



Benzeşik Dinamik Deney Tekniğinde Kullanılan İki Farklı İntegrasyon Tekniğinin Deneysel ve Sayısal Çalışmalar ile İrdelenmesi

Examination of Two Distinct Integration Techniques Used in Pseudo-Dynamic Test Method by Means of Experimental and Numerical Studies

Hasan Özkaynak^{1*}, Ali Kuvay Güney², Ercan Yüksel³

¹ Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Ank Bau GmbH, Kassel, Almanya

³ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: hasanozkaynak@beykent.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 23.06.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 19.10.2021

Atıf şekli/ How to cite: ÖZKAYNAK, H., GÜNEY, A.K., YÜKSEL, E. (2022). Benzeşik Dinamik Deney Tekniğinde Kullanılan İki Farklı İntegrasyon Tekniğinin Deneysel ve Sayısal Çalışmalar ile İrdelenmesi. DEUFMD, 24(71), 509-527.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247116

Öz

Yapı sistemlerinin ve yapı elemanlarının deprem etkisindeki davranışlarının belirlenmesinde, deneysel yöntemler çok önemlidir. Yapısal davranış; öngörülen bir yerdeğiştirme protokolü etkisinde gerçekleştirilen statik karakterli deneyler ile ivme kayıtlarının kullanılabilirdiği gerçek zamandaki sarsma masası deneyleri ile ya da analitik çözümlerin etkileşimli olarak gerçekleştirildiği statik karakterli benzeşik dinamik deneyler ile belirlenebilmektedir. Benzeşik dinamik deneyde, numuneden ölçülen reaksiyon kuvvetleri (rijitlik matrisi) dinamik denge denkleminin çözümünde ve bir sonraki deney adımında numuneye etkitilecek hedef yerdeğiştirme vektörünün hesabında kullanılmaktadır. Benzeşik dinamik deney tekniğinde, analitik ve deneysel bölümlerin doğru etkileşimi deneyin başarısı üzerinde çok etkilidir. Deneyin başarısı için; kullanılan ölçüm cihazlarının hassasiyeti yanında dinamik denge denkleminin çözümünde kullanılacak sayısal integrasyon yönteminin kararlılığı da büyük önem taşımaktadır. Sayısal hesapta kararlılık sağlanabilmesi için, integrasyon için seçilen hesap adım aralığının yeterli düzeyde küçük olması gerekmektedir. Bu çalışmada, benzeşik dinamik deney metodunda sayısal integrasyon aracı olarak kullanılan merkezi farklar yöntemi (CDM) ile lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı yöntemi (Li-OSM) sayısal ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar; davranış modelinden bağımsız olarak, deprem kaydı adım aralığının yarısı kadar seçilen hesap adım aralığı durumunda, Li-OSM yönteminin CDM yöntemine göre daha kararlı sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Deneysel çalışmalardan; CDM yönteminde "dörtte birlik" hesap adım aralığı ile çalışmak yerine, Li-OSM yönteminde "yarım" hesap adım aralığının kullanımı durumunda, toplam deney süresinin yarıya düşeceği ve deneyin kararlılığının artacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Benzeşik dinamik deney tekniği, Merkezi farklar yöntemi, Lineer ivme yöntemi tabanlı kuvvet ayırımı metodu, Dinamik denge denklemi, Sayısal integrasyon

Abstract

Experimental techniques are of great importance in determination of earthquake behavior of structures and structural members. Structural behavior could be determined by means of quasi-static tests in which prescribed displacement protocols are applied, by real time shake table tests realized with real acceleration records or by pseudo-dynamic tests in which experimental and numerical simulation efforts work together. In pseudo-dynamic test, the reactional forces measured from test specimen (stiffness matrix) are utilized for the numerical solution of dynamic equilibrium equation and for the determination of target displacement vector to be applied to test specimen in the next step. In pseudo-dynamic test method, the through interaction of the analytical and experimental parts is very effective on the success. For the success of the test; in addition to the sensitivity of the measuring devices used, the stability of the numerical integration technique to be used in the solution of the dynamic equilibrium equation is also of great importance. In order to ensure the stability of the numerical integration, the selected time interval should be small enough. In this study, the central difference method (CDM) and linear acceleration-based force separation method (Li-OSM) used as a numerical integration tool in pseudo-dynamic test method are compared with numerical and experimental studies. The performed numerical studies; regardless of the constitutive model used, showed that Li-OSM method produces more stable results than CDM method in the case of the integration step interval selected up to half of the earthquake record interval. From the experimental studies; instead of using "quarter" integration step interval in CDM method, it was concluded that in case of using "half" integration step interval in Li-OSM method, the total testing time will decrease by half and the stability of the test will increase.

Keywords: Pseudo-dynamic test method, Central difference method, Linear acceleration-based operator splitting method, Dynamic equilibrium equation, Numerical integration

1. Giriş

Benzeşik dinamik deney tekniği; yapı sistemlerinin veya yapı elemanlarının deprem etkisindeki davranışlarının belirlenmesi amacıyla geliştirilen ve deney numunesine yavaşlatılmış olarak uygulanan yarı-dinamik bir deney yöntemidir. Yöntem, deprem etkisindeki yapı sistemlerinin rijitlik ve dayanım kayıplarının belirlenmesinde ve daha gerçekçi davranış modellerinin oluşturulabilmesi amacıyla Hakuno ve ark tarafından 1969 yılında önerilmiştir [1]. Bilgisayar olanaklarının ve servo-kontrol sistemlerinin gelişmesiyle birlikte benzeşik dinamik deney tekniği, sarsma masası deney yöntemine karşı etkili ve güçlü bir alternatif olmuştur [2]. Yöntem, statik karakterli elektronik ölçüm aletlerinin kullanılmasına imkân sağladığı için araştırmacılar tarafından yapısal davranışın belirlenmesinde kullanılmaktadır [3-5].

Paguet ve Bruneau, tek katlı yığma yapıları zayıf döşeme-kuvvetli duvar etkileşimini irdelemek üzere benzeşik dinamik deney metodunu kullanarak test etmiştir [6]. Nakajima ve ark [7] düşey deprem yüklerinin sismik izolatörlerin yatay deprem etkisindeki davranışına etkisini belirlemek amacıyla

benzeşik dinamik deney tekniği kullanmıştır. Pinto ve ark [8] mevcut bir köprünün büyük ölçekli modelini benzeşik deney tekniği kapsamında ELSA Laboratuvarında alt sistem yaklaşımı kullanarak test etmiştir. Köprü ayaklarının performansı, her deprem durumu için rölatif yerdeğiştirme, süneklik, enerji tüketimi ve hasar büyüklüğü ve yayılımı açısından değerlendirilmiştir.

Benzeşik dinamik deney yönteminde; dinamik denge denkleminin sayısal çözümü ile hesaplanan yerdeğiştirme büyüklüğü deney numunesine tatbik edilmektedir. Deneysel ve sayısal işlemlerin etkileşimli olarak birlikte ilerlediği yöntemin genel başarısı, kullanılan ölçüm aletlerinin hassasiyetine ve tercih edilen sayısal integrasyon tekniğinin hesap adım aralığına doğrudan bağlıdır. Deney sonuçlarının kararlılığı, sayısal integrasyon işleminde ardışık adımlar arasında öngörülen hesap zaman aralığının küçük seçilmesi ile artmaktadır. Buna karşın, deneyin makul sürede tamamlanabilmesi için hesap zaman aralığının büyük tutulması da istenmektedir. Özetle, sayısal integrasyon tekniği uygulanırken seçilen hesap zaman aralığının büyüklüğü; deneyin kararlılığı, sonuçların doğruluğu ve deney süresinin uzunluğunu doğrudan etkilemektedir.

Deneyin optimum sürede tamamlanmasını sağlayacak hesap zaman aralığında en kararlı sonucu veren sayısal integrasyon yönteminin belirlenmesi önemlidir.

Literatürde benzeşik dinamik deney yöntemi ve uygulamaları üzerine kapsamlı çalışmalar olmasına karşın, farklı sayısal integrasyon tekniklerinin başarılarının sayısal ve/veya deneysel yöntemler ile araştırıldığı çalışmalar sınırlıdır. Mevcut çalışmalar; çok serbestlik dereceli görelî rijit numunelerde ölçülen reaksiyon kuvvetlerinde dalgalanma olması, deneysel sonuçlar üzerinde ileri titreşim modlarının etkileri ve sayısal integrasyon ile hesaplanan yerdeğiştirme hedefinin deney numunesine tam tatbik edilemeyişi konuları üzerine yoğunlaşmıştır. Benzeşik deney tekniğinin ürettiği sonuçların güvenilirliği üzerinde etkili olabilecek değişkenler ve deneysel hataların birikimi konuları çalışılmıştır, [9-11]. Seçilen integrasyon yönteminin deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin tartışıldığı çalışmalar da mevcuttur, [13-14]. Kabayama ve ark [15] dört adet betonarme kolonu benzeşik dinamik deney tekniği ile test etmiş ve elde ettikleri sonuçları sarsma masası deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Sayısal integrasyon yöntemi olarak kuvvet ayırımı yöntemi seçilmiştir. Sarsma masası deneyleri ile yapılan karşılaştırmalar; yapısal davranışın, benzeşik dinamik deneyde öngörülen eşdeğer sönüm oranına büyük ölçüde bağımlı olduğunu göstermiştir. Gerçekçi bir yapısal davranışın elde edilebilmesi için, değişken eşdeğer sönüm matrisi kullanımı önerilmiştir. Yüksel ve ark [19, 20] ölçekli betonarme çerçeveler ve kolon elemanlar üzerinde, merkezi farklar yönteminin (CDM) kullanıldığı benzeşik dinamik deney uygulamaları gerçekleştirmiştir. Lineer olmayan davranışın gerçekleştiği çerçeve ve kolon deneylerinden kuramsal sonuçlarla uyumlu davranış ilişkileri elde edilmiştir. Ozkaynak ve ark [21] kapalı ve açık integrasyon yöntemlerinden bazılarının duyarlılığını irdelemek üzere kapalı integrasyon yöntemlerinin kullandığı sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Deprem kaydı adım aralığı ile aynı büyüklükte hesap adım aralığı seçilmesi durumunda, sonuçların kararlı olabileceği belirtilmiştir. Mercan, konvansiyonel deney yöntemleri ile benzeşik dinamik deneyler arasındaki farklılıkları ve benzeşik dinamik deney yönteminde kullanılan farklı integrasyon

tekniklerinin performanslarında hata birikimlerinin etkisini irdelemiştir [22]. Benzeşik dinamik deney yönteminde alt sistem kullanımı ilk olarak Dermitzakis ve Mahin tarafından önerilmiştir [23]. Önemli miktarda doğrusal olmayan davranışın beklendiği bölüm fiziksel olarak test edilmekte, yapının diğer bölümleri ise analitik olarak modellenmektedir. Benzeşik dinamik deney kapsamında gerçekleştirilen alt sistem yöntemi uygulaması ile büyük yapı sistemlerinin bütünsel olarak test edilmesi zorunluluğu, gerçek düşey yüklerin deney numunesine uygulanması şartıyla, ortadan kalkmaktadır [24-27]. Hung ve ark [27] iterasyon gerektirmeyen "*predictor-alpha-corrector*" isimli bir kapalı integrasyon yöntemi önermiştir. Yöntemin etkinliği bir çelik köprü modeli üzerinde tartışılmıştır. Sayısal çalışmalarda kullanılan yöntem; doğrusal olmayan malzeme davranışı ve yapısal yerdeğiştirme kontrolündeki hata birikimlerine karşın, köprü modelinin sismik davranışı kabul edilebilir doğrulukla tahmin edebilmiştir. Yöntemin düzeltici operatöründe yer alan parametreye bağılı olarak sönüm özelliklerinin de algoritmada etkisi öne çıkabilmektedir. Algoritmada kullanılan tanjant rijitliği; deney numunesinin gerçek rijitliğinden büyük veya eşit olduğunda, yönteminin koşulsuz kararlı çalıştığı gösterilmiştir. Öztürk ve ark [28] konsol kolonun sabit eksenel ve deprem yükü etkisindeki davranışını analitik olarak incelemek üzere, integrasyon yöntemi ve hesap adım aralığının benzeşik dinamik deney sonuçlarına etkisini tartışmıştır. Farklı eksenel yük seviyeleri için merkezi farklar yöntemi ile alfa kuvvet ayırımı (α -OS) yöntemi için dört farklı hesap adım aralığı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Hesap adım aralığının büyümesi ile merkezi farklar yönteminde sonuçların kararsızlaştığı göstermiştir. Jiang and Zhu, benzeşik dinamik deneyde modifiye edilmiş Newmark merkezi farklar yönteminin kararlılığını incelemiştir. Açık integrasyon yöntemlerinde seçilen hesap adım aralığının yapı modelinin frekansından daha küçük olması önerilmiştir [29]. Ammanagi ve Manohar benzeşik dinamik deneyde hata birikiminin etkisini izlemek üzere doğrusallaştırılmış bir varyasyonel denklemin dinamik denge denklemini ile nasıl artırılabilirliğini araştırmıştır. İki katlı bir yapı modeli üzerinde integrasyon adım aralığı, kabul edilebilir bir düzeyde kalması için, uyarlamalı olarak

ayarlanmıştır. Benzeşik dinamik deneyden elde edilen sonuçların, kuvvet esaslı deneylerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir [30]. Dong ve ark [31] doğrusal davranmayan viskoz sönümleyicilerin yer aldığı tek açıklıklı üç katlı çelik bir sistem üzerinde gerçek zamanda ilerleyen benzeşik dinamik deney gerçekleştirmiştir. Eş zamanlı ölçülen yerdeğiştirme büyüklükleri kullanılarak dinamik denge denkleminin sayısal integrasyonunun doğru yapıldığı belirtilmiştir. Çalışmada, koşulsuz kararlı CR integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Hesap adım aralığı deprem kaydı adım aralığının dörtte biri olarak seçilmiştir. Bu hesap aralığın yeterli sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Verma ve ark [32] merkezi farklar, kuvvet ayrıklaştırması, Rosenbrock ve CR-integrasyon yöntemlerini gerçekçi sönüm oranları için kararlılık ve doğrulukları bakımından boyutsuz sayısal indeksler ile değerlendirmiştir. Sayısal çalışmalar sönümlü ve sönümsüz tek serbestlik dereceli sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hata indekslerine göre, kuvvet ayrıklaştırması ve Rosenbrock yöntemlerinin her durumda, merkezi farklar yönteminin ise sönümsüz sistemlerde oldukça iyi performans gösterdiğini belirtilmiştir. Rijitlik azalmasının gözlemlendiği durumlarda CR yönteminin kullanımı önerilmiştir. Elde edilen indeksler, çevrimsel davranış durumunda kuvvet ayrıklaştırması yönteminin diğer yöntemlerden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. McCrum ve Williams hibrit test yönteminin geliştirilmesi kapsamında literatür araştırması sunmuştur. Benzeşik dinamik deney yöntemlerinde çözülen hareket denkleminin sayısal integrasyonunda ivme ve sönüm özellikleri modellenirken, deney numunesinin cevap kuvveti ölçülmektedir. Sayısal integrasyon yöntemleri, alt sistem modellerinin analizi, deneysel hatanın ve sürenin azaltılması, veri gecikmesinin telafi edilmesi; tam ölçekli ve gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilen dinamik deneylerin güvenilir, doğru, ekonomik ve verimli olmasına olanak sağlamıştır [33]. Bas ve Moustafa, hesap modeli rijitlik ve dayanım kaybı bakımından oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan durumlarda gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilen deney yöntemlerinin performans ve sınırlarını araştırmıştır. OpenSees'te bulunan farklı integrasyon algoritmalarının performansını incelemek üzere farklı moment çerçeve modellerinin ele alındığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir [34].

Literatürde, benzeşik dinamik deney tekniğinin kararlı olarak uygulanarak toplam deney süresinin kısaltılmasını sağlayacak hesap adım aralığının seçimini irdelleyen sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada, sayısal hata birikiminin en düşük seviyede kalmasını sağlayan, hesap adım aralığının geniş seçilmesine imkan veren ve kararlı olarak uygulanabilen Li-OSM (*Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı metodu*) yönteminin kullanımı önerilmiştir. Li-OSM yöntemi kullanılarak, deneyle etkileşimli ilerleyen sayısal analizde daha büyük hesap adım aralıkları seçerek toplam deney süresinin önemli ölçüde kısaltılabileceği deneysel ve sayısal olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada; lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı yöntemi (Li-OSM) ile merkezi farklar yönteminin (CDM) benzeşik dinamik deneyde ürettiği sonuçların kararlılığı sayısal ve deneysel olarak irdelenmiştir. Bu amaçla, tek serbestlik dereceli (TSD) çelik kolon eleman üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalarda kütle, davranış modeli ve hesap zaman aralığı değişkenleri irdelenmiştir. Sayısal çalışmalar, davranış modelinden ve seçilen hesap zaman aralığından bağımsız olarak her durumda Li-OSM yönteminin CDM yöntemine göre daha kararlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Li-OSM yönteminin kullanımında da "gerçek duruma" mutlak yakınsama sağlanabilmesi için; hesap zaman aralığının, deprem kaydı zaman aralığının yarısı seviyesinde seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Sayısal çalışmalarda; özellikle küçük kütleli durumlarda Li-OSM yönteminin kullanılmasının daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sinüs ve El-Centro ivme kayıtları etkisinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Li-OSM yönteminin daha büyük hesap zaman aralıklarıyla CDM yönteminden elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar üretebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlara göre, sayısal integrasyonda Li-OSM yönteminin tercih edilmesi deney süresinin önemli ölçüde kısaltılmasını sağlamaktadır.

2. Benzeşik Dinamik Deney Tekniği ve Integrasyon Yöntemleri

2.1. Benzeşik dinamik deney tekniği

Benzeşik dinamik deney tekniği, sarsma masası deneylerinde karşılaşılabilecek pek çok

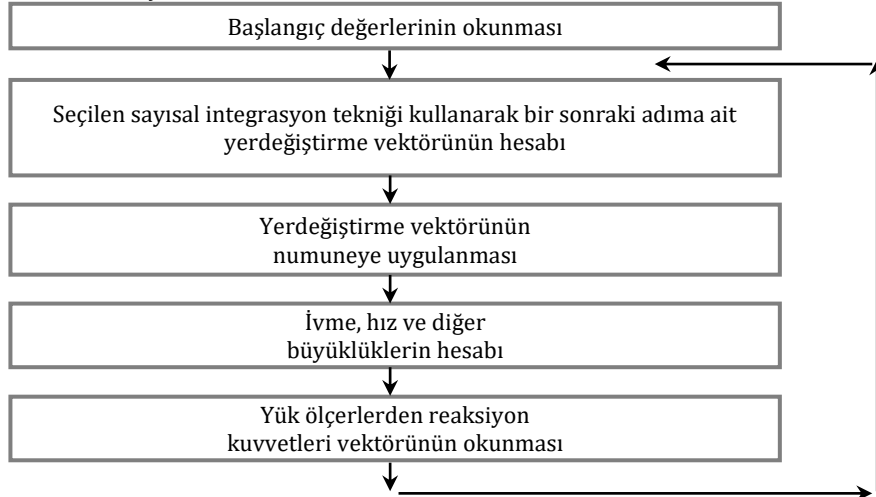
sınırlamayı bulundurmeyen, statik karakterli yükleme ve ölçüm cihazlarının kullanılabilirdiği, yapı sistemlerinin veya bölümlerinin dinamik yükler etkisindeki davranışlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemidir. Yapı sistemlerinin dinamik yükler etkisindeki davranışlarının deneysel olarak belirlenmesinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Atalet kuvvetlerinin doğrudan oluşturduğu sarsma masası deneyleri ile karşılaştırıldığında, benzeşik dinamik deney yönteminin bazı üstünlükleri bulunmaktadır. Deneyin adım adım uygulanması nedeniyle numune üzerinden daha detaylı hasar tespiti yapılabilmektedir. Numune üzerine gerçek kütle bağlama zorunluğu bulunmamaktadır.

Benzeşik dinamik deney yönteminde ilk yatırım ve işletme maliyetleri oldukça düşüktür ve standart deney aletleri ile çalışılabilmektedir. Buna karşın, sarsma masası deneyleri için ilk yatırım maliyeti yüksektir, [19]. Benzeşik dinamik deney tekniğinde; ayrı kütlesi sisteme dönüştürülen deney numunesinin dinamik

serbestlik derecelerine hidrolik verenerler bağlanmaktadır.

Hidrolik verenerler, reaksiyon kuvvetlerinin ölçülmesinde ve bir sonraki adım için hesaplanan hedef yerdeğiştirme vektörünün tatbik edilmesinde kullanılmaktadır. Hedef yerdeğiştirme vektörü; numuneden ölçülen reaksiyon kuvveti vektörü ile öngörülen kütle ve sönüm matrislerine bağlı olarak dinamik denge denkleminin sayısal integrasyonu ile belirlenmektedir.

Analitik ve deneysel etkileşimin söz konusu olduğu döngü, dinamik yük fonksiyonu tamamlanmaya kadar devam etmektedir. Yönteme ait genel bir akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Sistemin kütle ve sönüm özellikleri dışındaki tüm fiziksel özellikleri deneyden elde edilmektedir. Reaksiyon kuvvetleri doğrudan deney numunesinden ölçüldüğü için, sistemin doğrusal olmayan davranışını da kapsayan rijitlik özellikleri ile ilgili tahmin ya da kabul yapılmasına gerek bulunmamaktadır.



Şekil 1. Benzeşik dinamik deney tekniği genel akış diyagramı

2.2. Sayısal integrasyon yöntemleri

Tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistemin deprem etkisindeki davranışı, kuvvet dengesine dayanan dinamik denge denklemleri ile kontrol edilmektedir.

Tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi "M", sönümü "C" yatay rijitliği "K", yer ivmesi "X_g" kütle hareketinin ivmesi "X", yerdeğiştirmesi "X", hızı "X" olarak ifade edilirse; dinamik denge denklemleri, zamana bağlı

diferansiyel denklemler olarak denklemler (1)'deki gibi yazılır.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M\ddot{X}_g \quad (1)$$

Denge denkleminde eşitliğin sol tarafında ivmeye bağlı atalet kuvveti, hıza bağlı sönüm kuvveti, yerdeğiştirmeye bağlı reaksiyon kuvveti, sağ tarafında da zemin ivme kaydına bağlı deprem kuvveti yer almaktadır. Malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal

davranmayan yapı sistemlerinin deprem etkisindeki davranışlarının belirlenmesi için dinamik denge denkleminin çözümünde, sayısal integrasyon yöntemlerinin kullanılması etkili bir yoldur [35]. Adım adım integrasyon yöntemleri kapsamında dinamik denge denklemleri oluşturularak her " Δt " hesap zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme büyüklükleri hesaplanmaktadır. Zaman tanım alanında uygulanan adım adım integrasyon yöntemleri için literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır; yöntemler, kararlılık, yakınsaklık ve doğruluk özellikleriyle birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Yöntemlerin başarısı büyük ölçüde seçilen hesap adım aralığına bağlıdır. Hesap adım aralığının büyük seçimi doğruluktan uzaklaşmaya neden olabilirken, çok küçük seçimi de hesap yoğunluğunun artmasına ve hata birikimlerine yol açabilmektedir. Genel olarak, incelenen sistemin doğal titreşim periyodunun (T) onda biri mertebesindeki hesap adım aralığı ($\Delta t=0.1 \times T$) ile yeterli doğruluk sağlanabilmektedir, [36]. Literatürde farklı sayısal integrasyon yöntemleri önerilmiştir. Bunlar açık yöntemler, kapalı yöntemler ve her ikisinin birden karma olarak kullanıldığı kuvvet ayırımı yöntemleri olarak üç ana grupta toplanabilmektedir, [37], [38].

Açık integrasyon yöntemlerinde her adımda yapılan hesap bir önceki adımda hesaplanan büyüklüklere bağlı olduğundan, açık bir integrasyon döngüsü söz konusudur. Adımlar birbirine bağlı olduğundan kararlılığın sağlanabilmesi ve hata birikiminin düşük seviyede kalması için integrasyonda küçük hesap zaman aralıklarının seçilmesi gerekmektedir [29]. Merkezi farklar yöntemi, Runge-Kutta yöntemi, yöneltici-düzeltilici metod (YDM), Newmark açık integrasyon yöntemleri ve Chang yöntemi dinamik problemlerin çözümünde sıkça kullanılan açık integrasyon yöntemleri ailesinde yer almaktadır, [39]. Kapalı integrasyon yöntemlerinde; zaman dilimindeki bir büyüklüğün hesabı için, aynı zaman dilimindeki bir başka bilinmeyen büyüklüğe ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, kapalı integrasyon döngüsü kullanılmakta ve açık yöntemlere göre daha karmaşık işlemler yapılmaktadır. Her adımda bir ya da daha çok sayıda analiz yapıldığından, yöntem koşulsuz kararlıdır, [40]. Her adımda yapılan hesap önceki adımdan bağımsız olduğundan, kapalı yöntemlerde hata birikimi olasılığı daha

küçüktür. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, kapalı integrasyon yöntemlerinde küçük hesap adım aralığı kullanımı gerekliliği bulunmamaktadır, [30]. Lineer ivme yöntemi, ortalama ivme yöntemi, Newmark yöntemi, Hilber-Hugles-Taylor yöntemi ve Wilson- θ yöntemi kapalı integrasyon yöntemleri ailesinde yer almaktadır.

Kuvvet ayırımı yöntemlerinde ise sayısal integrasyon işlemleri açık ve kapalı bileşenlere ayrılmaktadır [41], [24]. İncelenecek problem, lineer ve lineer olmayan rijitliklerine ayrılarak değerlendirilir. Kuvvet ayırımı yöntemine, açık yöntemlerin sayısal hız özelliğini kazandırabilmek amacıyla " α " sönüm katsayısı ilave edilmesiyle ortaya çıkan *α -kuvvet ayırımı yöntemi*, benzeşik dinamik deneyde hata birikiminin azalmasını sağlayan önemli bir integrasyon yöntemidir [42]. Kuvvet ayırımı yöntemlerinde; test edilen parçaya açık integrasyon yöntemi, hesaplanan parçaya da kapalı integrasyon yöntemi uygulanır. Açık yöntemden dolayı uygulaması kolay, kapalı yöntemden dolayı da koşulsuz kararlıdır, [31]. Açık integrasyon yöntemleri ailesinin bir üyesi olan *yöneltici ve düzeltici metod* (YDM), açık ve kapalı integrasyon yöntemlerini birlikte kullanmakta ve sayısal işlemlerde yakınsama özelliğinin artırılmasında etkili olmaktadır. Bornelli ve Bursi [43] benzeşik dinamik deneyler için, genelleştirilmiş Chun Hulbert [44] yöntemine yöneltici -düzeltici yaklaşımı adapte etmiştir. Wu ve ark [45] ve Hung ve ark [46], hata yığılmasını azaltmak ve koşulsuz kararlılığı artırmak için kuvvet ayırımı yöntemine yöneltici - düzeltici yöntemleri uyarlamıştır. Bu bağlamda; benzeşik dinamik deneyin analitik tarafında, uygun büyüklükteki hesap adım aralığı ile kararlı sonuçlar üretebilecek integrasyon yönteminin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, açık integrasyon yöntemlerinden *merkezi farklar yöntemi* (CDM) ve kuvvet ayırımı yöntemlerinden (OSM) *lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı metodlarının* (Li-OSM) benzeşik dinamik deneydeki başarıları sayısal ve deneysel olarak irdelenmiştir. Dinamik denge denkleminin sayısal integrasyon işlemi için, MATLAB tabanlı bilgisayar yazılımı kullanılmıştır, [47].

2.2.1. Merkezi farklar yöntemi (CDM)

Sayısal integrasyon yöntemleri arasında en sık kullanılan ve hesap zaman aralığının " Δt "

yeterince küçük seçilmesi durumunda yüksek doğruluk ve kararlılık verebilen bir yöntemdir. İvmenin doğrusal olmayan değişimi, görece küçük zaman aralıkları kullanılarak takip edilmektedir. Merkezi farklar yönteminde "t" anındaki hız ve ivme büyüklüklerinin belirlenmesinde sırasıyla denklem (2) ve (3) kullanılmaktadır [48].

$$\dot{x}_t = \frac{x_{t+\Delta t} - x_{t-\Delta t}}{2 \cdot \Delta t} \quad (2)$$

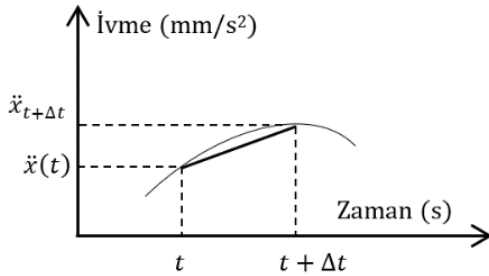
$$x_{t+\Delta t} = \frac{2 \cdot M \cdot x_t + \left(\frac{\Delta t}{2} \cdot C - M\right) x_{t-\Delta t} - \Delta t^2 \cdot (f_t^s + M \cdot \{1\} \cdot \ddot{x}_{gt})}{M + \frac{\Delta t}{2} \cdot C} \quad (4)$$

CDM yöntemin kararlılığı için, en büyük açısal frekans (w_{maks}) ve kritik hesap zaman aralığı (Δt_{kritik}) çarpımının sağlaması gereken eşitsizlik, özellikle yüksek modların etkin olduğu titreşim frekansları için denklem (5)'te verilmiştir [14].

$$w_{maks} \times \Delta t_{kritik} \leq \sim 2.0 \quad (5)$$

2.2.2. Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırım metodu (Li-OSM)

Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırım metodu (Li-OSM), açık integrasyon yöntemlerinden lineer ivme yöntemi ile kuvvet ayırım yöntemini birlikte kullanılmaktadır. Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı yöntemi, dinamik hareketin belirli bir zaman diliminde doğrusal değiştiği varsayımına dayanmaktadır, Şekil 2.



Şekil 2. Doğrusal ivme değişimi

İvmenin doğrusal değiştiği varsayımına bağlı fonksiyon ve başlangıç koşullarından hesaplanan $c_1 = \dot{x}_t$ ve $c_2 = x_t$ integrasyon sabitlerini içeren ivme, hız ve yerdeğiştirme ifadeleri sırasıyla denklem (6), (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$\ddot{x}_t = \frac{x_{t-\Delta t} - 2 \cdot x_t + x_{t+\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

t anındaki hız, ivme bileşenleri ve reaksiyon kuvveti "f_t^s" dinamik denge denkleminde yerine konularak, bir sonraki hesap adımına "t + Δt" karşı gelen yerdeğiştirme büyüklüğü denklem (4) ile hesaplanmaktadır.

$$\ddot{x}(t) = \frac{\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t}{\Delta t} t + \ddot{x}_t \quad (6)$$

$$\dot{x}(t) = \dot{x}_t t + \frac{\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t}{2\Delta t} t^2 + c_1 \quad (7)$$

$$x(t) = \ddot{x}_t \frac{t^2}{2} + \frac{\ddot{x}_{t+\Delta t} - \ddot{x}_t}{6\Delta t} t^3 + c_1 t + c_2 \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8) düzenlenerek; t + Δt anı için yerdeğiştirme ve hız ifadeleri denklem (9) ve (10)'da verildiği gibi elde edilir.

$$x_{t+\Delta t} = \ddot{x}_t \frac{(\Delta t)^2}{3} + \ddot{x}_{t+\Delta t} \frac{\Delta t^2}{6} + \Delta t \dot{x}_t + x_t \quad (9)$$

$$\dot{x}_{t+\Delta t} = \dot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}_{t+\Delta t} \quad (10)$$

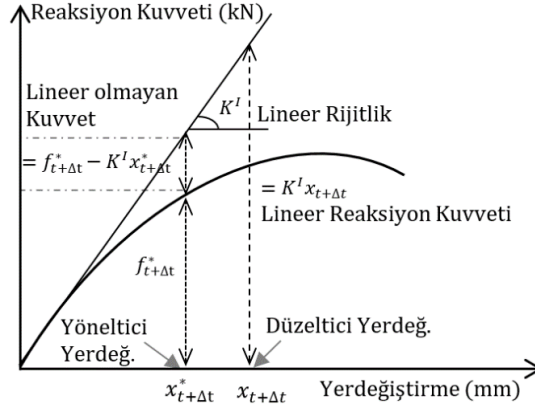
Li-OSM yönteminde; yönlütici-düzeltilici (YDM) yaklaşım *test edilen* parçaya, lineer ivme yöntemi ise *hesaplanan* parçaya uygulanmaktadır, [24]. Deney sırasında, hesaplanan parçada yerdeğiştirme ve hız bileşenleri denklem (9) ve (10) ile elde edilirken, deneyden sadece reaksiyon kuvveti okunmaktadır. Deney numunesine *hedef yerdeğiştirme* olarak gönderilen ve reaksiyon kuvvetinin belirlenmesinde kullanılan *yönlütici yerdeğiştirme büyüklüğü* denklem (11)'de verilmektedir, [40].

$$x_{t+\Delta t}^* = x_t + \Delta t \cdot \dot{x}_t + \frac{(\Delta t)^2}{3} \cdot \ddot{x}_t \quad (11)$$

Yönlütici yerdeğiştirmenin hesabı için, yerdeğiştirme ve hız büyüklüklerinin yanı sıra ivmenin de belirlenmiş olması gerekmektedir.

İvme hesabı için, kuvvet ayırımı yönteminde reaksiyon kuvveti *lineer rijitlik* (K^l) ve *lineer olmayan rijitlik* (K^E) büyüklüklerine bağlı olarak belirlenmektedir, [24].

Denyeyde numuneden ölçülen reaksiyon kuvvetinin ($f_{t+\Delta t}^*$) lineer ve lineer olmayan parçalara ayrılması işlemi Şekil 3'te gösterilmiştir, [24].



Şekil 3. Kuvvet ayırımı yöntemine ilişkin tanımlar

Ayrıklaştırılan reaksiyon kuvvetlerinin yer aldığı dinamik denge denklemi, "t + Δt" anı için denklem (12)'de verilmiştir.

$$M\ddot{x}_{t+\Delta t} + C\dot{x}_{t+\Delta t} + K^l x_{t+\Delta t} + K_{t+\Delta t}^E \cdot X_{t+\Delta t}^* = -M\{1\}\ddot{x}_{g(t+\Delta t)} \quad (12)$$

Yöneltilici yerdeğiştirmeye karşı gelen reaksiyon kuvvetinin lineer olmayan bileşeni, denklem (13)'ten hesaplanabilmektedir, Şekil 3. Deney numunesinin elastik davranış sergilemesi durumunda bu büyüklük sıfır değerini alacaktır.

$$K_{t+\Delta t}^E \cdot X_{t+\Delta t}^* = f_{t+\Delta t}^* - K^l \cdot X_{t+\Delta t}^* \quad (13)$$

Denklem (13)'ün, denklem (12)'ye yerleştirilmesiyle, deney numunesinden okunan reaksiyon kuvvetinin de ($f_{t+\Delta t}^*$) yer aldığı dinamik denge denklemi elde edilir, denklem (14).

$$M\ddot{x}_{t+\Delta t} + C\dot{x}_{t+\Delta t} + K^l x_{t+\Delta t} - (K^l x_{t+\Delta t}^* - f_{t+\Delta t}^*) = -M\{1\}\ddot{x}_{g(t+\Delta t)} \quad (14)$$

Yerdeğiştirme ($x_{t+\Delta t}$), hız ($\dot{x}_{t+\Delta t}$) ve yöneltilici yerdeğiştirme ($x_{t+\Delta t}^*$) büyüklükleri sırasıyla denklem (9), (10) ve (11) ile hesaplanır. Bu büyüklükler denklem (14)'te yerine konularak, aranan ivme değeri ($\ddot{x}_{t+\Delta t}$), denklem (15) ile hesaplanır. Böylece, numuneye uygulanacak yöneltilici yerdeğiştirme ($x_{t+\Delta t}^*$) hedefinin hesabı için gerekli olan tüm büyüklükler denklem (9),

(10) ve (15) kullanılarak belirlenmiş olmaktadır.

$$\ddot{x}_{t+\Delta t} = [M + \frac{\Delta t}{2} \cdot C + \frac{\Delta t^2}{6} \cdot K^l]^{-1} \cdot [M \cdot \{1\} \cdot \ddot{x}_{g(t+\Delta t)} - f_{t+\Delta t}^* - C \cdot (\dot{x}_t + \frac{\Delta t}{2} \cdot \ddot{x}_t)] \quad (15)$$

Yöneltilici-düzeltici yaklaşımda (YDM), analizin geçerli olduğu hesap zaman aralığının ilk adımında yaklaşık sonuç; ikinci adımda ise daha doğru sonuç hesaplanmaktadır. Hesaplanan düzeltici yerdeğiştirmeler birbirine eşit oluncaya kadar hesabın kendi içinde tekrarlanması gerekmektedir, [3, 29].

Lineer ivme yöntemi tabanlı kuvvet ayırımı metoduna dayalı benzeşik dinamik deney algoritmasının oluşturulması için aşağıda sıralanan adımlar izlenebilir;

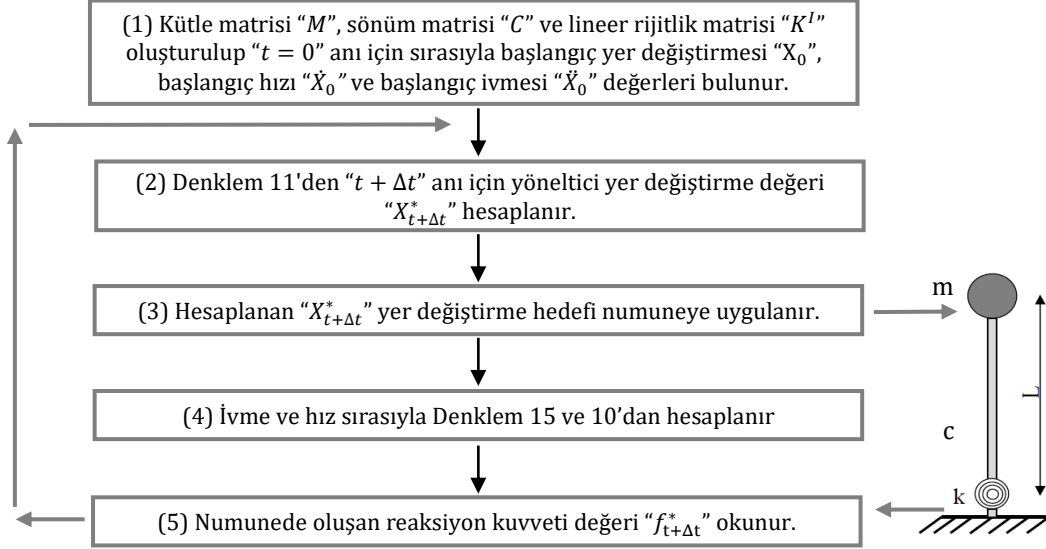
Kütle matrisi "M", sönüm matrisi "C" ve lineer rijitlik matrisi "K^l" belirlenerek dinamik denge denklemi oluşturulur. Başlangıç koşulları olarak "t = 0" anı için sırasıyla başlangıç yerdeğiştirmesi "X₀", başlangıç hızı "Ẋ₀" ve başlangıç ivmesi "Ẍ₀" değerleri hesaplanır. Denklem (11) kullanılarak hesaplanan yöneltilici yer-değiştirme deney numunesine uygulanır ve reaksiyon kuvveti ($f_{t+\Delta t}^*$) okunur.

Denklem (14) ün çözümünden sonra denklem (15) kullanılarak ivme değeri hesaplanır.

Denklem (9) ve (10) ile $x_{t+\Delta t}$ için sırasıyla düzeltici yerdeğiştirme ve hız büyüklükleri hesaplanır. $t=t+\Delta t$ zaman aralığı için yukarıda sıralanan adımlar tekrarlanır. Bu işlemler sırasında deney numunesinden alınacak tek

büyüklik, yönlü yerdeğiştirmeye karşı gelen reaksiyon kuvvetidir, Şekil 4.

Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı yöntemi beş adımda Şekil 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4. Lineer ivme tabanlı kuvvet ayırımı metodu akış şeması

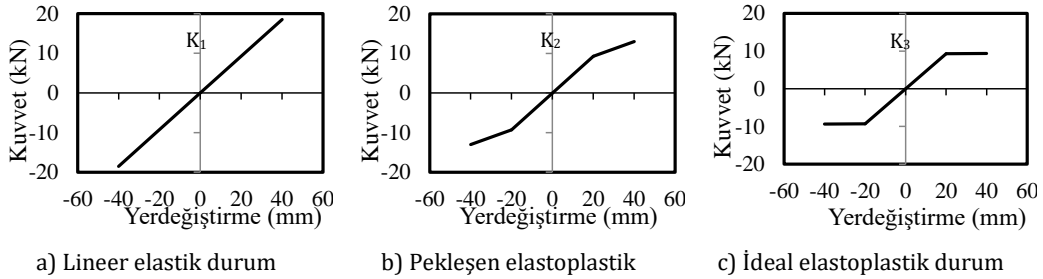
3. Sayısal Çalışmalar

Li-OSM ve CDM integrasyon yöntemlerinin kararlılıklarını karşılaştırmak amacıyla farklı kütle durumları, davranış modelleri ve hesap zaman aralıklarının etkilerini irdelemek üzere sayısal analizler yapılmıştır. Kütleli $m = 7.13 \times (10)^{-5}$ kNs²/mm, sönüm oranı $\xi = \%2$, periyodu $T = 0.0779$ sn ve başlangıç yatay rijitliği $K_1 = 0.4638$ kN/mm olan tek serbestlik dereceli (TSD) bir sistem kullanılmıştır. Analizlerde, adım aralığı $\Delta t_{\text{deprem}} = 0.02$ sn olan El-Centro (1940) kaydının ilk 7 sn. lik bölümü kullanılmıştır. Benzeşik dinamik deneyde gerekli olan deneysel reaksiyon kuvvetleri yerine tanımlanmış davranış modelleri kullanılmıştır.

Kütle, davranış modeli ve hesap adım aralığının değişken olarak seçildiği sayısal analizlerde ulaşılan sonuçlar, $\Delta t_{\text{hesap}} = 0.000025$ sn hesap aralığı ile elde edilen "gerçek durum" sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Davranış modeli etkisinin incelenmesi

Davranış modeli etkisini irdelemek için üç farklı durum üzerinde sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiş olup kullanılan davranış modelleri Şekil 5'te verilmiştir.



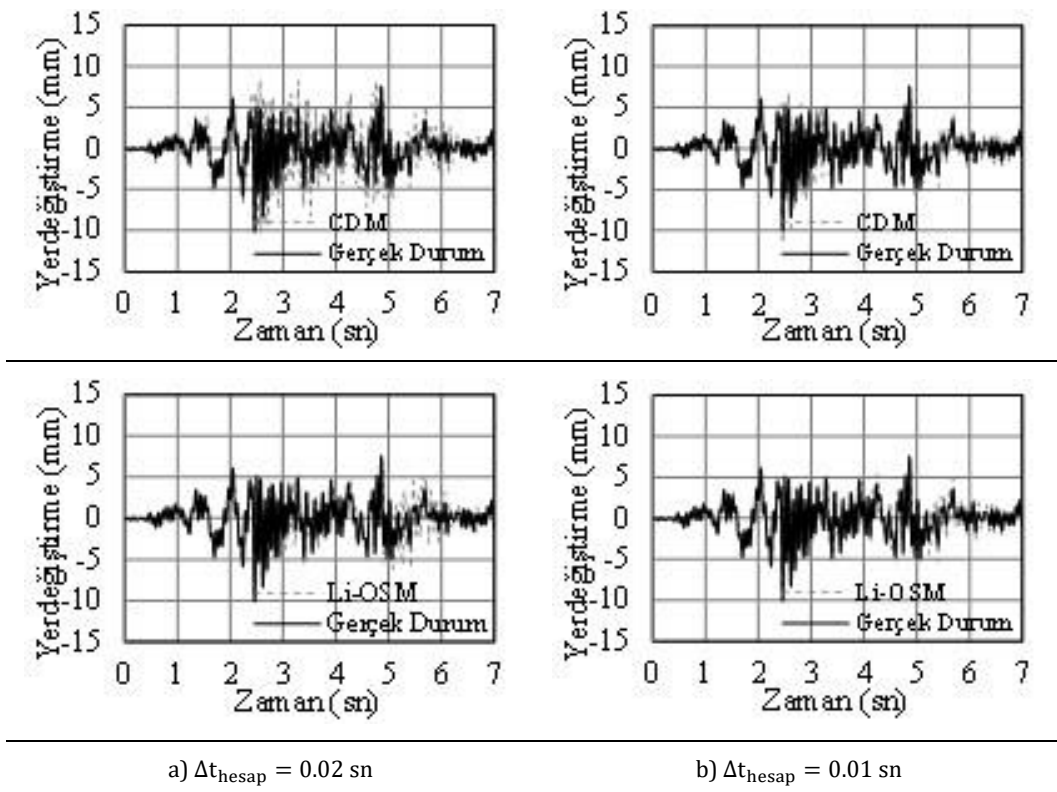
Şekil 5. Kullanılan davranış modelleri

Lineer davranış modelinde başlangıç rijitliği $K_1 = 0.463 \text{ kN/mm}$ olarak tanımlanmıştır.

Birinci kolun eğimi aynı kalmak üzere ikinci kolun eğimi *pekleşen elastoplastik modelde* ve *elastoplastik modelde* $K_2 = 0.4 \times K_1$ ve $K_3 = 0.01 \times K_1$ olarak seçilmiştir.

3.1.1. Lineer elastik davranış modeli

Lineer elastik davranış modeli durumunda, hesap adım aralığının kayıt aralığına eşit ($\Delta t_{\text{hesap}} = \Delta t_{\text{deprem}} = 0.02 \text{ sn}$) ve yarısı ($\Delta t_{\text{hesap}} = \frac{\Delta t_{\text{deprem}}}{2} = 0.01 \text{ sn}$) olduğu durumlar incelenmiştir, Şekil 6.



Şekil 6. Lineer elastik durumda CDM ve Li-OSM uygulama sonuçlarının karşılaştırılması

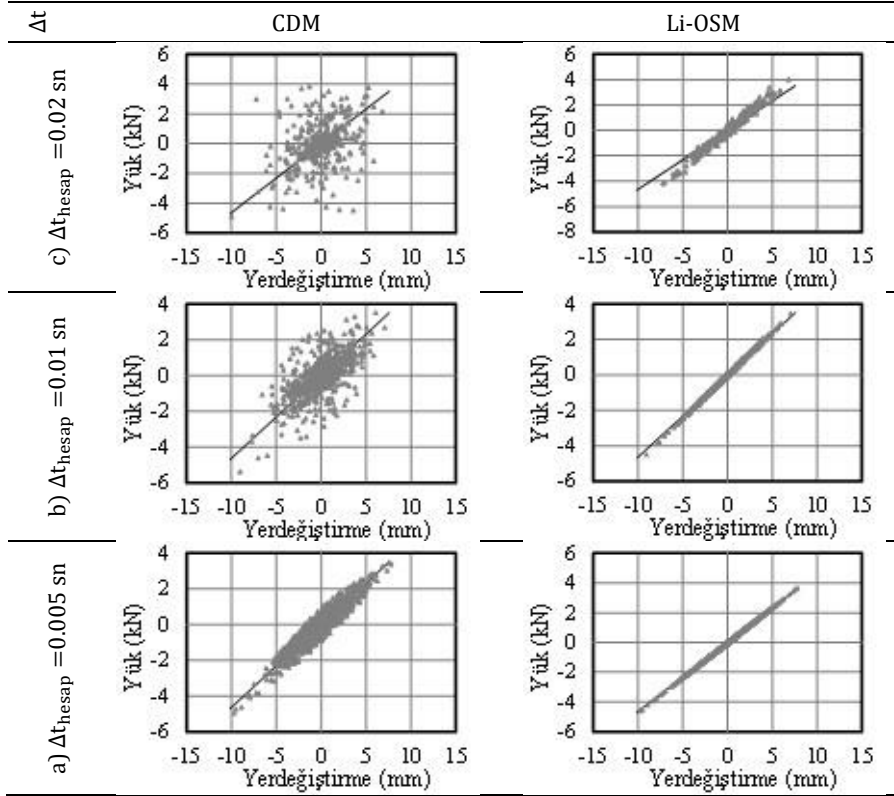
Merkezi farklar yönteminin (CDM) kullanıldığı ve hesap adım aralığının kayıt adım aralığına eşit alındığı ($\Delta t_{\text{hesap}} = 0.02 \text{ sn}$) durumda elde edilen en büyük tepe yerdeğiştirme değeri ile gerçek durum arasında %9.20 fark oluşmuştur. CDM yöntemi uygulamasında hesap adım aralığının kayıt adım aralığının yarısı olması durumunda ise ($\Delta t_{\text{hesap}} = 0.01 \text{ sn}$) fark %0.47'ye düşmektedir.

Li-OSM yönteminin kullanıldığı analizlerde elde edilen tepe yerdeğiştirmeleri ile gerçek durum arasındaki farklar $\Delta t_{\text{hesap}} = 0.02 \text{ sn}$ için %9.94, $\Delta t_{\text{hesap}} = 0.01 \text{ sn}$ için %6.85 olarak elde edilmiştir. Lineer elastik davranış modeli

durumunda hesap adım aralığının küçülmesi, her iki sayısal integrasyon yönteminin de daha doğru sonuç vermesini sağlamıştır.

CDM, Li-OSM yöntemine göre daha etkili olmuştur. CDM ve Li-OSM yöntemlerinin kullanıldığı analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri farklı hesap adımları için Şekil 7'de verilmiştir.

Li-OSM yönteminin, tüm hesap adım aralığı durumlarında gerçek duruma daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Li-OSM yöntemi için, hesap adım aralığının kayıt aralığının yarısı veya daha küçük seçilmesi durumunda başarısı görece olarak daha da artmaktadır.

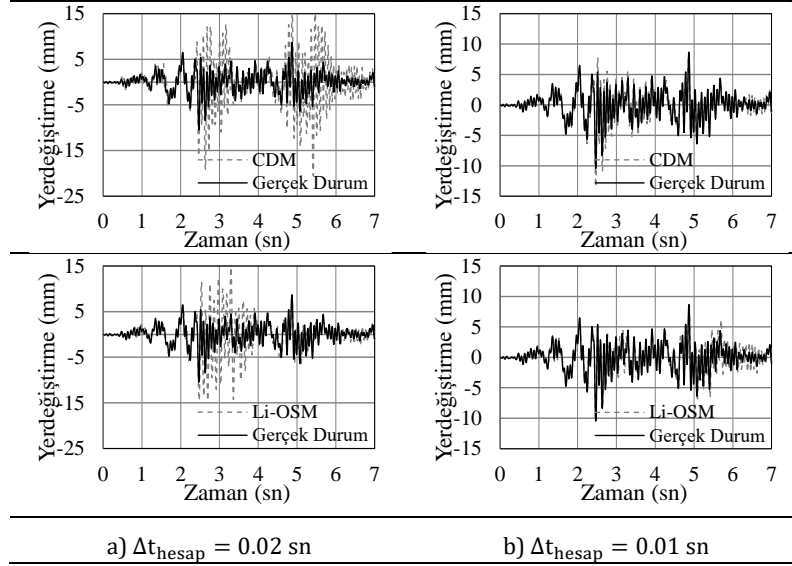


Şekil 7. Lineer elastik davranış için analiz sonuçları

3.1.2. Pekleşen elastoplastik davranış modeli

Pekleşen elastoplastik davranış modeli kullanılan TSD sistemin tepe yerdeğiştirmesinin

zamana bağlı değişimi, hesap adım aralığının $\Delta t_{\text{hesap}} = 0.02$ sn ve $\Delta t_{\text{hesap}} = 0.01$ sn alınması durumları için Şekil 8'de verilmiştir.

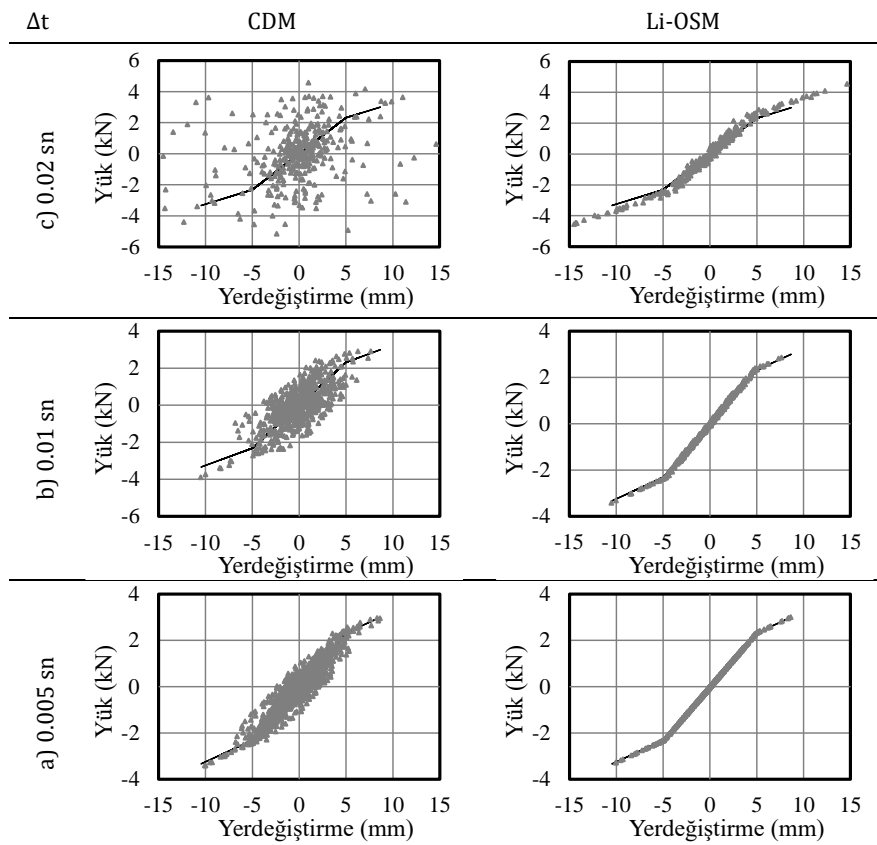


Şekil 8. Pekleşen elasto-plastik davranış modeli durumunda CDM ve Li-OSM karşılaştırması

CDM uygulamasında; hesap adım aralığının deprem kaydı adım aralığına eşit olması durumunda ($\Delta t_{\text{hesap}} = 0.02 \text{ sn}$) ulaşılan en büyük tepe yerdeğiştirmesi gerçek durumla %99 oranında farklılık göstermektedir.

Aynı durumda Li-OSM yöntemi için fark %60.2'ye düşmektedir.

Hesap adım aralığının ivme kaydı adım aralığının yarısı olması durumunda ($\Delta t_{\text{hesap}} = 0.01 \text{ sn}$) ise bu farklar CDM için %5.39'a, Li-OSM için %11.80'e düşmüştür. Pekleşen elastoplastik davranış modelini esas alan analizlerde, farklı hesap adım aralıkları için elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Pekleşen elasto-plastik davranış için analiz sonuçları

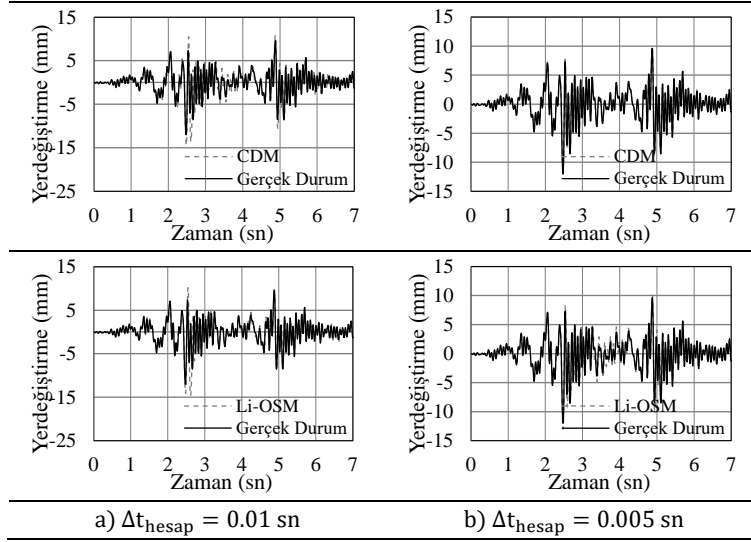
CDM uygulamasında hesap adım aralığının küçülmesiyle yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin doğruluğunun arttığı görülmüştür. Li-OSM, kullanılan tüm hesap adım aralıklarında CDM ye göre çok başarılı olmuştur.

3.1.3. İdeal elastoplastik davranış modeli

İdeal elastoplastik davranış modeli kullanılan TSD sistem çözümleri, hesap adım aralığının kayıt aralığının yarısı ($\Delta t_{\text{hesap}} = 0.01 \text{ sn}$) ve dörtte biri olması ($\Delta t_{\text{hesap}}: 0.005 \text{ sn}$) durumları için gerçekleştirilmiştir, Şekil 10.

İdeal elastoplastik davranış durumunda her iki yöntemin tepe yerdeğiştirmesi değerine yakınsayabilme başarısının %10'luk bir fark ile benzer olduğu görülmektedir.

İdeal elasto-plastik davranış modeli için CDM ve Li-OSM yöntemlerinin kullanıldığı analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 11'de verilmiştir. CDM yöntemi kullanıldığında farklı hesap adım aralıkları için sonuçlar çok dağınık çıkmıştır. Li-OSM nin uygulandığı durumda, hesap adım aralığının ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/2$) olarak seçimi yeterli olmaktadır.

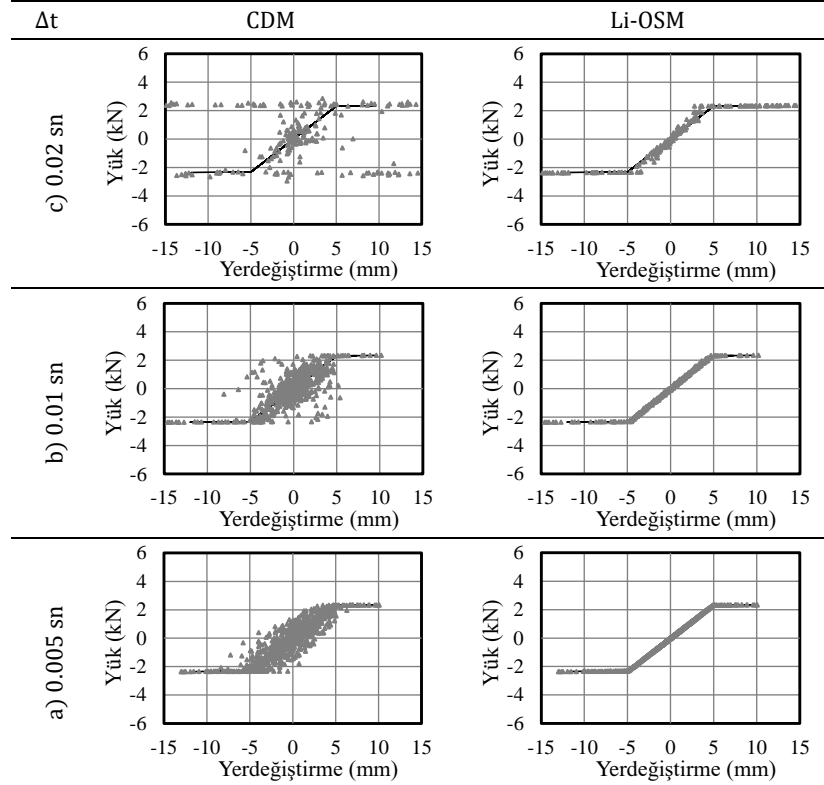


Şekil 10. İdeal elasto-plastik davranış modeli durumunda CDM ve Li-OSM karşılaştırmaları

3.2. Kütle etkisinin incelenmesi

Lineer elastik davranışın geçerli olduğu durumda; kütlelerin ($m = 7.13 \times (10)^{-5} \text{ kNs}^2/$

mm) 10 kat artırılması (büyük kütle) ve 10 kat azaltılması (küçük kütle) halleri çalışılarak sayısal integrasyon yöntemlerinin duyarlılıkları irdelenmiştir.



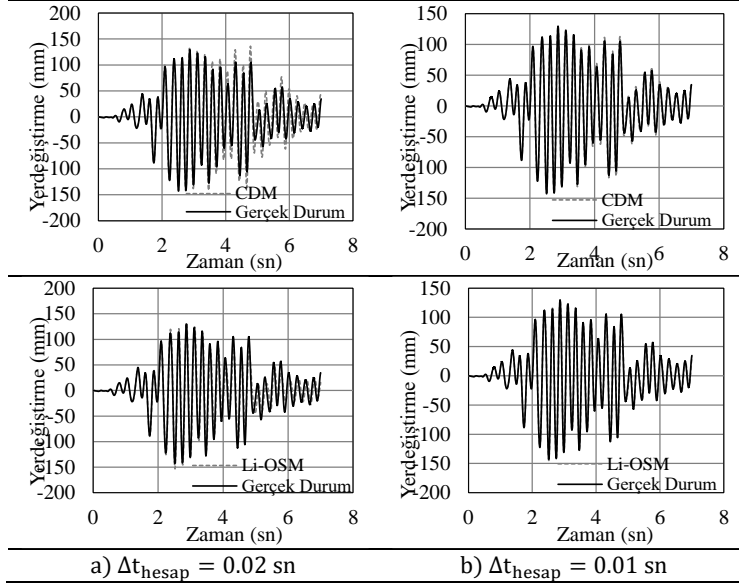
Şekil 11. İdeal elastoplastik davranış için analiz sonuçları.

3.2.1. Büyük kütle durumu ($m \times 10$)

Hesap adım aralığının kayıt aralığına eşit olarak seçildiği durumda CDM yöntemi ile yapılan analizlerden elde edilen tepe yerdeğiştirmeleri kesin sonuçlar ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 12. 'de verilmiştir. Hesap adım aralığının $\Delta t_{hesap} = 0.02$ sn olarak seçildiği durum hariç,

tüm analizler gerçek durum ile önemli benzerlikler göstermiştir.

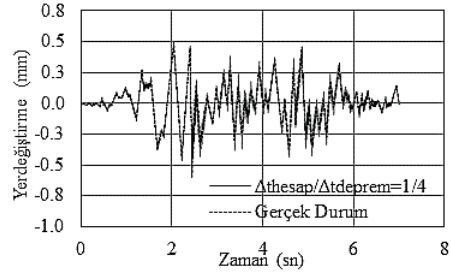
Hesap adım aralığı $\Delta t_{hesap} = 0.01$ sn alındığı durumda CDM yöntemi gerçek duruma iyi bir yakınsama göstermiştir. Büyük kütleli durumda, hesap adım aralığının küçültülmesine gerek kalmadan Li-OSM yöntemi kullanılabilir.



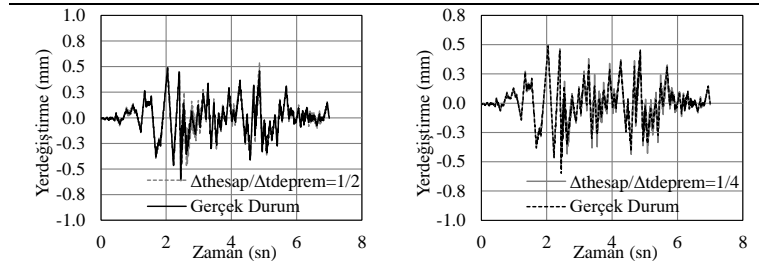
Şekil 12. Büyük kütle durumu için analiz sonuçları

3.2.2. Küçük kütle durumu ($m/10$)

Küçük kütleli durumda, yatay rijitliği $K_1 = 0.463$ kN/mm olarak belirlenen kolon eleman için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları Şekil 13 ve 14'te verilmiştir. CDM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler, kayıt aralığının yarısı olarak seçilen hesap adım aralığında sonuçların iraksadığını, yakınsama için kayıt aralığının dörtte biri düzeyinde seçilmesi gerektiği sonucunu vermiştir. CDM için ortaya çıkan bu sonuç, denklem (5)'te verilen eşitsizliğin sağlanamaması ile açıklanabilir.



Şekil 13. CDM yöntemi ile elde edilen tepe yerdeğiştirmeler



Şekil 14. Li-OSM yöntemi ile elde edilen tepe yerdeğiştirmeler

Küçük kütleli durumda; Li-OSM yönteminde, kayıt aralığının yarısı düzeyinde hesap adım aralığı kullanımı yakınsama için yeterli olmuştur. Her iki yöntemde, hesap adım aralığının deprem kaydı adım aralığına eşit alınması durumunda sonuçlar gerçek durumdan iraksamıştır.

4. Deneysel Çalışmalar

CDM ve Li-OSM integrasyon yöntemlerinin verdiği sonuçlar, gerçekleştirilen deneyler kapsamında karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Deneyler; sinüs formulu ivme kaydı ile El-Centro ivme kaydı kullanılarak, yüksekliği 884 mm olan kutu kesitli TSD kolon numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kolon elemanın, kütlesi $m = 12.20 \times (10)^{-5}$ kNs²/mm, kritik sönüm oranı $\xi = \%2.0$, periyodu $T = 0.07$ sn ve başlangıç yatay rijitliği de $K_1 = 0.979$ kN/mm olarak belirlenmiştir. İvme fonksiyonları için (Sinüs ve El-Centro kayıtları) adım aralığı $\Delta t_{\text{deprem}} = 0.02$ sn dir. Deney düzeneği ve numune, Şekil 15'te görülmektedir. Deneyler, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan özel yükleme çerçevesi içerisinde gerçekleştirilmiştir.

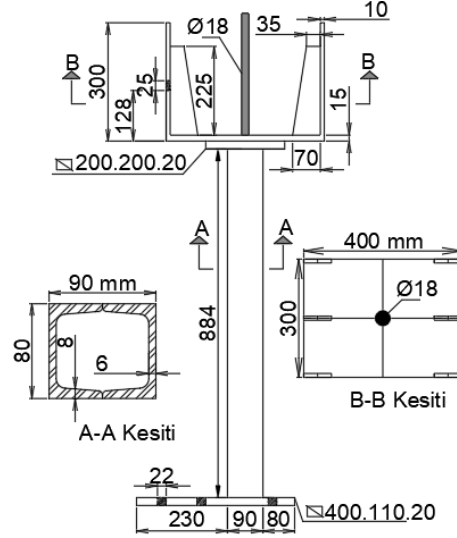


Deney Düzeneği

Numune

Şekil 15. Deney düzeneği ve numune (kırmızı)

Deney numunesi yükleme çerçevesine ankastre olarak bağlanmıştır. Deney numunesi St 37 kalitesinde 2 adet NPU80 çelik profilin birleştirilmesi ile oluşan kutu kesitli bir çelik kolon elemanı olup geometrik özellikleri Şekil 16'da verilmiştir. Kolon elemana 120 kg kütlenin konudlandırılabilmesi ve hidrolik verenin numuneye bağlanarak yerdeğiştirme hedefinin yatay doğrultuda uygulanması için tasarlanmış bir hazne, kolon üst kotunda oluşturulmuştur.



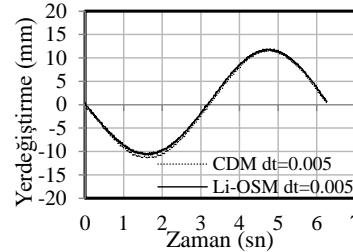
Şekil 16. Çelik kolon geometrik özellikleri

Deney programı Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Deney programı

Deney #	Analiz yöntemi	İvme Kaydı	Hesap zaman aralığı (Δt_{hesap})
#1	Li-OSM	Sinus	0.020
#2	CDM	Sinus	0.005
#3	Li-OSM	Sinus	0.005
#4	Li-OSM	Sinus	0.010
#5	Li-OSM	El-Centro	0.020
#6	CDM	El-Centro	0.005
#7	Li-OSM	El-Centro	0.005
#8	Li-OSM	El-Centro	0.010

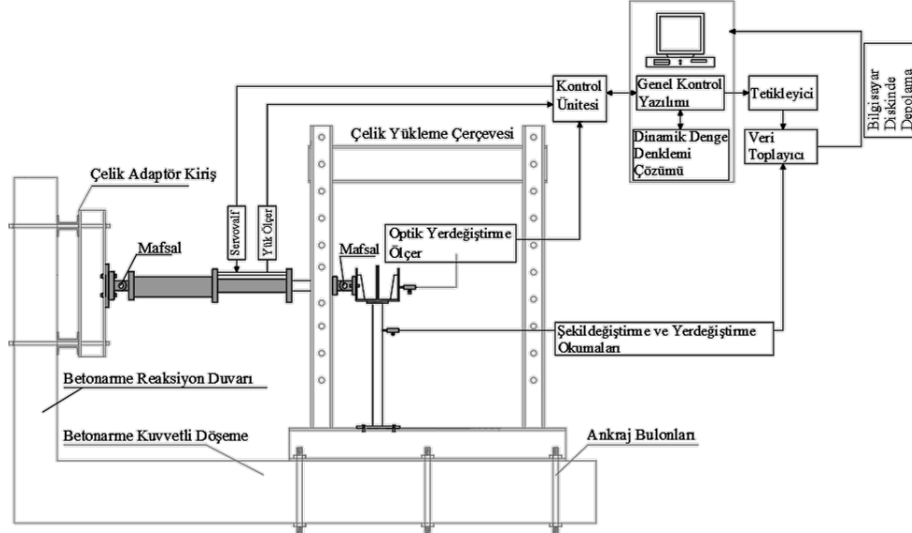
Sinüs ivme kaydı etkisinde gerçekleştirilen deneylerde; hesap adım aralığının kayıt aralığına eşit ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) ve dörtte biri ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/4$) olması durumlarında, CDM ve Li-OSM yöntemlerinin verdiği sonuçlar arasında önemli bir farklılık gözlenmemiştir, Şekil 17.



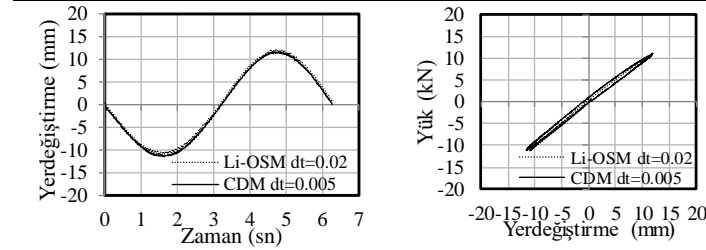
Şekil 17. Sinüs etkisinde CDM ve Li-OSM karşılaştırması

Hesap adım aralığının, CDM yönteminde ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/4$), Li-OSM yönteminde ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) olarak seçilmesi durumunda deneyden elde edilen yerdeğiştirme-zaman ve

yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 19'da verilmiştir. Benzeşik dinamik deney tekniğinin uygulandığı deney düzeneği ve testin anlatımı şematik olarak Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. Benzeşik Dinamik Deney Düzeneği ve testin şematik anlatımı

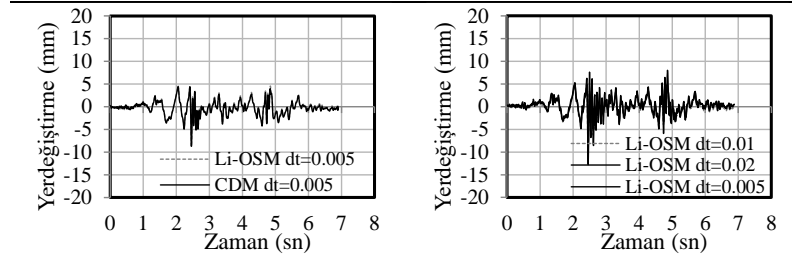


Şekil 19. Sinüs ivme kaydı etkisinde CDM ve Li-OSM yöntemlerine ait sonuçların karşılaştırılması

Sinüs deneyleri; Li-OSM yönteminde hesap adım aralığının ivme kayıt aralığına eşit olarak ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) seçilmiş olmasının deney sonuçlarının kararlılığı bakımından yeterli olacağını göstermiştir. Böylece toplam deney süresi önemli ölçüde kısalmaktadır.

El-Centro ivme kaydı etkisinde gerçekleştirilen deneylerden, CDM ve Li-OSM yöntemleri ile

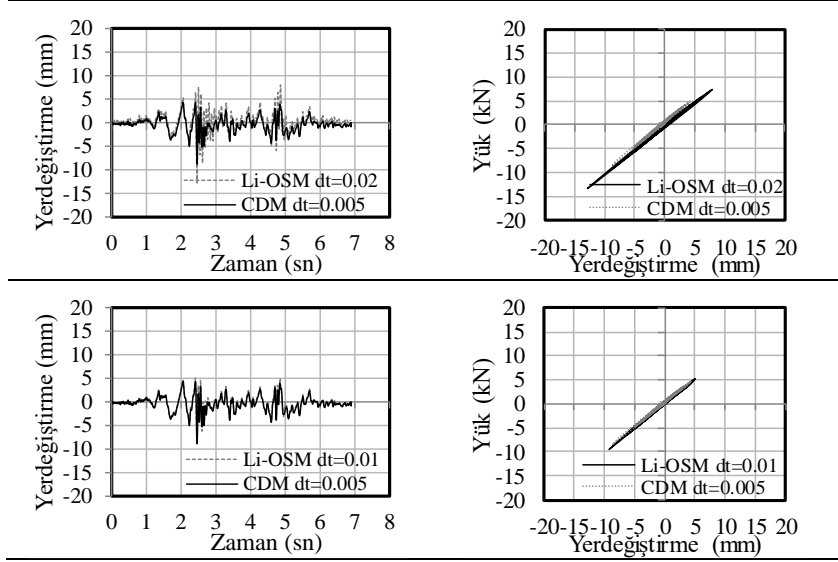
farklı hesap adım aralıkları kullanılarak elde edilen tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 20'de verilmiştir. Li-OSM ve CDM yöntemlerinin, dörtte bir hesap aralığının kullanıldığı durumda yaklaşık aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Li-OSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, seçilen tüm hesap adım aralıklarında tepe yerdeğiştirme değerlerinin birbirleriyle örtüşüğünü göstermektedir.



Şekil 20. El-Centro etkisinde CDM ve Li-OSM karşılaştırılması

Benzeşik dinamik deneylerde Li-OSM ve CDM yöntemlerinin $\Delta t = 0.02$ sn, $\Delta t = 0.01$ sn ve $\Delta t = 0.005$ sn hesap adım aralıklarıyla

kullanıldığı durumlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. El-Centro etkisinde $\Delta t = 0.005$ sn, $\Delta t = 0.01$ sn ve $\Delta t = 0.02$ sn hesap zaman aralıkları karşılaştırmaları

Hesap adım aralığının $\Delta t = 0.02$ sn alınması durumunda Li-OSM yöntemiyle elde edilen deney sonuçları, CDM yöntemiyle $\Delta t = 0.005$ sn alınarak elde edilen sonuçlar ile belirli bir yerdeğiştirme seviyesine kadar uyum içersindedir. Li-OSM yöntemi kullanılarak ve hesap adım aralığının $\Delta t = 0.01$ sn alınmasıyla tekrarlanan deneylerden elde edilen sonuçlar, CDM yönteminde $\Delta t = 0.005$ sn alınarak uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Li-OSM yönteminde sonuçların yakınsaması için, ivme adım aralığının yarısı mertebesinde hesap adım aralığı kullanımı gerekmiştir. CDM yönteminde ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/4$) kullanmak yerine, Li-OSM yönteminde ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/2$) yeterli olmaktadır.

Sonuçların doğruluk ve kararlılığından ödün vermeden, toplam deney süresi yarıya inmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada; benzeşik dinamik deney tekniğinde kullanılan iki farklı sayısal integrasyon yönteminin, Sinüs ve El-Centro kayıtları özelinde elde edilen deney sonuçları üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak irdelenmiştir.

İleriki dönemde gerçekleştirilecek çalışmalarda farklı ivme kayıtlarının ve farklı periyotlu yapı sistemlerinin kullanılması benzeşik dinamik deney tekniğinin gelişimi bakımından önemlidir. Burada sunulan sonuçların frekans içeriği farklı olan ivme kayıtları için değişiklik gösterebileceği kısıtlaması da göz önünde tutularak, elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Sayısal analizlerde kullanılan tüm davranış modelleri için, hesap adım aralığının küçültülmesi ile her iki integrasyon yönteminde de en büyük tepe yerdeğiştirmelerine önemli ölçüde yakınsama sağlanmıştır.
2. Farklı davranış modellerinin kullanıldığı sayısal analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri, Li-OSM yönteminin CDM yöntemine göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. Tüm davranış modelleri için; hesap adım aralığının ivme kaydı adım aralığına eşit ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) alınması durumunda, CDM yönteminde ciddi iraksamalar, Li-OSM yönteminde ise sınırlı düzeyde yakınsama görülmüştür. Li-OSM yönteminde mutlak başarı için, hesap adım aralığının ivme kaydı adım aralığının yarısı ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/2$) olarak seçilmesi gerekmiştir.

3. Sinüs deneyleri; Li-OSM yönteminde hesap adım aralığının ivme kayıt aralığına eşit ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) alınmasının deney sonuçlarının kararlılığı bakımından yeterli olduğunu göstermiştir. Düzgün harmonik ivme fonksiyonları etkisinde gerçekleştirilecek deneylerde, Li-OSM yönteminde hesap adım aralığının ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}$) olarak seçilmesi toplam deney süresini önemli ölçüde kısaltacaktır.

4. El-Centro kaydı için gerçekleştirilen benzeşik dinamik deneylerde; mutlak başarı için, hesap adım aralığı CDM yönteminde ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/4$) Li-OSM yönteminde ise ($\Delta t = \Delta t_{\text{deprem}}/2$) olarak seçilmiştir. Li-OSM yöntemi kullanıldığında toplam deney süresi yarıya inmiştir.

Kaynakça

- [1] Hakuno M, Shidawara M, Hara T. 1969. Dynamic destructive test of a cantilever beam controlled by an analog-computer, Transactions of Japan Society of Civil Engineers, Cilt. 171, s. 1-9.
- [2] Takanashi K. 1975. Non-linear earthquake response analysis of structures by a computer actuator on-line system, Transactions of the Architectural Institute of Japan, Cilt. 229, s. 77-83.
- [3] Okada T, Takanashi K, Seki M, Taniguchi H. 1980. Nonlinear earthquake response of system anchored on RC building floor, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, Cilt. 13, s. 63-85.
- [4] Okada T, Matsutaro Seki M, Park Y.J. 1980. A simulation of Earthquake Response of Reinforced Concrete Building Frames to bi-directional Ground Motion by IIS Computer Actuator On-line System, Seventh World Conference on Earthquake Engineering, 9-13 September, Istanbul.
- [5] Balendra T, Lam K, Liaw C, Lee S. 1987. Behavior of eccentrically braced frame by pseudo-dynamic tests, Journal of Structural Engineering, ASCE, Cilt. 113(4), s. 673-688.
- [6] Paguette J, Bruneau M. 2000. Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry buildings with flexible diaphragm, 12WCEE 2000 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 January-4 February, Auckland.
- [7] Nakajima K, Iemura H, Takahashi Y, Ogawa K. 2000. Pseudo dynamic tests and implementation of sliding bridge isolators with vertical motion, 12WCEE 2000 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 January-4 February, Auckland.
- [8] Pinto A, Pegon P, Magonette G, Molina J, Buchet P, Tsionis G. 2002. Pseudodynamic tests on a large-scale model of an existing RC bridge using non-linear substructuring and asynchronous motion". Institute for the Protection and Security of the Citizen European Laboratory for Structural Assessment (ELSA), Report, EUR 20525 EN.
- [9] Peek R, Yi W. 1990. Error analysis for pseudo dynamic test method: 1.Analysis, Journal of Engineering Mechanics ASCE, Cilt. 116(7), s. 1618-1637.
- [10] Peek R, Yi W. 1990. Error analysis for pseudo dynamic test Method: 2.Application, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Cilt. 116(7), s. 1638-1658.
- [11] Shing P.B, Mahin S.A. 1987. Cumulative experimental errors in pseudo dynamic tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Cilt. 15(4), s. 409-424.
- [12] Nakashima M. 1983. Stability and accuracy of integration techniques in pseudo dynamic testing". Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, Technical Report, 105.
- [13] Shing P.B, Mahin, S.A. 1985. Computational aspect of a seismic performance test method using on-line computer control, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Cilt. 13(4), s. 507-526.
- [14] Shing P.S.B, Manivannan T. 1990. On the accuracy of an Implicit algorithm for pseudo dynamic tests, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Cilt. 19(5), s. 631-651
- [15] Kabayama K, Toyoshima M, Kumazawa F, Nakano Y, Okada T. 1993. On-line tests of frame structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, Cilt. 26, s. 75-82.
- [16] Yuksel E, Ozkaynak H, Surmeli M. 2011. Benzeşik dinamik deney tekniği ve bir uygulama, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, Cilt. 352, s. 5463-5469.
- [17] Yuksel E, Ozkaynak H, Surmeli M. 2009. Benzeşik dinamik deney tekniği ve bir uygulaması, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt. 27(4), s. 286-302.
- [18] Ozkaynak H, Yuksel E, Güney A.K. 2014. Evaluation of integration techniques used in pseudo dynamic testing methodology. EURO DYN 2014 9th European Conference on Structural Dynamics, 30 June-2 July Porto.
- [19] Mercan O. 2003. Evaluation of real-time pseudodynamic testing algorithms for seismic testing of structural assemblages. MSc Thesis, Lehigh University, Pennsylvania, USA.
- [20] Dermitzakis SN, Mahin SA. 1985. Development of substructuring techniques for on-line computer controlled seismic performance testing, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, Report UCB/EERC-85/04.
- [21] Nakashima M, Kaminoso T, Ishida M, Ando K. 1990. Integration techniques for substructuring pseudodynamic test, 4th US National Conference on Earthquake Engineering, 20-24 May, California.
- [22] Vannan MT. 1991. The pseudodynamic test method with substructuring application. PhD Thesis, College of Engineering and Applied Sciences, University of Colorado Boulder, Colorado, USA,
- [23] Buchet P, Pegon P. 1994. PSD testing with substructuring: implementation and use, JRC Special Publication, Cilt. I.94 (25), s. 1-21.
- [24] Chung-Chan Hung, Wei-Ming Yen, Wei-Ting Lu 2012. An unconditionally stable algorithm with the capability of restraining the influence of actuator

- control errors in hybrid simulation, *Engineering Structures*, Cilt. 42, s. 168-178.
- [25] Öztürk S, Doran B, Aksoylar C. 2017. An Analytical and Experimental Study of Time Integration Methods in Pseudo Dynamic Analysis. *Digital Proceeding of ICOCEE-CAPPADOCIA 2017*, 8-10 May Nevşehir.
- [26] Jiang C. X., Zhu T.S. 2014. Stability Analysis Research of Modified CD-Newmark Numerical Integral Method in Seismic Pseudo-dynamic Test, *Applied Mechanics and Materials*, Cilt. 638-640, s. 1869-1872.
- [27] Ammanagi S., Manohar C. S. 2016. Adaptive time stepping in pseudo-dynamic testing of earthquake driven structures, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Cilt. 14, s. 3047-3074.
- [28] Baiping Dong, Richard Sause and James M. Ricles. 2015. Accurate real-time hybrid earthquake simulations on large-scale MDOF steel structure with nonlinear viscous dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt. 44, s. 2035-2055.
- [29] Mohit Verma, J. Rajasankar and Nagesh R. Iyer 2015. Numerical assessment of step-by-step integration methods in the paradigm of real-time hybrid testing, *Earthquakes and Structures*, Cilt. 8(6), s. 1325-1348.
- [30] D.P. McCrum, M.S. Williams 2016. An overview of seismic hybrid testing of engineering structures, *Engineering Structures*, Cilt. 118, s. 240-261.
- [31] E. E. Bas & M. A. Moustafa 2020. Performance and Limitations of Real-Time Hybrid Simulation with Nonlinear Computational Substructures, *Experimental Techniques*, Cilt. 44, s. 715-734.
- [32] Clough R.W, Penzien J. 1975. *Dynamics of Structures*. New York, USA, McGraw-Hill, 752s.
- [33] Paz. M. 1991. *Structural Dynamics Theory and Computation*. 3rd ed. New York, USA, Van Nostrand Reinhold, 621s.
- [34] Dokainish M.A, Subbaraj K. 1989. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics-I. Explicit methods, *Computers & Structures*, Cilt. 32(6), s. 1371-1386.
- [35] Dokainish M.A, Subbaraj K. 1989. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics-II. implicit methods, *Computers & Structures*, Cilt. 32(6), s. 1387-1401
- [36] McCrum D.P, Williams M.S. 2016. An overview of seismic hybrid testing of engineering structures, *Engineering Structures*, Cilt. 118, s. 240-261.
- [37] Zhang Y, Sause R, Ricles JM, Naito CJ. 2005. Modified predictor-corrector numerical scheme for real-time pseudo dynamic tests using state-space formulation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Cilt. 34(3), s. 271-288.
- [38] Hughes TJR, Pister KS, Taylor RL. 1979. Implicit-explicit finite elements in nonlinear transient analysis, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Cilt. 17/18(1), s. 159-182.
- [39] Combescure D, Pegon P. 1997. α -Operator splitting time integration technique for pseudo dynamic testing error propagation analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt. 16(7-8), s. 427-443.
- [40] Bonelli A, Bursi OS. 2005. Predictor-corrector procedures for pseudo-dynamic tests, *International Journal for Computer-aided Engineering and Software*, Cilt. 22(7), s. 783-834.
- [41] Chung J, Hulbert GM. 1993. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized-alpha method, *Journal of Applied Mechanics*, Cilt. 60, s. 371-375.
- [42] Wu B, Xu G, Wang Q, Williams MS. 2006. Operator-splitting method for real-time substructure testing, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Cilt. 35(3), s. 293-314.
- [43] Hung C-C, Yen W-M, Lu W-T. 2010. An unconditionally stable algorithm with the capability of restraining the influence of actuator control errors in hybrid simulation, *Engineering Structures*, Cilt. 42, s. 168-178.
- [44] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
<https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Erişim Tarihi: 04.05.2012).
- [45] Güneş A.K. 2011. Benzeşik dinamik deney yönteminde integrasyon metodunun etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 105s, İstanbul.