%  $Mx''(t) + Cx'(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t)$ 
% M(nxn):Sistem kütle matrisi
% C(nxn):Sistem sönüm matrisi
% K(nxn):Sistem rijitlik matrisi
% x(t)= (nx1) boyutlu deplasman vektörü
% E(nxr):dış yük yer vektörü
% f(t)= (rx1) boyutlu dış yük vektörü
% u(t)= (mx1) boyutlu kontrol vektörü
% D(nxm):kontrol kuvvetleri yer vektörü

clear,clc, baslangiczamani=cputime;

% m=input('Kat kütlelerini giriniz: \n');
m=[345.6 345.6 345.6 345.6 345.6 345.6 345.6 345.6 29.63];
nkat=length(m);
% k=input('Kat rijitliklerini giriniz: \n');
k=[340400 340400 340400 340400 340400 340400 340400 340400 957.2 ];
% c=input('Kat sonumlerini giriniz: \n');
c=[2937 2937 2937 2937 2937 2937 2937 2937 25];

% D_=input('Kontrol kuvvetlerinin uygulandigi katlari giriniz: \n');
D_=[9] ;
nkont=length(D_);

% F=input('Dis kuvvetlerin degerini giriniz: \n');
fid=fopen('erzincanNS');
F=fscanf(fid,'%f',[1 inf]);
F=reshape(F,2314,1)*0.01;
fclose(fid);

% alfa=input('Q matrisi ile ilgili katsayi degerini(>0) giriniz: \n');
alfa=67 ;
% beta=input('R matrisi ile ilgili katsayi degerini(>0) giriniz: \n');
beta=0.0001 ;
```

```

% Sistemle ilgili KÜTLE,SÖNÜM VE RİJİTLİK matrislerinin oluşturulması
k(nkat+1)=0;
c(nkat+1)=0;
M=diag(m);

K=diag(k(1:nkat))+diag(k(2:end))+diag(-1*k(2:nkat),1)+diag(-1*k(2:nkat),-1);

C=diag(c(1:nkat))+diag(c(2:end))+diag(-1*c(2:nkat),1)+diag(-1*c(2:nkat),-1);

% z'=Az+Bu+Hf denklemini çözebilmek için:
%      A, B, H   matrislerinin oluşturulması

A=[zeros(nkat,nkat) eye(nkat,nkat);-M\K -M\C] ;

D=zeros(nkat,1);D(nkat-1,1)=-1. ; D(nkat,1)=1. ;
B=[zeros(nkat,nkont);M\D] ;
H=[zeros(nkat,1) ; -ones(nkat,1)];

% Q(güvenlik) ve R(ekonomi) pozitif semidefinit ağırlık matrisleri
Q21=[-33.5 -67 -100.5 -134 -167.5 -201 -234.5 -268 375.6;-33.5 -67 -100.5 -134 -
167.5 -201 -234.5 -268 32.2];
Q22=[67.5 135 202.5 270 338.5 405 472.5 540 32.2;5.8 11.6 17.4 23.2 29 34.7 40.5
46.3 5.7];
Q=alfa.*[zeros(2*nkat-2,nkat) zeros(2*nkat-2,nkat) ;Q21 Q22 ];
R=beta*eye(nkont,nkont);

% Döngünün içinde kullanılan döngüden etkilenmeyen matris işlemleri
[T,sil2]=eig(A);
theta= inv(T)*A*T;

dt=0.01 ;      %ölçüm aralığı
sil3= (expm1(dt*theta) )* inv(T);
sil4= inv ( eye(2*nkat,2*nkat) + 0.25*dt*dt*B*inv(R)*B'*Q );
sil5= -0.5*dt*inv(R)*B'*Q ;

% Z(t)--Deplasmanların ve U(t)--Kontrol kuvvetlerinin hesaplanması
clear Z U      ,Z(2*nkat,1)=0; U(nkont,1)=0;
ntekrar=length(F)-1 ;
filename1=fopen('depl.m','w');
filename2=fopen('katdepl.m','w');
filename3=fopen('kontkuv.m','w');

% ikat=input('Deplasmanı istenen kati giriniz: \n');
ikat=8;
fprintf(filename1,'Bütün katların deplasmanları: \n\n');
fprintf(filename2,'%i .katın deplasmanı: \n\n',ikat);
fprintf(filename3,'Kontrol Kuvvetleri: \n\n',ikat);

```

```

maxdepls=0;maxkont=0;
for i=1:ntekrar
    depls=real(Z(1:nkat));
    deplskat=real(Z(ikat));

    fprintf(filename1,'%f \n',depls);
    fprintf(filename1,'\n');
    fprintf(filename2,'%f \n',deplskat);
    fprintf(filename3,'%f \n',U);
    vardepls(i,:)=deplskat;
    kontkuv(i,:)=U;      %Bütün zaman aralıklarındaki değerler vektörlere atanıyor
    DD= sil3* ( Z + 0.5*dt*(B*U + H*F(i) ) );
    Z= real(sil4* ( T*DD + 0.5*dt*H*F(i+1) ) );
    if deplskat>=maxdepls ;
        maxdepls=deplskat ;
    end
    U= real(sil5*Z) ;
    if U>=maxkont ;
        maxkont=U ;
    end
    end
    fclose(filename1);
    fclose(filename2);
    fclose(filename3);
    disp('-----KONTROLLÜ DURUM için sonuçlar basıldı-----')
    fprintf(' <%3i .KAT> \n ',ikat);
    fprintf('maximum deplasman= %6.2f cm \n maximum kontrol kuvveti= %6.2f kN
\n\n',maxdepls*100,maxkont);
    fid=fopen('sonuç.txt','w');
    fprintf(fid,' maximum deplasman = %6.2f cm \n',maxdepls*100);
    fprintf(fid,' maximum kontrol kuvveti = %6.2f kN \n\n',maxkont);

% Kontrolsüz durumda deplasmanların bulunması
% (B=0 ve D= 0 olması durumu)
clear Z U DD,
clear filename1 filename2 filename3 depls deplskat countprint1 countprint2
clear fileclose1 fileclose2 fileclose3
Z(2*nkat,1)=0;
filename1=fopen('kontyok.m','w');
filename2=fopen('kontyokkat.m','w');
fprintf(filename1,'Bütün katların deplasmanları(Kontrolsüz Durum): \n\n');
fprintf(filename2,'%i .katın deplasmanı(Kontrolsüz durum): \n\n',ikat);

```

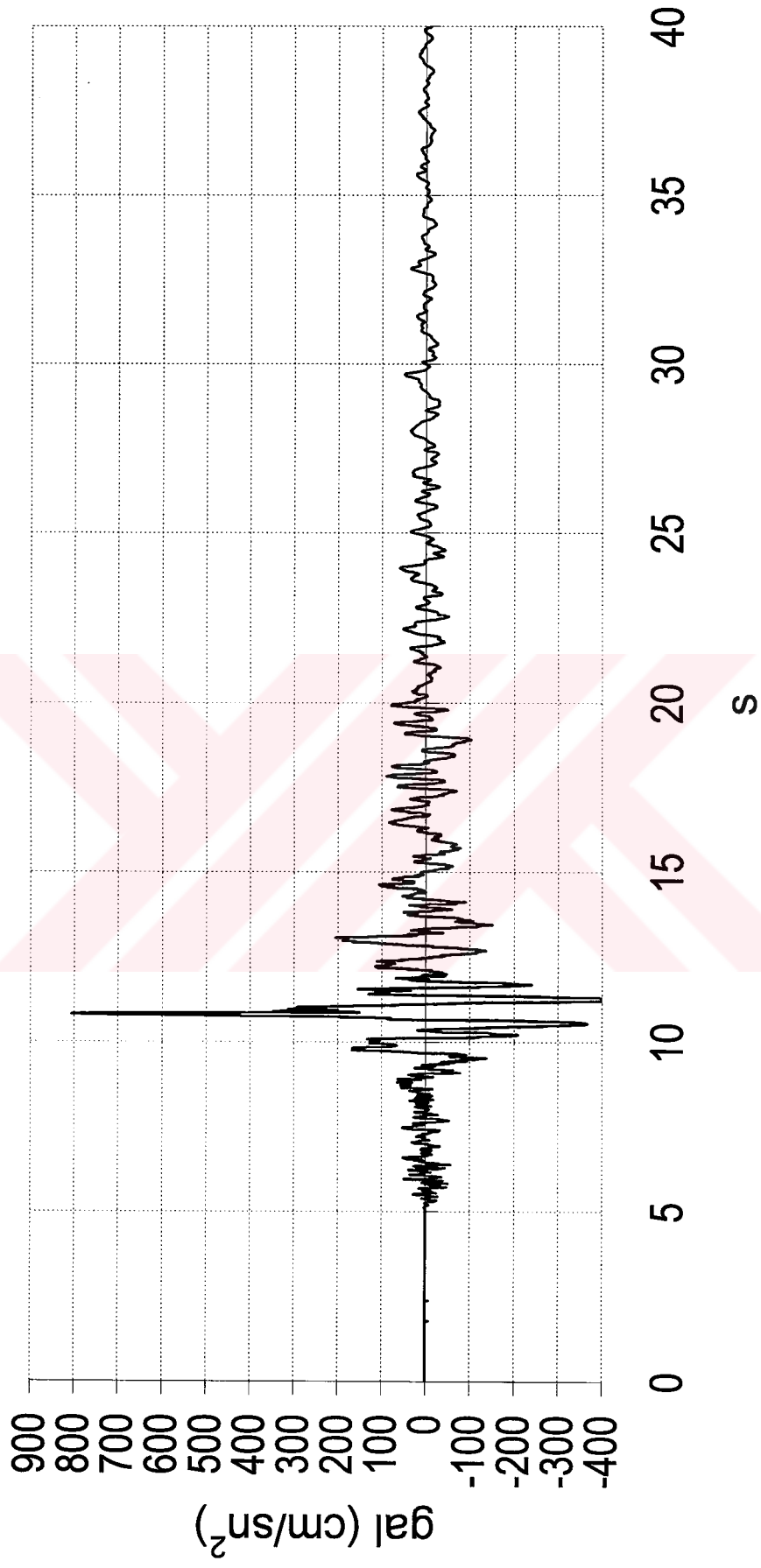
```

for i=1:ntekrar
    depls=real(Z(1:nkat));
    deplskat=real(Z(ikat));
    fprintf(filename1,'%f \n',depls);
    fprintf(filename1,'\n');
    fprintf(filename2,'%f \n',deplskat);
    yokdepls(i,:)=deplskat; %Bütün zaman aralıklarındaki değerler vektörün içine
    atanıyor
    DD= sil3* ( Z + 0.5*dt*H.*F(i));
    Z= real(T*DD + 0.5*dt*H*F(i+1)) ;
    if deplskat>=maxdepls ;
        maxdepls=deplskat ;
    end
end
fclose(filename1);
fclose(filename2);
disp('-----KONTROLSÜZ DURUM için sonuçlar basildi-----')
fprintf('maximum deplasman= %6.2f cm \n\n',maxdepls*100);
fprintf(fid,' maximum deplasman = %6.2f cm \n\n',maxdepls*100);
fclose(fid);

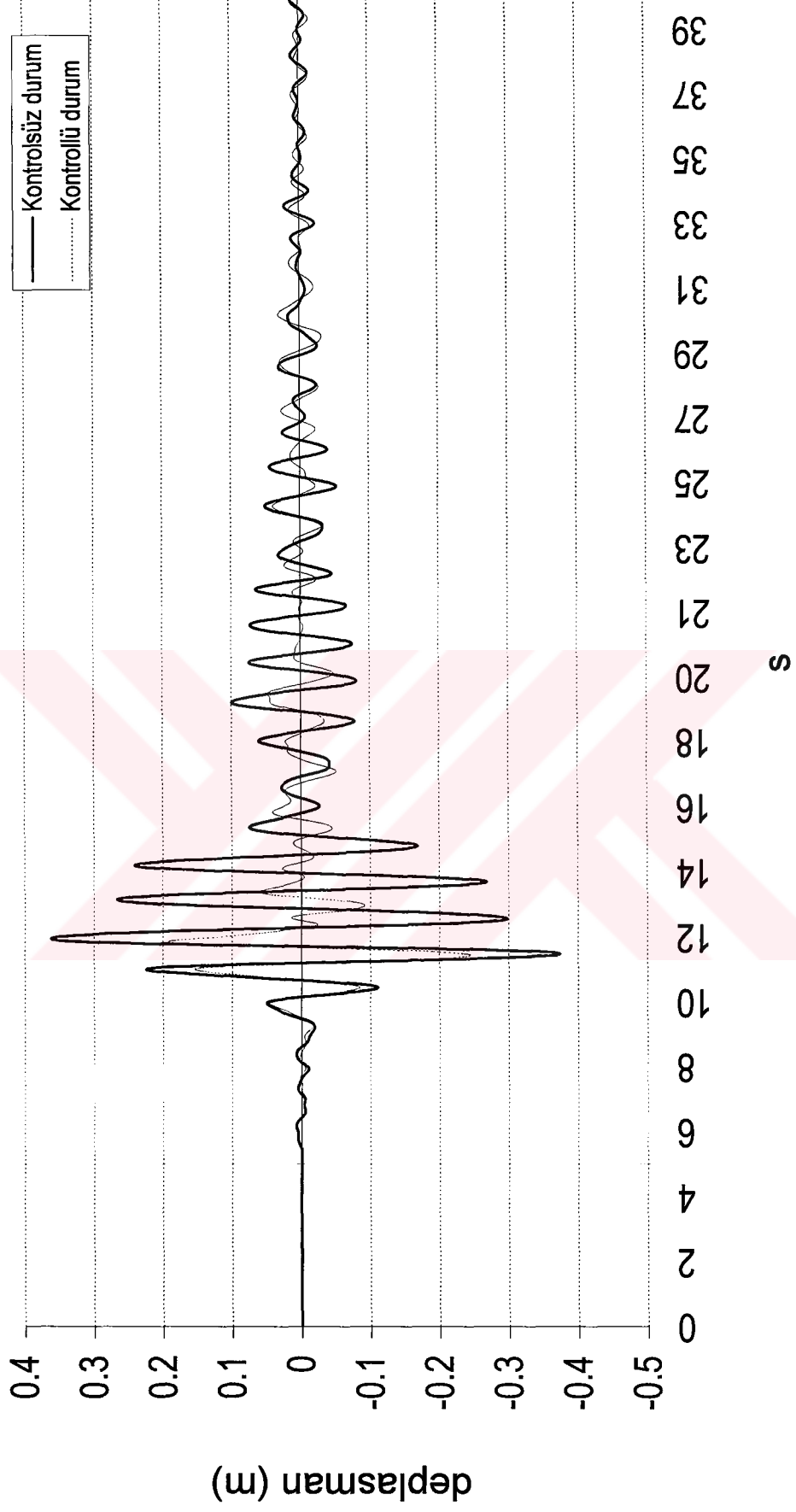
x=[0:dt:dt*(length(F)-2)]; %yatay eksen
subplot(2,1,1),plot(x,vardepls*100,'r.',x,yokdepls*100),grid on;
xlabel('time(s)'),ylabel('displacement(cm)');
subplot(2,1,2),plot(x,kontkuv,'m'),grid on;
ylabel('control force(kN)');
bitiszamanı=cputime-baslangıczamanı;
fprintf('işlem %5.2f sn sürdü \n',bitiszamanı);

```

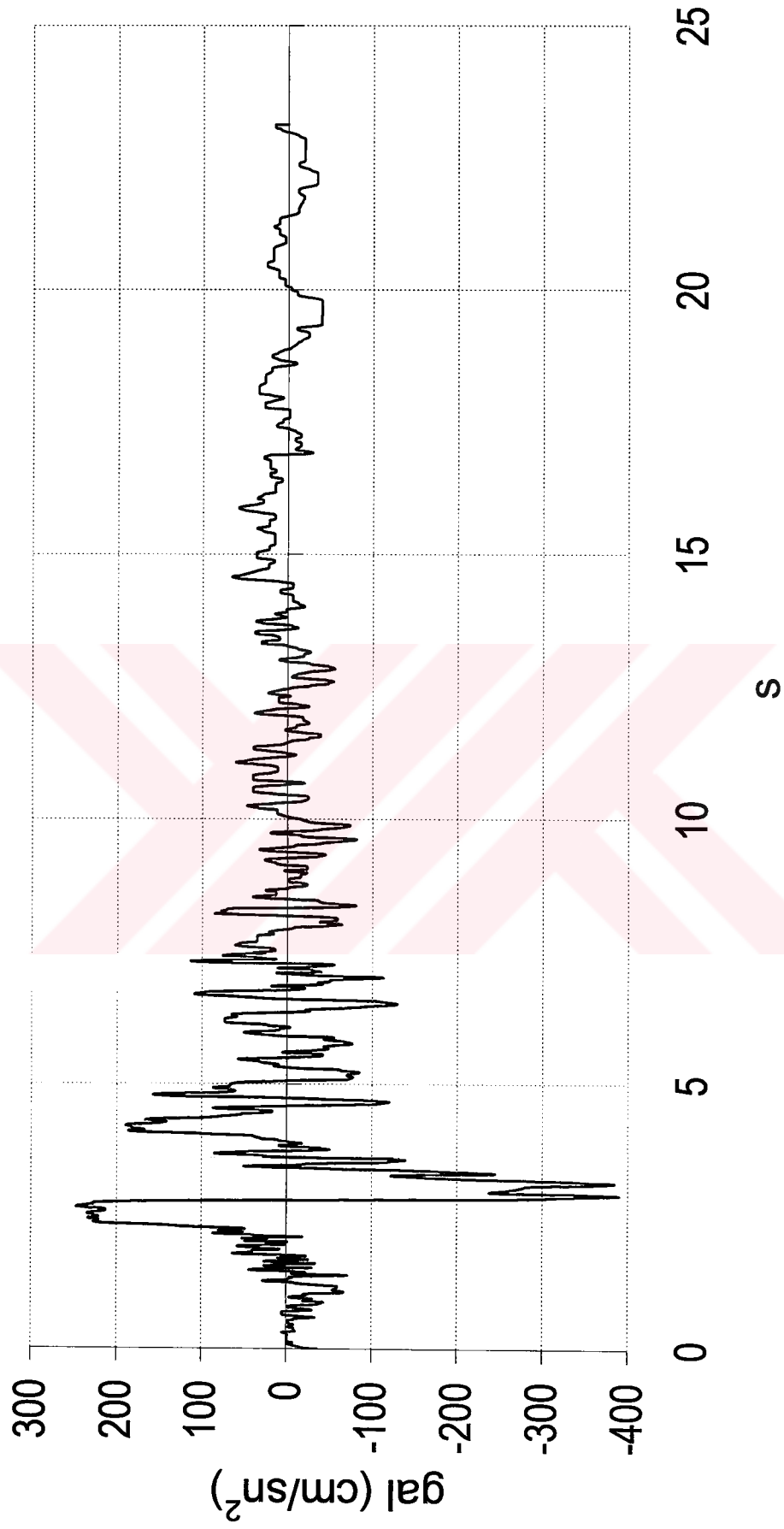
BoluEW ivme sismogramı (1999)



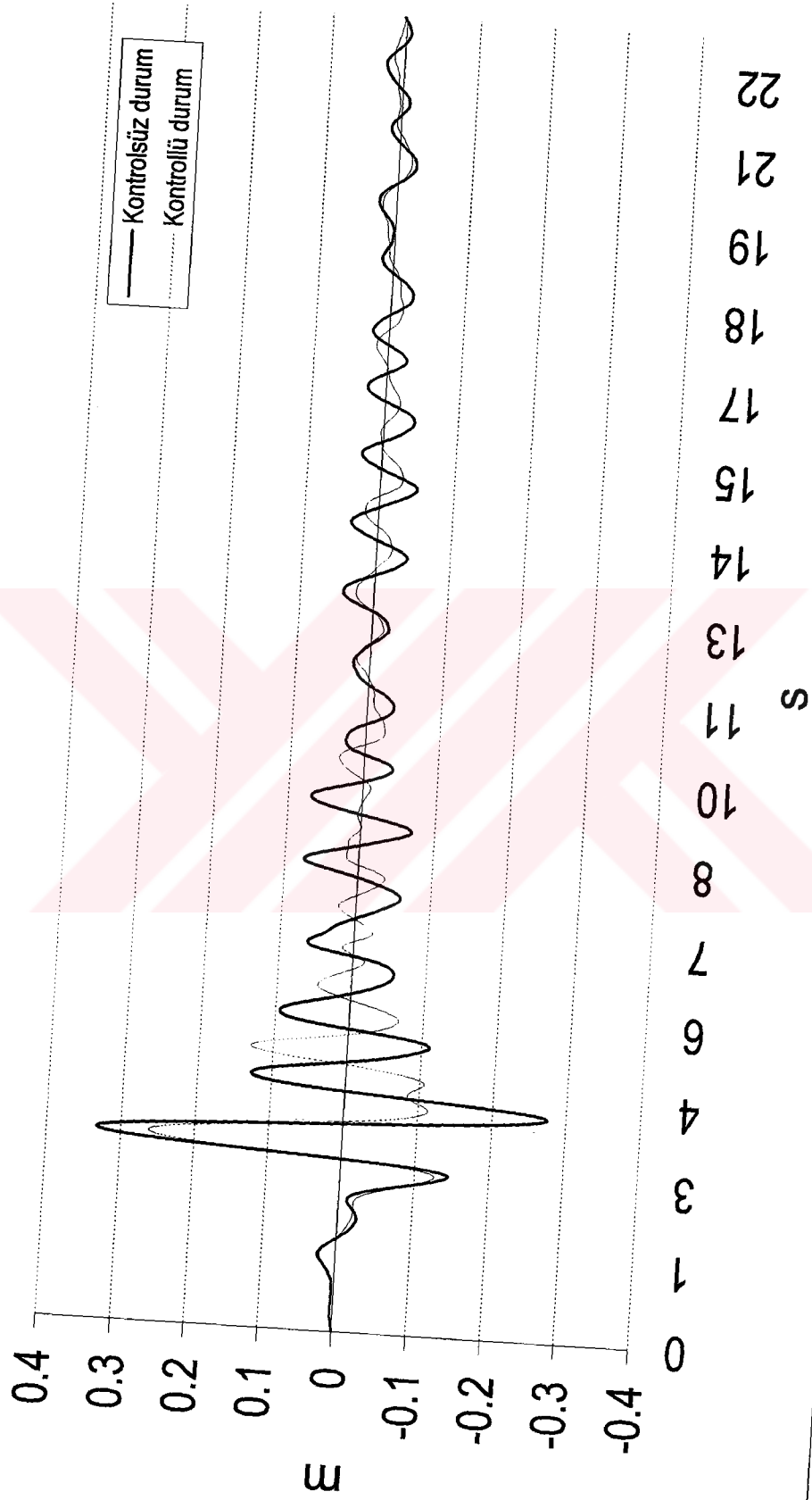
8.kat deplasmanlari



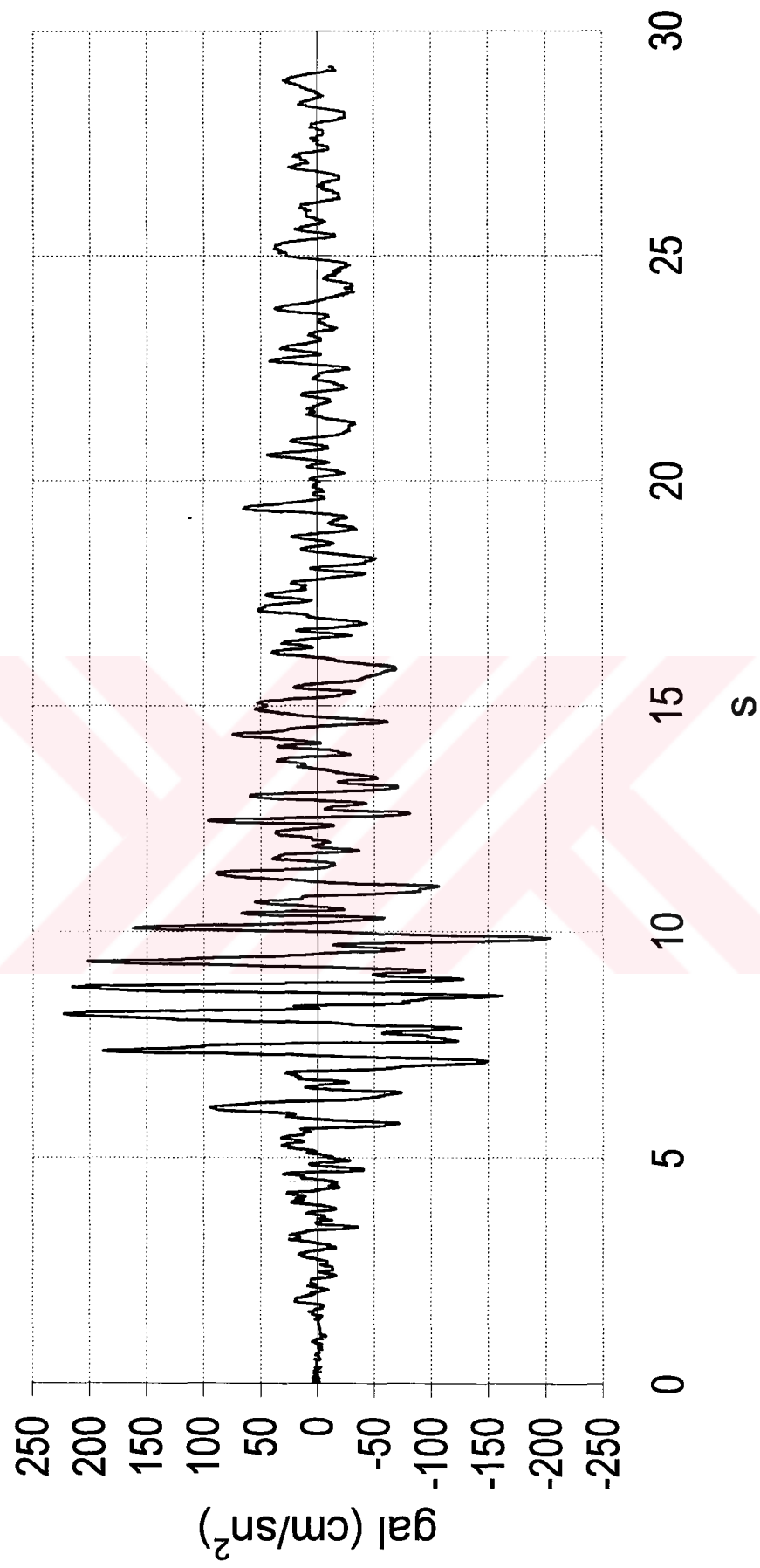
ErzincanNS ivme sismogramı (1992)



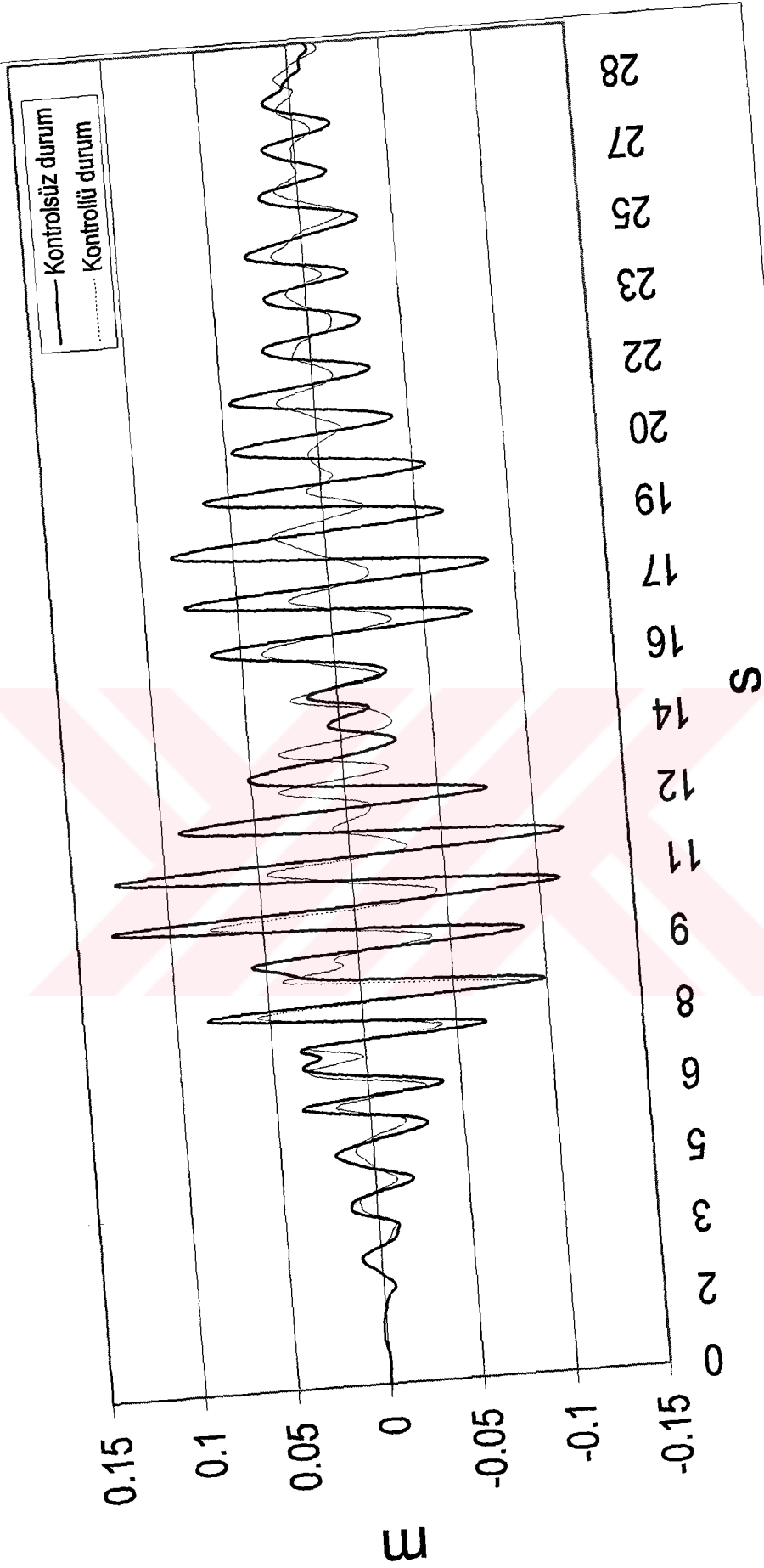
8.kat deplasmanları

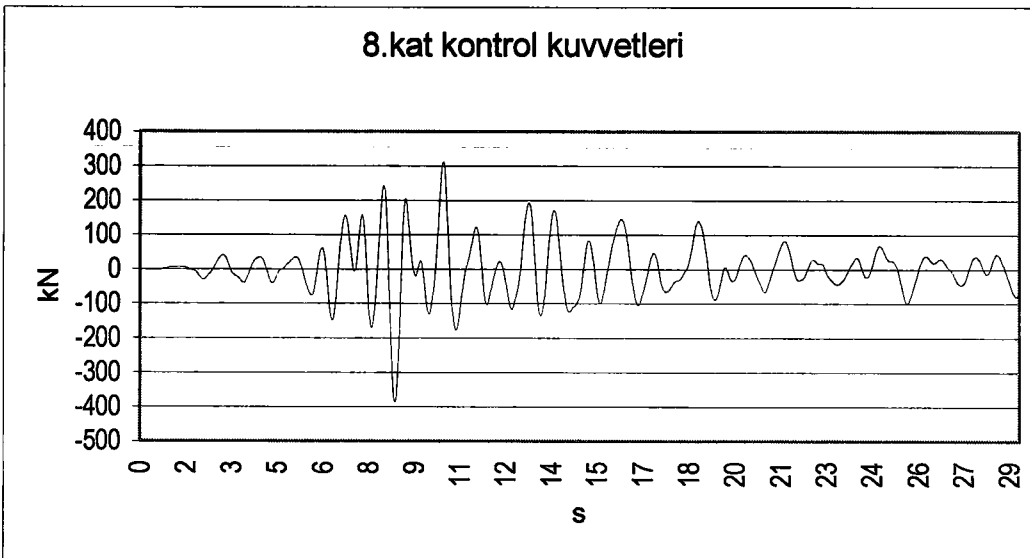
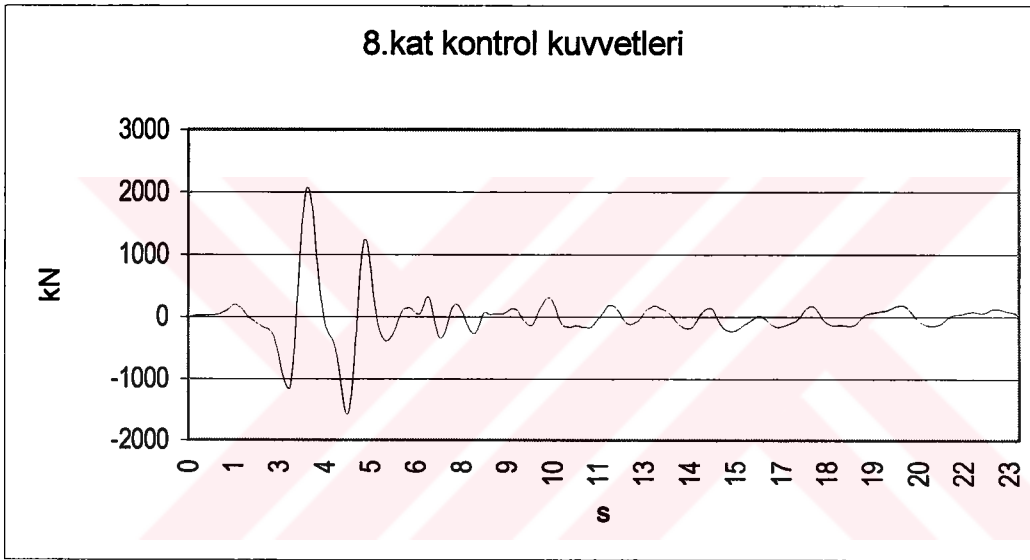
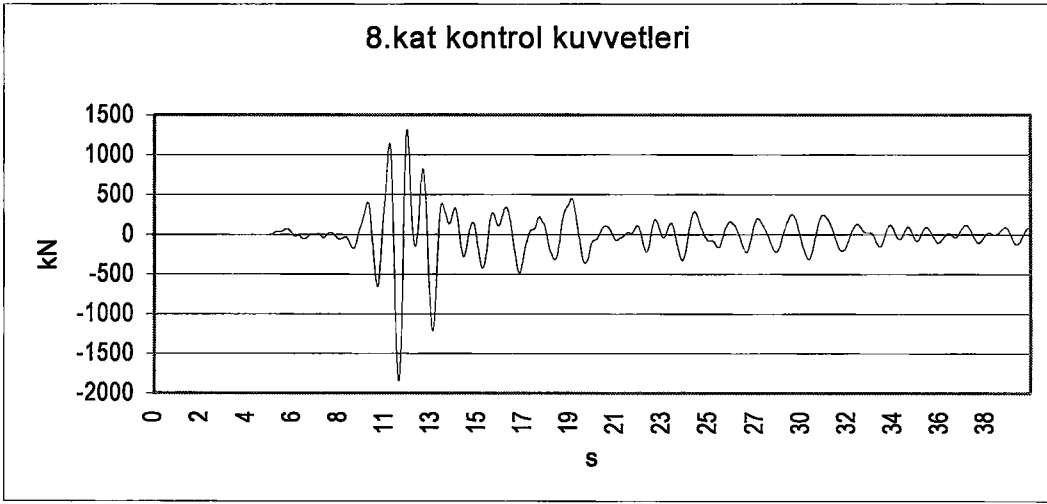


CeyhanNS ivme sismogramı (1998)



8.kat deplasmanları





KAYNAKLAR

- [1] **Bakioğlu, M.** 1999. Depreme dayanıklı yapı tasarımında gelişmeler, *Cumhuriyet Bilim Teknik*, **652**, 10.
- [2] **Ribakov, Y. and Gluck, J.**, 1999. Active control of mdof structures with supplemental Electrorheological fluid dampers, *Earthquake Eng. and Structural Dyn.*, **28**, 143-156.
- [3] **Kobori, T. Koshika, N.**, 1991, Seismic-response controlled structure with active mass driver system *Earthquake Eng. and Structural Dyn* , **20**, 133-149
- [4] **Kobori, T. Koshika, N.**, 1993, Seismic-response controlled structure with active variable stiffness system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 925-941
- [5] **Sarı, B.**, 1998. Deprem etkisindeki yapılarda aktif ve pasif kontrol sistemlerinin uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [6] **Inaudi, J. Kelly, J.**, 1993, Hybrid isolation systems for equipment protection, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, 297-313
- [7] **Housner, Bergman, Caughey, Masri, Skelton, Soong, Yao**, 1997, Structural control, past, present and future, *Journal of Engineering Mechanics* , **123**, 897-958
- [8] **Y.L. XU**, 1999, Experimental investigation of adjacent buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 617
- [9] **Aldemir, Ü.**, 1991. Depreme dayanıklı yapı tasarımında aktif kontrolün kullanılması , *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
- [10] **Yang, J, Akbarpour, A.**, 1988, New control algorithms for structural control , *Journal of Engineering Mechanics* , **113**, 1369-1386

ÖZGEÇMİŞ

Bekir Bora Gözükızıl 1976 yılında İstanbul'da doğdu. 1993 yılında İ.T.Ü İnşaat mühendisliği eğitimine başladı. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra özel sektörde çalışmaya başladı, 1997 yılında Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı.

