

YİRMİ KATLI ÇELİK BİR BİNA ÇERÇEVESİNİN MİGİ PARALEL İŞLEM ALGORİTMASI İLE LİNEER OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

Yunus DERE

S.Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Kampüs/KONYA

Makalenin Geliş Tarihi: 09.08.2004

ÖZET: Bu çalışmada ilgili yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmış 20 katlı çelik bir bina çerçevesinin lineer olmayan dinamik analizi paralel işlem yoluyla gerçekleştirilmiştir. Dinamik analiz için, Northridge depremi sırasında Newhall istasyonunda ölçülmüş deprem ivmesi kayıtlarının Doğu-Batı bileşeni dikkate alınmıştır. Paralel işlem yöntemi olarak MİGİ (Modified Iterative Group Implicit - Değiştirilmiş Döngülü Örtük Grup) algoritması kullanılmıştır. İkinci derece etkiler ($P-\Delta$ etkisi) yanında malzemenin lineer olmayan davranışı da dikkate alınmıştır. Bina çerçevesi bir otomatik ayrıştırıcı kullanılarak 2, 3, 4, 5 ve 6 farklı çözüm bölgelerine ayrılmış ve analizler IBM SP süper bilgisayarında ve bir SUN iş istasyonları ağında gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçların incelenmesinden, MİGİ algoritmasının doğru sonuçlar verdiği, bunun yanında, birden fazla işlemci kullanımına izin vererek analiz performansını önemli derecede artırdığı görülmektedir. Ayrıca, işlemci sayısı arttıkça analizler çok daha kısa sürede tamamlanabilmektedir.

Anahtar kelimeler: MİGİ algoritması, paralel işleme, lineer olmayan dinamik analiz.

Nonlinear Dynamic Analysis of a 20-Story Steel Building Frame with MİGİ Parallel Processing Algorithm

ABSTRACT: In this study, nonlinear dynamic analysis of a 20-story steel building frame designed following the related codes was performed through parallel processing. For the dynamic analysis, the East-West component of the Northridge-Newhall earthquake acceleration record was considered. As the parallel processing algorithm, the Modified Iterative Group Implicit (MİGİ) Algorithm was adopted. Along with the second-order effects ($P-\Delta$), the nonlinear behavior of the material was considered. The building frame was decomposed into 2, 3, 4, 5 and 6 different domains using an automatic decomposer. The analyses are carried out on both an IBM SP supercomputer and a network of SUN workstations. As it is seen from the numerical results, MİGİ algorithm produces correct results, and, increases the analysis performance significantly by allowing the use of multiple processors. Furthermore, analyses can be completed in a shorter time as the number of processors increases.

Key words: MİGİ algorithm, parallel processing, nonlinear dynamic analysis.

GİRİŞ

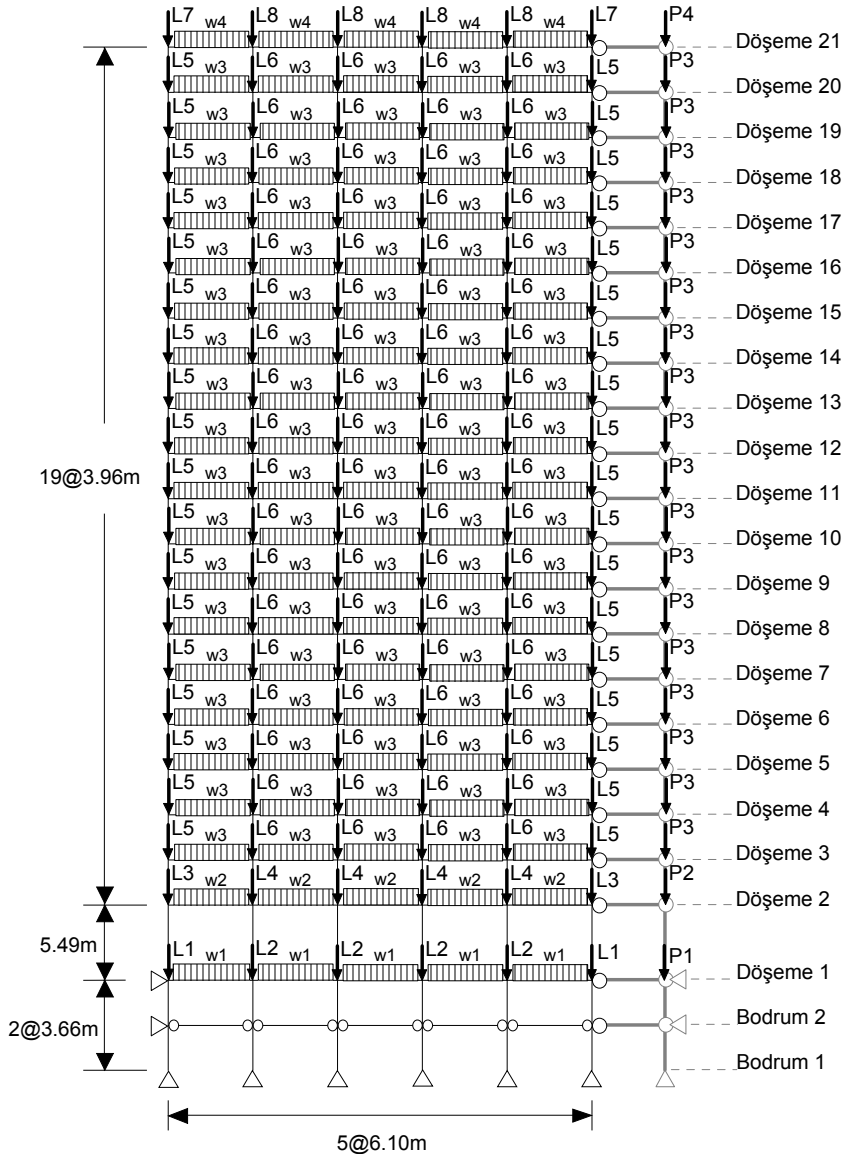
Yapıların deprem gibi dinamik yükler altında, lineer olmayan geometri ve malzeme kabulü ile gerçek davranışının anlaşılabilmesi, yapı elemanlarının tasarım ilkelerinin belirlenmesinde ve çeşitli yer hareketi kayıtlarını dikkate alarak yapılan analizler sonucu elde edilen davranış spektrumunun türetilmesinde

oldukça önemlidir. Lineer olmayan analizler, çözüm sırasında yapının rijitlik matrisinin sık sık güncellenmesini gerektirir. Ayrıca, hareket denklemlerinin örtük (implicit) bir yöntemle integrasyonu, her bir analiz döngüsünde dinamik denge denklem takımının çözümünü gerektirmektedir. Bu yüzden, yapı dinamiği problemlerinin lineer olmayan çözümünü bilgisayarda oldukça uzun süre almaktadır.

Paralel işleme sayesinde bu tip problemlerin çözümü için gerekli süre önemli ölçüde kısalmaktadır. Yapı çerçevelerinin paralel işleme kullanılarak analizi hakkında çeşitli araştırmalar mevcuttur (Hajjar (1987), Hajjar ve Abel (1988) ve Chen (2002)). Bu çalışmada, yapının fiziksel olarak çeşitli çözüm bölgelerine ayrılması prensibine dayalı bir paralel çözüm yöntemi olan MIGI (Modified Iterative Group Implicit - Değiştirilmiş Döngülü Örtük Grup) algoritması (Dere, 2002) kullanılmıştır.

Çalışmanın amacı, gerçek boyutlarda ve yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmış bir

çelik bina çerçevesinin lineer olmayan dinamik analizini paralel işleme ile gerçekleştirerek, MIGI algoritmasına dayalı paralel işlemenin, analizin performansını artırıcı etkisini göstermektir. Analizi gerçekleştirilen 20 katlı çelik bina çerçevesi, Amerika'nın Los Angeles şehrinde SAC¹'in görevlendirmiş olduğu bir firma tarafından yerel yönetmeliklere (UBC'94) uygun olarak tasarlanmıştır. Şekil 1'de kullanılan çerçeve modeli ve binanın diğer yarısından aktarılan P-Δ yüklerini dikkate almak için oluşturulmuş virtüel kafes çerçeve gösterilmiştir.



Şekil 1. 20 katlı, beş açıklıklı çelik bina çerçevesi.

Figure 1. The steel building frame with five bays and 20 stories.

¹ SAC; SEAOC, ATC ve CUREE'nin bir ortak girişimidir ve çelik binaların tasarım, onarımı, güçlendirilmesi vb. için güvenilir, uygulanabilir ve uygun maliyetli kılavuzların ve standartların geliştirilmesi amaçlarıyla 1994 yılında oluşturulmuştur.

MIGI ALGORİTMASI

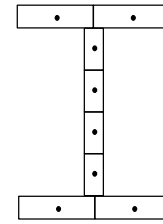
Modified Iterative Group Implicit (Değiştirilmiş Döngülü Örtük Grup) algoritması yapıların lineer ve lineer olmayan analizi için Dere(2002) tarafından geliştirilmiş bir paralel işleme algoritmasıdır. Bu bölümde MIGI algoritması özet olarak anlatılacaktır.

Bir sistemin MIGI algoritması ile analizinde, sonlu eleman modeli öncelikle çözüm bölgeleri denilen eleman gruplarına ayrılır. Her bir çözüm bölgesi ayrı bir işlemci tarafından ele alınır. Newmark metodu (Newmark, 1959) gibi bir örtük metot yardımıyla, belirli bir zaman adımına ait dinamik denge denklemleri çözümlenerek çözüm bölgesine ait deplasman, hız ve ivme değerleri elde edilir (Bathe, 1996). Bu çözüm sırasında çözüm bölgelerinin deplasman yapmalarına engel olunmaz. Böylece çözüm bölgelerinin ortak düğüm noktalarında arayüz serbestlik derecelerine ait birden fazla çözüm elde edilir. Dolayısıyla arayüzde süreklilik yoktur, ancak denge sağlanmıştır. Arayüzde hem denge hem de sürekliliğin sağlanması için arayüz döngülerine gerek vardır. Bir arayüz serbestlik derecesinde elde edilen birden fazla çözümün, arayüzde biraraya gelen çözüm bölgeleri arasında ortalaması alınarak (bu sırada işlemciler arası iletişim gerekecektir) tek bir çözüm elde edilir ve böylece süreklilik sağlanır. Ancak bu işlem, arayüze gerçekte varolmayan 'artık' kuvvetler uygulamak anlamına gelir ve arayüzde kuvvet dengesi bozulmuştur. Dengenin tekrar sağlanması için bu artık kuvvetler, Cross (Moment Dağıtma) metoduna benzer bir şekilde, çözüm bölgelerinin arayüzlerine, indirgenmiş rijitlik matrisleri yardımıyla, serbestlik derecelerinin rijitlikleri oranında dağıtılır. Böylece arayüzde denge yeniden sağlanmıştır. Daha sonra arayüzdeki deplasman sürekliliği tekrar kontrol edilir. Süreklilik de sağlanmışsa arayüzde elde edilen sonuçlar kullanılarak içsel serbestlik derecelerine ait çözüm elde edilir. Sağlanmamış ise yukarıda anlatılan şekilde tekrar süreklilik ve denge döngüsü tekrarlanır. Sistemde geometri veya malzemeden doğan lineer olmayan davranıştan ötürü rijitlik değişiyorsa sistemin iç-dış kuvvet dengesinin sağlanıp sağlanmadığı da kontrol edilmelidir. Eğer sağlanmış ise elemanlarda

denge güncellenir, sağlanmamış ise rijitlik matrisi güncellenerek çözüm en baştan tekrarlanır ve böylece bir lineer olmayan döngü tamamlanmış olur.

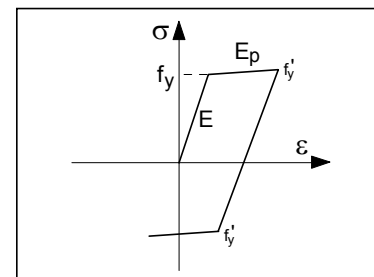
PROBLEME AİT VERİLER

Problemin sonlu eleman analizinde Rajagopala (1996) tarafından geliştirilmiş olan tamamıyla lineer olmayan bir kiriş-kolon elemanı kullanılmıştır. Bu eleman tipi, deplasman tabanlıdır ve liflerden meydana gelmektedir. Plastik davranış, Gauss integrasyon noktalarına yerleştirilmiş kesitler yoluyla eleman boyunca yayılmıştır. Bu çalışmada, kiriş ve kolon birleşim noktalarında muhtemel plastik mafsall oluşumunu yakalamak için, herbir kiriş-kolon elemanının üç sonlu elemandan oluştuğu varsayılmıştır. Analizde kullanılan kesitler Şekil 2'de görüldüğü gibi liflere ayrılmıştır.



Şekil 2. Bir I kesitinin kiriş-kolon elemanında kullanılmak üzere liflere ayrılması.
Figure 2. Dividing an I-beam into fibers to be used in the beam-column element.

Malzemenin lineer olmayan davranışı, $E=20.41 \times 10^6$ t/m², $E_p = 10^3$ t/m², $f_{y-kiriş} = 25.33 \times 10^3$ t/m² ve $f_{y-kolon} = 35.19 \times 10^3$ t/m² değerleri kullanılarak bir izotropik pekleşme modeli yardımıyla modellenmiştir (Şekil 3.). Çerçeve kiriş ve kolonlarına ait kesit özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir.



Şekil 3. İzotropik pekleşme modeli.
Figure 3. Isotropic hardening model.

Çizelge 1. 20 katlı çerçevenin eleman kesit özellikleri (Gupta ve Krawinkler, 1999).

Table 1. Cross-sectional properties of the 20-story building frame (Gupta and Krawinkler, 1999).

Kat/ Döşeme	Dış kolonlar	İç kolonlar	Kirişler
-2/-1	15x15x2.0	W24x335	
-1/1	15x15x2.0	W24x335	W30x99
1/2	15x15x2.0	W24x335	W30x99
2/3	15x15x1.25	W24x335	W30x99
3/4	15x15x1.25	W24x335	W30x99
4/5	15x15x1.25	W24x335	W30x99
5/6	15x15x1.00	W24x229	W30x108
6/7	15x15x1.00	W24x229	W30x108
7/8	15x15x1.00	W24x229	W30x108
8/9	15x15x1.00	W24x229	W30x108
9/10	15x15x1.00	W24x229	W30x108
10/11	15x15x1.00	W24x229	W30x108
11/12	15x15x1.00	W24x192	W30x99
12/13	15x15x1.00	W24x192	W30x99
13/14	15x15x1.00	W24x192	W30x99
14/15	15x15x0.75	W24x131	W30x99
15/16	15x15x0.75	W24x131	W30x99
16/17	15x15x0.75	W24x131	W30x99
17/18	15x15x0.75	W24x117	W27x84
18/19	15x15x0.75	W24x117	W27x84
19/20	15x15x0.50	W24x84	W24x62
20/21	15x15x0.50	W24x84	W21x50

"1.0×Ölü yük+1.0×Hareketli Yük" kombinasyonundan elde edilmiş kiriş ve kolon yükleri Çizelge 2'de verilmiştir. P-Δ yükleri, moment taşıyan çerçeveye yapının yarısından gelen ilave yüklerdir. Çizelge 3'de çerçeveye tesir eden döşeme kütleleri listelenmiştir. Bu kütleler kat hizalarına kiriş-kolon düğümlerinde yoğunlaştırılarak dağıtılmışlardır.

Yoğunlaştırılmış kütle matrisi yaklaşımı hesapları önemli derecede kısaltmaktadır. Birinci ve üçüncü titreşim modları için %2 sönümleme olduğu varsayımı ile Rayleigh sönümleme modeli kullanılmıştır. Dinamik analiz için Northridge depremi sırasında Newhall istasyonunda ölçülmüş deprem ivmesi kayıtlarının Doğu-Batı bileşeni dikkate alınmıştır.

Çizelge 2. Çerçeveye etkiyen kuvvetler (Gupta ve Krawinkler, 1999).

Table 2. Forces acting over the frame (Gupta and Krawinkler, 1999).

Yayıllı yükler (t/m)	Tekil yükler (t)	P-Δ yükleri (t)
w1=1.34	L1=7.35	P1=250.15
w2=1.58	L2=10.53	P2=256.96
w3=1.49	L3=8.54	P3=254.24
w4=1.27	L4=10.53	P4=248.34
	L5=8.08	
	L6=10.53	
	L7=6.86	
	L8=9.35	

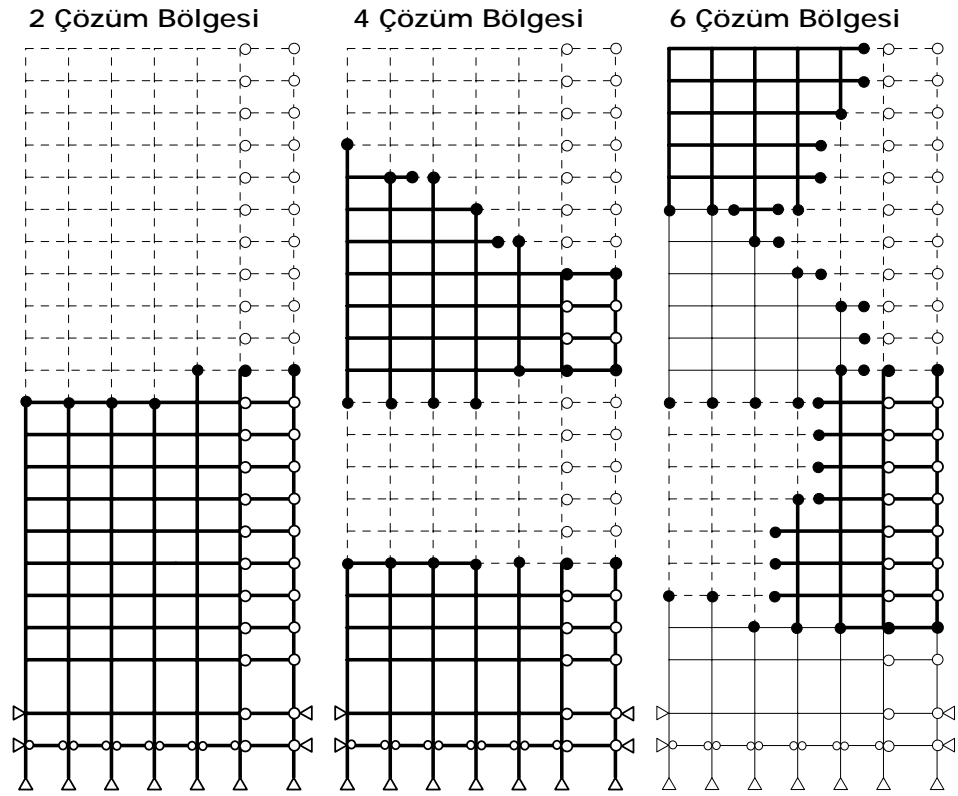
Çizelge 3. Katlara göre kütle dağılımı (Gupta ve Krawinkler, 1999).

Table 3. Floor mass distribution (Gupta and Krawinkler, 1999).

Konum	Kütle (t-sec ² /m)
Döşeme 21 (Çatı)	29.79
Döşeme 20'den Döşeme 3'e kadar	28.15
Döşeme 2	28.75
Döşeme 1	27.11

MIGI ALGORİTMASIYLA YAPILAN ANALİZLER VE SAYISAL SONUÇLAR

Yapıya ait sonlu eleman modeli, otomatik bir çözüm bölgesi ayrıştırıcısı olan MPE++ (Hsieh ve diğerleri, 1998), yardımıyla 2, 3, 4, 5 ve 6 çözüm bölgesine ayrılmıştır. Şekil 4'de, 2, 4 ve 6 çözüm bölgesine ayırma sonuçları gösterilmiştir. Çizelge 4'de ise elde edilen çözüm bölgelerine ait serbestlik derecesi (SD) sayısı, düğüm sayısı, eleman sayısı vb. bilgiler yer almaktadır. Çizelgede N, işlemci sayısını, n ise çözüm bölgesi numarasını göstermektedir. Mevcut haliyle MPE++, eleman tipleri arasındaki farklılığı dikkate almamaktadır ve bu yüzden ayırma sırasında sadece eleman sayıları dikkate alınmıştır. Bir lifli kiriş-kolon elemanı için gerekli hesap zamanı, bir kafes elemanından çok daha fazladır. Bu yüzden işlemciler arasındaki iş yükü dengesi etkin bir şekilde sağlanamamıştır. İş yükü dengesizliğinin diğer ana sebepleri arasında, çözüm bölgelerinin sahip oldukları arayüz SD sayısındaki ve aktif (bağlanmamış) iç SD sayısındaki farklılık sayılabilir.



Şekil 4. 20 katlı çerçevenin 2, 4 ve 6 çözüm bölgesine ayrılması.

Figure 4. Decomposition of the 20 story building frame into 2, 4 and 6 subdomains.

Çizelge 4. 20 katlı çerçeve analizi için çözüm bölgeleri konfigürasyonu.

Table 4. Subdomain configuration of the 20 story building frame.

N	n	Toplam SD	Arayüz SD	İçsel SD	Toplam Düğüm Sayısı	İçsel Düğüm Sayısı	Arayüz Düğüm Sayısı	Toplam Eleman Sayısı	Kiriş-kolon Elemanları Sayısı	Kafes Elemanları Sayısı
2	1	380	20	360	137	130	7	195	167	28
	2	397	20	377	136	129	7	196	175	21
3	1	255	20	235	94	87	7	131	111	20
	2	271	40	231	93	79	14	130	115	15
	3	271	20	251	93	86	7	130	116	14
4	1	191	171	20	72	65	7	98	82	16
	2	209	169	40	72	58	14	98	86	12
	3	218	172	46	74	58	16	98	91	7
	4	205	179	26	71	62	9	97	83	14
5	1	178	136	42	62	48	14	79	76	3
	2	154	116	38	58	45	13	78	58	20
	3	178	138	40	61	47	14	78	70	8
	4	183	144	39	61	48	13	78	78	0
	5	164	123	41	58	44	14	78	60	18
6	1	130	110	20	51	44	7	66	54	12
	2	153	108	45	51	36	15	65	65	0
	3	141	98	43	50	35	15	65	49	16
	4	156	108	48	52	36	16	65	65	0
	5	139	92	47	50	34	16	65	44	21
	6	156	123	33	52	41	11	65	65	0

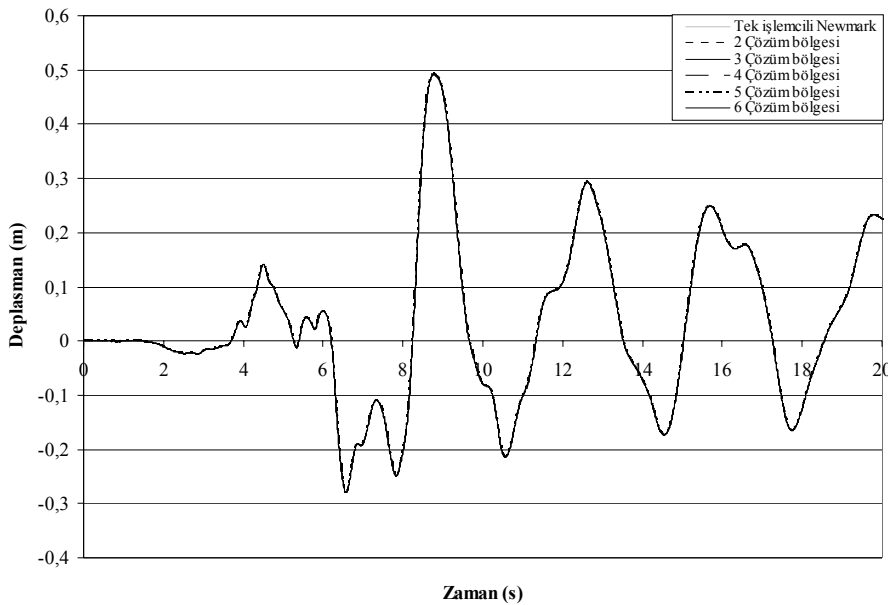
Arayüz ve içsel döngülerde yaklaşıklık oranı için 10^{-3} değeri yeterli bulunmuştur. Lineer olmayan dinamik analizler, ivme kaydının ilk 20 saniyesi için ve 0.01 saniyelik bir zaman adımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu zaman adımı ile doğru sonuçların elde edilip edilmediği kontrol edilmiştir. MIGI algoritması çözüm performansının, bir süper bilgisayarda ve dağıtılmış bir paralel ortamda göstereceği farklılıkları gözlemlemek amacıyla, analizler bir IBM SP süper bilgisayarında ve SUN iş istasyonları ağında ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Analizlerden elde edilen deplasman, hız ve ivme değerlerinin zamana bağlı değişimleri karşılaştırma amacıyla Şekil 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, MIGI algoritması ile yapılan analizden elde edilen sonuçlar ile tek işlemcide ve aynı zaman adımı ile yapılan Newmark yöntemi analizinden elde edilenler hemen hemen aynıdır. Üç ve daha fazla çözüm bölgeleri için ortalama hata değeri yaklaşık % 0.6 olarak hesaplanmıştır. İki çözüm bölgesi durumunda ise MIGI algoritması ile "kesin" sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 5'de farklı çözüm bölgeleri için döngü sayıları özetlenmiştir. Tüm durumlarda, toplam lineer olmayan döngü sayısı hemen hemen aynı olmaktadır, ancak, çözüm bölgesi sayısı arttıkça arayüz döngü sayısı da artmaktadır. Çizelge 6'da toplam analiz

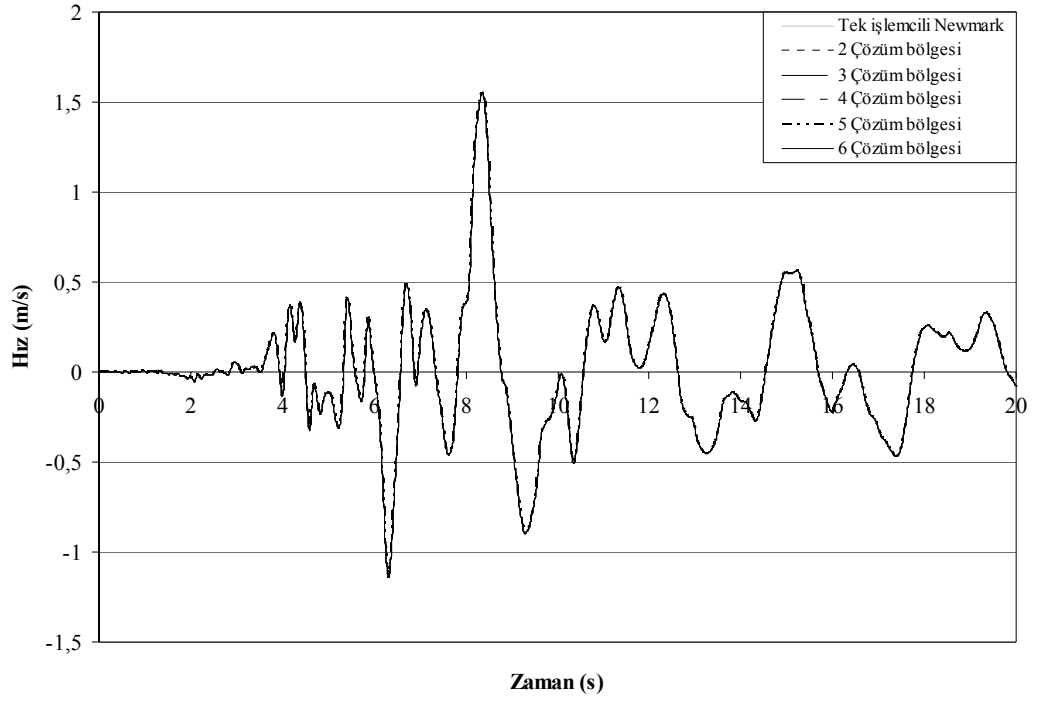
sürelerine ait sonuçlar hem IBM SP hem de SUN İİA (İş istasyonları ağı) için verilmektedir. İİA ortamı ile, çözüm bölgesi sayısı 3 ve 5 olduğunda biraz daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi, daha düşük bir (iletişim süresi)/(toplam süre) oranına sahip olmalarıdır. Aynı sebepten ötürü, çözüm bölgesi sayısı 6 olduğunda, IBM SP nin performansı İİA'dan daha yüksek olmaktadır. Tüm analiz ortamları durumunda, çözüm bölgesi sayısı (işlemci sayısı) arttıkça etkinlik azalmaktadır. Bunun sebebi ise, arayüz döngüleri sayısının ve/veya arayüz iletişiminin artmasıdır.

Şekil 8'de işlemci sayısına göre elde edilen hız artışları verilmiştir. Lineer hız artışı çizgisi referans olması amacıyla gösterilmiştir ve %100 etkinliği temsil etmektedir. Önceden belirtildiği gibi virtüel kafes çerçeve, işlemciler arası iş yükü dengesizliğine sebep olmaktadır. Bu etkiyi ölçmek için, aynı çerçeve, virtüel kafes çerçeve ilave edilmeksizin ($P-\Delta$ ihmal edilerek) analiz edilmiş ve elde edilen hız artışı oranları Şekil 8'de verilmiştir. 4 ve daha fazla işlemci durumunda, $P-\Delta$ etkisinin dikkate alınmadığı durumdan elde edilen hız artışı değerlerinin, gözönüne alındıkları durumdan elde edilenlerden daha yüksek oldukları görülmüştür. Şekilden de görüldüğü gibi, tüm çözüm bölgesi sayıları/işlemci sayıları için çok önemli derecede hız artışları elde edilmiştir.

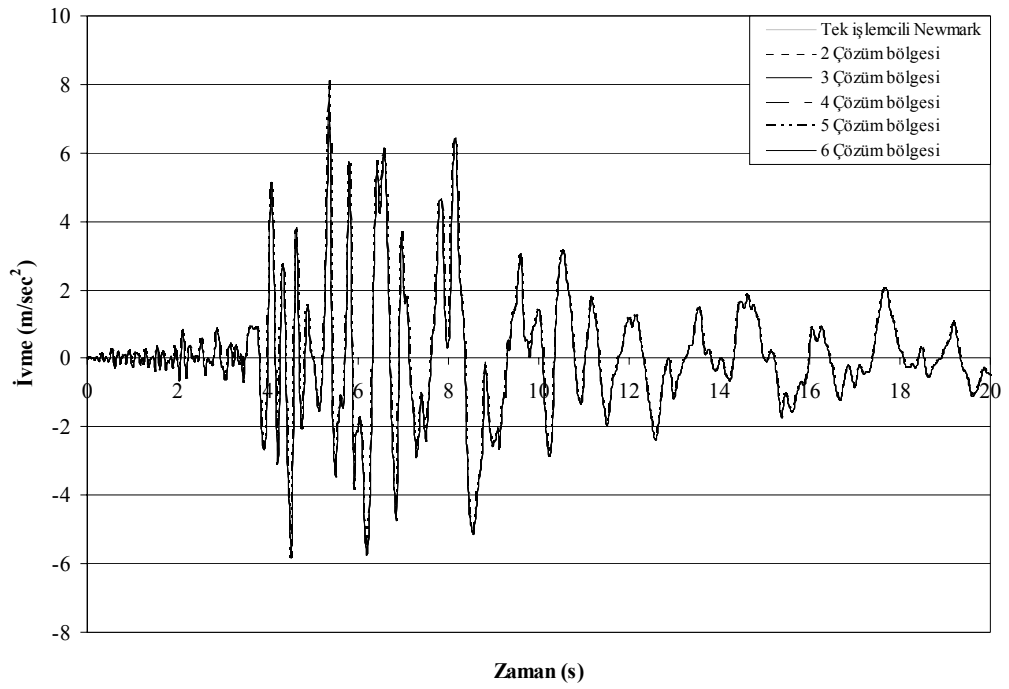


Şekil 5. Çatı orta noktasının yatay deplasmanı.

Figure 5. Horizontal displacement of the middle roof node.



Şekil 6. Çatı orta noktasının yatay hızı.
Figure 6. Horizontal velocity of the middle roof node.



Şekil 7. Çatı orta noktasının yatay ivmesi.
Figure 7. Horizontal acceleration of the middle roof node.

Çizelge 5. Farklı işlemci sayıları kullanımına bağlı döngü sayıları.

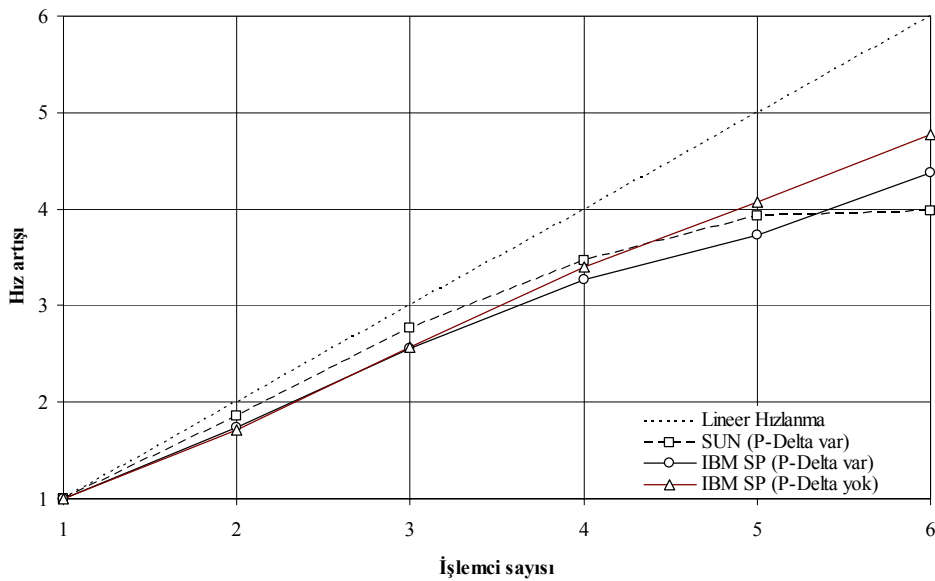
Table 5. Number of iterations for different number of processors.

İşlemci sayısı	Lineer olmayan döngü başına arayüz döngüsü sayısı	Arayüz döngüsü sayısı	Lineer olmayan döngü sayısı
1	-	-	4323
2	1.00	4321	4321
3	1.16	4992	4321
4	1.80	7757	4312
5	4.77	20591	4315
6	6.31	27194	4307

Çizelge 6. Toplam analiz süresi, hız artışı ve etkinlik değerleri.

Table 6. Total analysis times, speed-up and efficiency values.

İşlemci sayısı	Toplam analiz süresi (saniye)		Hız artışı oranı		Etkinlik (%)	
	IBM SP	SUN İİA	IBM SP	SUN İİA	IBM SP	SUN İİA
1	15031	19038	1.00	1.00	100	100
2	8625	10242	1.74	1.86	87	93
3	5870	6890	2.56	2.76	85	92
4	4589	5490	3.28	3.47	82	87
5	4026	4848	3.73	3.93	75	79
6	3434	4775	4.38	3.99	73	66

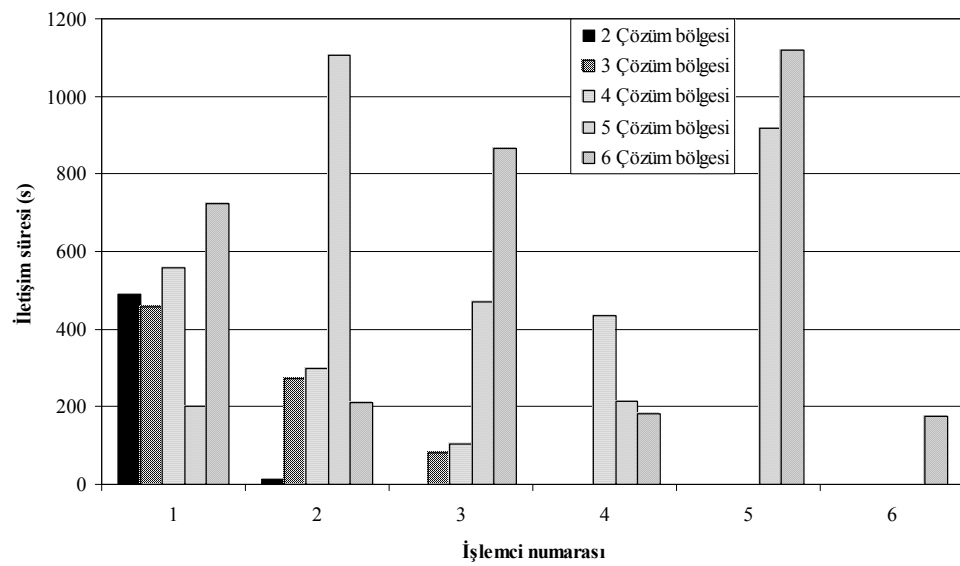


Şekil 8. Analizler sonucu elde edilen hız artışı grafiği.

Figure 8. Speed-up graph obtained from analyses.

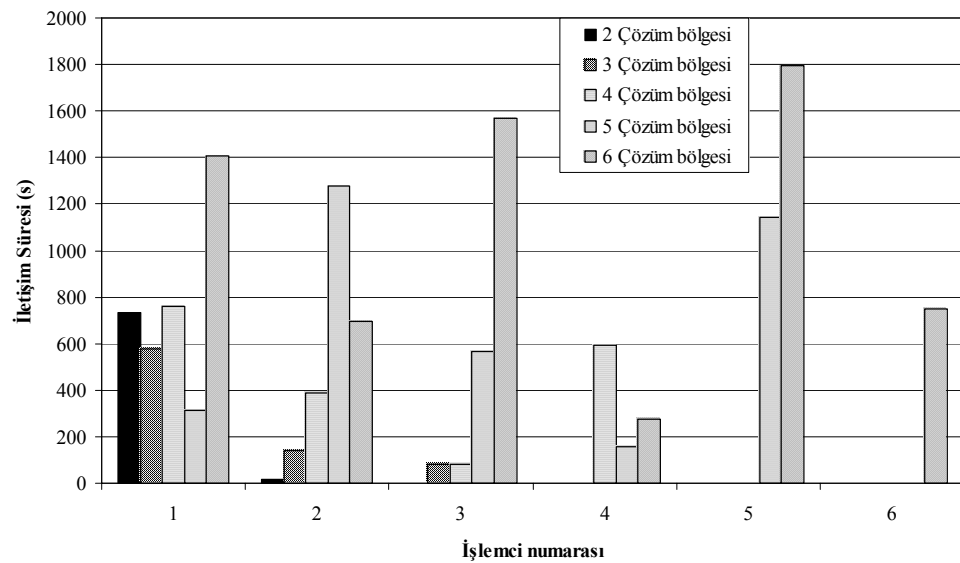
IBM SP ve SUN İİA için ölçülen iletişim süreleri Şekil 9 ve 10'da gösterilmektedir. Burada iletişim süresi, bir mesajın gönderilmesi ve alınması arasında geçen süre olarak tanımlanmıştır. Bu süre bir işlemcinin cevap mesajı beklerken boş geçen süreyi de içermektedir. Şekillerde, işlemciler arası iletişim sürelerindeki farklılık, hesap iş yüklerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Bir işlemci hesabı tamamladığı ve hala başka bir işlemci ile

iletişim kurmak istediğinde, sözkonusu işlemci veya işlemciler kendi hesaplarını henüz tamamlamamış olabilirler. Bu yüzden, mesajın alınmasında bir gecikme olacaktır. Bu gecikme, hesaplanan iletişim süresinin içinde yer almaktadır. Genel olarak, yüksek iletişim süreleri olan işlemciler (Şekil 9 ve 10) aynı çözüm bölgesindeki diğer işlemcilerden daha az hesap iş yüküne sahiptirler.



Şekil 9. Herbir işlemcide ölçülmüş iletişim süreleri (IBM SP).

Figure 9. Communication times measured in each processor (IBM SP).



Şekil 10. Herbir işlemcide ölçülmüş iletişim süreleri (SUN İİA).

Figure 10. Communication times measured in each processor (SUN NOW).

SONUÇLAR

Bu çalışmada gerçek boyutlarda ve yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmış 20 katlı ve 5 açıklıklı çelik bir bina çerçevesinin lineer olmayan dinamik analizi, MIGI algoritması yardımıyla paralel işleme yoluyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada analiz ortamı olarak IBM SP ve SUN İş İstasyonları Ağı seçilmiş, ve analizler bina çerçevesinin 2, 3, 4, 5 ve 6 fiziksel çözüm bölgesine bölünmesi ile gerçekleştirilmiştir. Performansın belirlenebilmesi için, aynı yapı tek işlemci

kullanılarak da aynı yapı analiz edilmiştir. MIGI algoritmasının birden çok işlemci ile paralel olarak elde ettiği sonuçların, tek işlemci ve Newmark örtük metodu ile elde edilenlerle hemen hemen aynı olduğu, sayısal sonuçların incelenmesinden görülmüştür. MIGI algoritmasının doğru sonuçlar vermesinin yanında birden fazla işlemci kullanımına izin vermesi performansı önemli derecede artırmaktadır. Böylece işlemci sayısına bağlı olarak, analiz çok daha kısa bir sürede tamamlanabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Bathe, K.-J. (1996), *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Chen, H.-M. (2002), *Distributed Object-oriented Nonlinear Finite Element Analysis*, Doktora tezi, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Dere (2002), "A parallel solution algorithm for nonlinear structural dynamics problems", Doktora tezi, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Gupta, A. ve Krawinkler, H. (1999), "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures", SAC Task 5.4.3, Report No. 132, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Dept. of Civil and Env. Eng., Stanford University, USA.
- Hajjar, J. F. (1987), *Parallel Processing for Transient Nonlinear Structural Dynamics of Three-dimensional Framed Structures*, Doktora tezi, Cornell University, Ithaca, New York, USA.
- Hajjar, J. F. and Abel J. F. (1988), "Parallel processing for transient nonlinear structural dynamics of three-dimensional framed structures using domain decomposition", *Computers & Structures*, **30**, 1237-1254.
- Hsieh, S. H., Yang, Y. S., Cheng W. C., Lu, M. D. ve Sotelino E. D. (1998), "MPE++: An object-oriented mesh partitioning environment in C++", *Proc. of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Taipei, Taiwan, January 14-16, 313-318.
- Newmark, N. M. (1959), "A method of computation for structural mechanics", *Journal of Eng. Mechanics*, ASCE, **85**(EM3), 67-94.
- Rajagopala, M. G. (1996), "Object-Oriented Parallel Second-Order Inelastic Analysis of Frames", Doktora tezi, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- UBC (1994), "Structural engineering design provisions", *Uniform Building Code*, Vol. 2, International Conference of Building Officials.