

DEPREM MÜHENDİSLİĞİNDE "SİSTEM TANIMLAMASI" YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

SYSTEM IDENTIFICATION TECHNIQUES AND APPLICATIONS IN EARTHQUAKE ENGINEERING

Uğur Kadakal¹, Özal Yüzüğüllü²

SUMMARY

In this paper, after a short theoretical introduction to the existing system identification techniques, these techniques have been applied for the analysis of the earthquake records belonging to a highrise building which enabled the determination of modal frequencies and damping values in a more refined manner. A new technique has been introduced and applied for this purpose.

ÖZET

Bu çalışmada sistem tanımlaması ile ilgili mevcut yöntemlere kısa bir teorik girişim ve ardından bu teknikler kullanılarak yüksek katlı bir binada alınan deprem kayıtları analiz edilmiş ve yapının modal frekans ve sönüm değerleri yüksek bir hassasiyetle bulunmuştur. Türkiye'deki deprem kayıt cihazlı yapı sayısı çok kısıtlı olduğundan, San Fransisco'daki Transamerica binası seçilmiş ve 1989 Loma Prieta depremi kayıtları analiz edilmiş ve hassasiyeti arttırmak için yeni bir yöntem uygulanmıştır (Kadakal, 1995).

GİRİŞ

Son yıllarda başta ABD olmak üzere birçok ülkede değişik tipte yapılara deprem ölçüm cihazları yerleştirilerek, deprem sırasındaki davranışları tespit edilmeye çalışılmaktadır. Özellikle 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremleri sırasında başta binalar olmak üzere birçok köprü ve barajlarda deprem kayıtları alınmıştır. Alınan kayıtlar farklı tipte binaların

¹ Araş. Gör. Northeastern Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boston, A.B.D.

² Prof. Dr. B.Ü.,K.R.D.A.E. Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Çengelköy, İstanbul

deprem sırasındaki performanslarını ortaya çıkarması açısından çok önemlidir. Yakın zamana kadar bu tip kayıtların işlenmesi için frekans tanım alanındaki yöntemler (Fourier ve davranış spektrumları ile transfer fonksiyonları) kullanılmakta idi. Bu yöntemlerin en önemli dezavantajı hassas sonuçlar verememeleridir. Örneğin bir binanın deprem kayıtlarının bu yöntemlerle incelenmesi sonucunda frekans değerleri ve özellikle sönümler çok kabaca ve geniş güvenilirlik aralıkları dahilinde bulunabilmektedir (Kadakal, 1994). Ancak son yıllarda özellikle elektronik mühendisliğinde çokça kullanılan zaman tanım alanındaki sistem tanımlaması tekniklerinin deprem mühendisliğinde de kullanım alanı bulması ile yapılardan elde edilen deprem kayıtlarının değerlendirilmesiyle çok daha hassas ve güvenilir sonuçlara ulaşılabileceği mümkün olmuştur (Şafak ve Çelebi, 1991, 1992).

TEORİ

Linear dinamik bir sistemin $u(t)$ zorlaması altındaki davranışı modal analiz yöntemleri ile aşağıdaki gibi formüle edilebilir

$$\ddot{y}_n + 2\omega_i \xi_i \dot{y}_n + \omega_i^2 y_n = -\alpha_n \ddot{u} \quad (1)$$

burada ξ_i ve ω_i i'inci moda ait sönüm ve açısal frekansı, y_n n'inci serbestlik derecesindeki sistem hareketini ve α_n de yine n'inci serbestlik derecesine ait katkı faktörünü temsil etmektedir. Aynı sistemi aşağıdaki şekilde de yazmak mümkündür (Ljung, 1987)

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) \quad (2)$$

burada u sistemin girdisi, y ise u nun yarattığı çıktı ve $e(t)$ ise 'gelişigüzel gürültü' olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde tanımlanan model ARX olarak bilinir. Formül 2' deki bilinmeyenler θ vektörü olarak adlandırılır:

$$\theta = [a_1 a_2 \dots a_{n_a} b_1 b_2 \dots b_{n_b}]^T \quad (3)$$

En küçük kareler yöntemi ile θ vektörü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Ljung, 1987)

$$\hat{\theta}_N^{LS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi^T(t) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \quad (4)$$

burada N , u girdisi ve y çıktısındaki veri sayısı ve $\varphi(t)$ ise regresyon vektörü olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

Formül 4'un kullanılması ile bulunan θ vektörü fiziksel bir anlam taşımamakla beraber,

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n_a)u(t-1) \dots u(t-n_b)]^T \quad (5)$$

deprem mühendisliğinde önem taşıyan modal frekans ve sönüm değerlerine çevrilebilir (Şafak, 1988).

$$\xi_i = \frac{\ln\left(\frac{1}{r_i}\right)}{\sqrt{\phi_i^2 + \ln^2\left(\frac{1}{r_i}\right)}} \quad f_i = \frac{\ln\left(\frac{1}{r_i}\right)}{2\pi\xi_i T} \quad (6)$$

Burada T , u ve y verilerine ait örnekleme aralığı, r_i ve ϕ_i değerleri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$r_i = p_i p_i^* \quad \phi_i = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(p_i)}{\text{Re}(p_i)} \right] \quad (7)$$

Burada p_i , 0 vektöründeki parametrelerin oluşturduğu i 'inci kompleks kökü, p_i^* ise kompleks eşleniğini temsil etmektedir. Im ve Re ise kökün kompleks ve reel kısımlarını gösterir.

Sistem tanımlaması analizindeki en büyük zorluklardan biri model parametreleri olan n_a ve n_b değerlerinin belirlenmesidir. Bu değerler sırasıyla girdi ve çıktı modellerinin büyüklüğünü gösterir. Analiz sonucunda $n_a/2$ kadar moda ait frekans ve sönüm değeri bulunacağından dolayı, n_a hesaplanması amaçlanan mod sayısının iki katından fazla olmalıdır. Bir diğer zorluk da binalarda birden fazla kat seviyesinde deprem kaydı alındığı için analizde kullanılacak y çıktısının seçilmesidir. Ancak şu da bilinmektedir ki farklı katlarda alınan kayıtlarda farklı modlara ait bilgiler daha etken olmaktadır. Örneğin, birinci moda ait değerleri bulmak için en üst kattaki kayıt kullanılırken, ikinci ve üçüncü modlar için ara katlardaki kayıtlar daha sağlıklı sonuçlar verebilmektedir.

Model parametrelerinin (n_a ve n_b) değerleri bulunduktan ve kullanılacak y çıktısı belirlendikten sonra formül 4 ve ardından 6 kullanılarak modal frekans ve sönüm değerleri hesaplanır. Ancak bu değerlerin ne kadar gerçekçi oldukları hala bilinmemektedir. Modal frekans ve sönüm değerlerinin kontrolü için aşağıda açıklanan yöntem kullanılabilir (Kadakal, 1995). Analize başlamadan önce Fourier veya davranış spektrumları yardımıyla yapı frekansları (f_i) kabaca bulunabilir. Bu başlangıç değerleri kullanılarak, analiz sonucunda bulunacak her moda ait f_i ile başlangıç frekans değeri arasındaki fark ile tanımlanan frekans

kriteri c_{fi} belirlenir. Benzer şekilde kabul edilebilir en yüksek sönüm şeklinde tanımlanan sönüm kriteri c_{di} da belirlenir. Sönüm kriteri belirlenirken yapı tipi (betonarme veya çelik) önemli bir faktör olmaktadır. Sistem tanımlaması analizi sonucunda bulunan değerlerden sadece bu iki kriteri aynı anda sağlayanlar kabul edilir. Bu kriterlerin kullanılmasının bir diğer avantajı da analiz sonucunda sadece yapıya ait frekans ve sönüm değerlerinin seçilmesi çevresel etkenlerden ve gürültüden dolayı bulunabilecek yapı ile ilgisi olmayan frekans ve sönüm değerlerinin analiz dışı bırakılmalarını sağlamalarıdır. Bir sonraki bölümde de açıklanacağı gibi her aşamada frekans ve sönüm kriterleri daha konservatif seçilebilir.

ANALİZ YÖNTEMİ

Modal frekans ve sönüm değerleri bulunurken Şekil.1 de verilen akış diyagramı takip edilmiştir. Analize başlamadan önce Fourier veya davranış spektrumları aracılığıyla yapı frekansları kabaca bulunur. Farklı n_a (20,22,...,50,...) değerlerine sahip n_k tane model yaratılarak n' inci serbestlik derecesine ait kayıtlar vasıtası ile sistem parametreleri olan f_{in}^k ve ξ_{in}^k (i' inci moda ait, n' inci serbestlik derecesindeki kayıt kullanılarak bulunan model büyüklüğü n_a olan modelden hesaplanan parametreler) değerleri frekans ve sönüm kriterleri kullanılarak belirlenir. Genellikle başlangıçta her mod için birden fazla frekans ve sönüm değeri kriterleri sağladığı için (özellikle yüksek n_a değerleri için) c_{fi} ve c_{di} kriterleri daha konservatif seçilerek bir tek frekans ve sönüm bulunana kadar analiz bu şekilde tekrarlanır. Ardından n_k tane farklı model sonucunda bulunan değerlerin ortalamaları ve standart sapmaları bulunur (f_{in} , ξ_{in} ve $std(f_{in})$, $std(\xi_{in})$). Daha sonra n farklı veriden bulunan değerlerden standart sapmaları en düşük olanlar sonuç değerleri olarak belirlenir (f_i , ξ_i). Standart sapmanın en düşük olduğu serbestlik derecesindeki kayıt o moda ait sinyal-gürültü oranının en yüksek olduğu veridir. Eğer bulunan f_i , ξ_i değerleri yeterince hassas değil ise bu değerler ile akis diyagramının başına dönülerek tüm analiz tekrarlanır.

UYGULAMA

Bir önceki bölümde özetlenen yöntem San Fransisco'daki Transamerica binasının modal parametrelerini Loma Prieta depremi kayıtları ile bulunması için kullanılmıştır. Transamerica 60 katlı, piramit şekilli çelik bir yapıdır. Bu yapıya ait farklı zamanlarda yapılmış bir çok dinamik test (Stephen, 1974) sonuçları elde bulunmaktadır (Tablo.1,2,3).

Şafak ve Çelebi (1991) Loma Prieta kayıtlarını kullanarak Transamerica binasının modal frekans ve sönüm değerlerini yine ARX modeli kullanarak bulmuşlardır (Tablo.4,5). NS (Kuzey - Güney) ve EW (Doğu - Batı) doğrultularındaki modal frekans ve sönümleri bulmak için sırasıyla $n_a=30$, $n_b=10$ ve $n_a=36$, $n_b=8$ model parametrelerini kullanmışlardır.

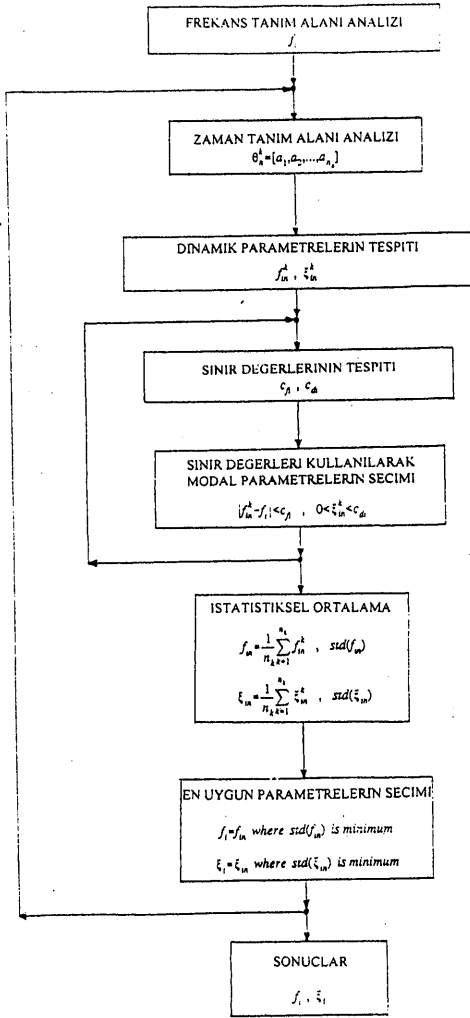
Burada Şafak ve Çelebi'nin çalışmasından farklı olarak Şekil.1 de akış diyagramı verilen ve daha önceki kısımlarda açıklanan yöntem kullanılarak farklı yönlerdeki (NS, EW, burulma) modal parametreler yüksek bir hassasiyetle hesaplanmıştır. Öncelikle her yönde tek bir model

yerine NS ve EW için 9'ar ($n_k=9$) ve burulma yönünde 15 ($n_k=15$) farklı model kullanılmıştır. Bu modellerde kullanılan n_a ve n_b değerleri 30 ila 80 arasında değişmektedir. Bu analizde kullanılan kayıtlar binanın çeşitli noktalarına yerleştirilen akselerometrelerden elde edilmiştir (Şekil.2). Tüm analizlerde u girdisi CH1 kaydı, çıktılar ise CH2,3,4,5 olarak seçilmiştir. Burulma modlarını daha hassas hesaplayabilmek için 21 kattan alınan aynı doğrultudaki iki kayıt birbirinden çıkartılarak (CH3-CH2) yatay yöndeki modun etkisi azaltılmış ve burulmalı modun etkisi (sinyal-gürültü oranı) artırılmıştır. Analiz sonucunda bulunan modal parametrelerle bunlara ait standart sapmalar Tablo.6,7,8 de verilmiştir. Özellikle ilk modlara ait standart sapmaların çok düşük olması analiz sonuçlarının hassaslığını yansıtmaya açısından önemlidir.

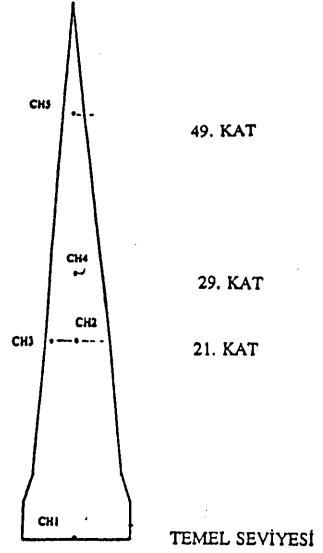
SONUÇLAR

Herhangi bir yapıdan alınan deprem kayıtları kullanılarak yapıya ait modal frekans ve sönüm değerlerinin zaman tanım alanındaki sistem tanımlaması yöntemleri kullanılarak geleneksel frekans tanım alanındaki Fourier ve davranış spektrumu gibi yöntemlere oranla çok daha hassas sonuçlar bulunabileceği gösterilmiştir. Sistem tanımlaması yöntemlerinin uygulamaları sırasında sıkça karşılaşılan modal parametreleri (n_a ve n_b) ve veri seçimi gibi zorluklar da bu çalışmada önerilen ve Şekil.1 de aksis diyagramı gösterilen yöntem kullanılarak yenilmiştir. Bu yöntemin kullanılması ile hem binaya ait olan modlar kolaylıkla tespit edilmiş hem de modal frekans ve sönüm değerleri hassas bir şekilde belirlenmiştir.

Tablo.9 ve 10'da 29'uncu katta alınan kayıtlar (CH4) kullanılarak yapılan analizde bulunan modal parametreler verilmiştir. Tablo.6,7,8 ile karşılaştırıldığında aralarında çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Bu da göstermektedir ki sistem tanımlaması yöntemlerinin kullanılması ile yapının burulmalı doğrultudaki modları sadece bir kayıttan faydalanılabilmektedir. Böylece yapı frekans ve sönüm değerlerini belirlemek için yapılacak cihazlandırmalarda sadece zemin kat ve bir ara kata deprem ölçüm cihazı yerleştirilmesi yeterli olacak ve bu da maliyeti çok yüksek olan cihazlandırma projelerini daha ucuz hale getirebilecektir. Tablo.6,7,8'de görüldüğü gibi hesaplanan modal parametrelerin çoğunluğu en üst seviyedeki kayıt kullanılarak değil de ara kattaki kayıt kullanılarak elde edilmiştir. Ara kattaki kayıta salınım genlikleri daha düşük olmasına rağmen özellikle ilk moddan sonraki modlara ait sinyal-gürültü oranları en üst kattaki kayda oranla yüksek olduğundan daha hassas değerler hesaplanabilmiştir. Bu da göstermektedir ki, yerleştirilecek ölçüm cihazı en üst kat seviyelerine değil de ara katlara yerleştirilmelidir.



Şekil 1. Sistem Tanımlaması Akış Diyagramı



Şekil 2. Transamerica Binası

Tablo.1. Transamerica zorlanmış titreşim test sonuçları

	mod 1		mod 2		mod 3		mod 4		mod 5		mod 6	
	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ
N-S	0.345	0.009	0.635	0.014			1.170	0.015	1.620	0.012	1.850	0.009
E-W	0.345	0.014	0.635	0.016			1.130	0.015	1.530	0.018	1.850	0.007
TOR					0.895	0.026			1.395	0.022		

Tablo.2. Transamerica serbest titreşim test sonuçları

	mod 1		mod 2		mod 3		mod 4		mod 5		mod 6	
	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ
N-S	0.337	0.027	0.630	0.017	0.880	0.012	1.110	0.010	1.520		1.730	
E-W	0.330	0.028	0.616	0.018	0.843	0.012	1.110	0.013	1.500		1.720	
TOR	0.447	0.023	0.814	0.016	1.060	0.011	1.270	0.009				

Tablo.3. Transamerica analitik modelleme sonuçları

	mod 1		mod 2		mod 3		mod 4		mod 5		mod 6	
	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ	f	ξ
N-S	0.326		0.631		0.960		1.230		1.630			
E-W	0.326		0.648		0.994		1.350		1.730			
TOR	0.350		0.391		0.657		0.996		1.380			

Tablo.4. NS yönündeki sistem tanımlaması analiz sonuçları (Şafak, Çelebi, 1991)

mod	f (Hz)	ξ
1	0.2910	0.0485
2	1.3557	0.0230
3	0.7495	0.0764
4	1.0845	0.0543
5	1.4283	0.0432
6	0.9651	0.0744
7	2.5291	0.0291
8	2.9692	0.0249
9	1.7340	0.0514
10	2.1616	0.0437
11	1.7177	0.0564
12	2.8599	0.0438
13	2.1359	0.0659
14	2.5077	0.0634
15	0.6432	0.2744

Tablo.6. Bu çalışmada bulunan NS yöntündeki sonuçlar

mod	kayıt	f (Hz)	std	ξ	std
1	CH5	0.2804	0.0002	0.0195	0.0010
2	CH2	0.5419	0.0008	0.0122	0.0019
3	CH2	0.8096	0.0013	0.0138	0.0018
4	CH4	0.9774	0.0015	0.0310	0.0057
5	CH4	1.3374	0.0047	0.0358	0.0034
6	CH4	1.6816	0.0026	0.0214	0.0033

Tablo.7. Bu çalışmada bulunan EW yöntündeki sonuçlar

mod	kayıt	f (Hz)	std	ξ	std
1	CH4	0.2729	0.0001	0.0129	0.0001
2	CH4	0.5153	0.0002	0.0177	0.0003
3	CH2	0.7763	0.0013	0.0247	0.0027
4	CH4	0.9647	0.0023	0.0120	0.0043
5	CH5	1.2046	0.0080	0.0381	0.0050
6	CH5	1.5389	0.0179	0.0399	0.0111

Tablo.8. Bu çalışmada bulunan burulmalı yöntündeki sonuçlar

mod	kayıt	f (Hz)	std	ξ	std
1	CH3-CH2	0.3119	0.0080	0.0774	0.0223
2	CH3-CH2	0.6120	0.0141	0.0445	0.0285
3	CH3-CH2	0.8579	0.0078	0.0447	0.0136
4	CH3-CH2	1.1072	0.0096	0.0398	0.0090

Tablo.5. EW yöntündeki sistem tanımlaması analiz sonuçları (Şafak, Çelebi, 1991)

mod	f (Hz)	ξ
1	0.2737	0.0218
2	0.5214	0.0356
3	1.1023	0.0242
4	3.1169	0.0161
5	1.5392	0.0363
6	1.2061	0.0522
7	2.5748	0.0289
8	0.8565	0.0880
9	1.9330	0.0434
10	0.6310	0.1500
11	2.0359	0.0506
12	1.7517	0.0609
13	2.7994	0.0405
14	2.7077	0.0437
15	2.2042	0.0566
16	1.3963	0.1048
17	1.2226	0.1899
18	2.5019	0.0991

Tablo.9. CH3:CH1 kayıtlarının analizi ile bulunan NS yönündeki sonuçlar

mod	f (Hz)	std	ξ	std
1	0.2814	0.0004	0.0216	0.0010
2	0.5300	0.0034	0.0148	0.0034
3	0.8092	0.0039	0.0183	0.0030
4	0.9774	0.0015	0.0310	0.0057
5	1.3374	0.0047	0.0358	0.0034
6	1.6816	0.0026	0.0214	0.0033

Tablo.10. CH3:CH1 kayıtlarının analizi ile bulunan EW yönündeki sonuçlar

mod	f (Hz)	std	ξ	std
1	0.2728	0.0001	0.0129	0.0001
2	0.5153	0.0002	0.0177	0.0003
3	0.7798	0.0010	0.0233	0.0053
4	0.9647	0.0023	0.0120	0.0043
5	1.2216	0.0110	0.0358	0.0033
6				

KAYNAKLAR

1. Çelebi, M., Şafak, E. (1991). Seismic response of Transamerica building. I: Data and preliminary analysis. J. of Struct. Eng., ASCE, Vol.117, 2389-2404.
2. Kadakal, U. (1994). A study on the application of system identification techniques in earthquake engineering. MS Thesis, Boğazici University, Istanbul.
3. Kadakal, U., Yüzügülü, Ö. (1995). A comparative study on the identification methods for the autoregressive modelling from the ambient vibration records. Soil Dyn. and Earthquake Eng. (In press).
4. Ljung, L. (1987). System identification-theory for the user. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
5. Stephen, R.M., Hollings, J.P., Bouwcamp, J.G. (1974). Dynamic behavior of a multi-story pyramid shaped building. EERC Report 73-17. University of California, Berkeley.
6. Şafak, E. (1988). Analysis of recordings in structural engineering: Adaptive filtering, prediction and control. USGS Open file report 88-647.
7. Şafak, E., Çelebi, M. (1991). Seismic response of transamerica building. II: System identification. J. of Struct. Eng., ASCE, Vol.117, 2405-2425
8. Şafak, E., Çelebi, M. (1992). Seismic response of Pasific Park Plaza. II: System identification. J. of Struct. Eng., ASCE, Vol.118, 1566-1589.