



Sarsma masası testlerindeki dinamik parametrelerin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi

Neslihan AVCI

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
neslihanavci.tr@gmail.com ORCID: 0000-0002-0050-7202

Fatih ALEMDAR*

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
falemdar@yildiz.edu.tr ORCID: 0000-0002-8752-0310 Tel: (212) 383 52 00

Geliş: 07.02.2019, Revizyon: 11.03.2019 , Kabul Tarihi: 14.03.2019

Öz

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyinde LVDT ve ivmeölçer ile edilen dinamik yer değiştirme parametreleri, görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik yer değiştirme parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Görüntülerde referans alınan bölgenin yer değiştirme parametreleri şablon eşleştirme yöntemi ile belirlenmiştir. Fakat referans alınan bölge yer değiştirirken piksel derinliği, yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumda istatistiksel olarak yapılan hesaplamalarda hatalar oluşabilmektedir. Bu sebeple şablon eşleştirme yönteminde akıllı tarama sistemi geliştirilerek hata yapma oranı en aza indirgenmiştir. Klasik şablon eşleştirme yöntemlerinde referans şablon, tüm görüntüde aranmaktadır. Bu durum hem maliyetli hem de hata yapma durumu mevcuttur. Akıllı tarama sisteminde, referans şablonun hızına bağlı olarak tarama alanı belirlenmektedir. Böylece sonraki görüntülerde hareket eden şablonun takip mesafesinde kalınmaktadır. Yapılan çalışmalarda akıllı tarama sistemi ile şablon eşleştirme yönteminin hata oranları % 0,1'in altında bulunmuştur. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi Abaqus SE programı ile modellenmiş olup, çelik çerçeve üzerinde referans alınan noktalardaki yatay dinamik yer değiştirmeler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sarsma masası deneyi, Görsel işleme tekniği, Normalize edilmiş çapraz korelasyon katsayısı, Çelik çerçevenin dinamik parametreleri

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Yapı elemanlarının ve sistemlerinin dinamik etkiler altında davranışlarının belirlenmesinde kullanılan en etkin ve gerçeğe en yakın yöntemlerden biri sarsma masası deneyidir. Sarsma masasının temel çalışma prensibi rijit tablaya bağlanmış yapı modellerini veya yapı elemanlarını, istenilen bir ivme fonksiyonu ile titreştirilmesidir. Uygulanan ivme kaydı, gerçek bir deprem kaydı olabileceği gibi üretilmiş bir kayıt da olabilmektedir. Günümüzde sarsma masaları farklı serbestlik derecelerine sahip olabilmekte, hidrolik ya da daha farklı tahrik sistemleriyle çalıştırılabilmektedir. Masa boyutlarının ve sistem kapasitelerinin sınırlı olması nedeniyle genelde ölçekli numuneler denenmektedir (Mahdavi, 2014).

Sarsma masası deneyi esnasında yapı elemanlarının ve sistemlerinin istenilen bir bölgesinde dinamik parametreleri ölçmek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları doğrusal değişimli diferansiyel transformatörler (LVDT), lineer potansiyometre, piezoelektrik veya mikro elektromekanik ivmeölçerlerdir. Bu yöntemler işçilik, zaman ve maliyet açısından dezavantajlara sahiptir. Son zamanlarda, bu dezavantajlara sahip olmayan görüntü işleme yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Sadece dijital kamera, bilgisayar ve uygun bir yazılımla tek bir deney yapılarak deney numunesinin birçok noktasından dinamik yer değiştirmeye ait büyüklükler ölçülebilmektedir.

Literatür araştırması, son yıllarda görüntü işleme yönteminin mühendislik konularında geniş bir kullanım alanı olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Onat M., betonun kırılmadan önceki potansiyel davranışının görüntü işleme tekniklerini kullanarak incelemiştir. 50x10x10 boyutunda dikdörtgen prizma şeklinde lifli beton numunelerinin 28 günlük külden sonra üç noktalı eğilme

deneyini yapmıştır. Yüke karşılık gelen deplasman miktarlarını bir komparator yardımıyla ölçmüştür. Bu görüntüleri görüntü işleme tekniği ile ortaya çıkan deplasman miktarlarını komparator değerleri ile karşılaştırmıştır (Onat, 2008).

Kılınç İ., çelik numuneler üzerinde farklı çaplarda ve derinliklerde oluşturulan deliklerin taranmış elektron mikroskobu fotoğraflarını çekmiş, daha sonra MATLAB programı yardımıyla derinlikleri piksel cinsinden bulmuş ve örnekleri incelemiştir. Çelik numuneler aşındırıcı ortamda bırakılmış ve daha sonra deliklerin fotoğrafları taramalı elektron mikroskobu ile çekildikten sonra MATLAB programı ile derinlikler hesaplanmıştır. Görüntü işleme yöntemi kullanılarak belirlenen derinlik değerleri ve gerçek oluk derinliği değerleri karşılaştırılmış ve gerçek oluk derinliklerinin maksimum %6,5 nispi hatayla elde edilebileceği sonucuna varılmıştır (Kılınç, 2009).

Fırat Alemdar Z. ve diğerleri farklı yükler altındaki yapısal sistemlerdeki doğrusal olmayan tepkinin yerini incelemiştir. Dört açıklıklı büyük ölçekli bir köprü sisteminin sismik performansını araştırırken, güçlü yer hareketleri altında kolonların plastik bölgelerinden deformasyon verileri elde edilmiştir. Kolonun plastik bölgelerdeki deformasyonlarını kaydetmek ve analiz etmek için üst ve alt yüzeylerine ızgara çizgileri kullanılarak bir fotogrametri yöntemi uygulanmıştır. Betonarme köprü kolonunun dinamik yükleme altındaki deformasyonları ve dönmeleri incelenerek geleneksel test ölçüm cihazlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fotogrametri yöntemi, referans çizgileri kullanılarak çizilen yüzeydeki noktaların yanal ve düşey yer değiştirmelerinin yanı sıra plastik bölgelerin deforme şeklini takip etmeyi başarmıştır, ancak kolonlardaki dönmeler gibi ikincil hesaplamaların sonuçları sınırlı bir başarıya ulaşmıştır (Fırat Alemdar Z., 2011).

İnşaat mühendisliği yapılarında titreşimin hız ve yer değiştirme büyüklüklerinin

ölçümünde sıkça kullanılan sayısal görüntü işleme teknikleri incelenmiştir (Erdoğan, 2018). Görüntü işleme tekniklerinden Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) algoritması, korelasyon tabanlı şablon eşleştirme ve görsel akış yöntemleri kullanmıştır. Bir laboratuvar test yapısı üzerinde yapay ve doğal hedeflerin takibi ile farklı mesafelerden ölçümler yapılmış ve yöntemlerin performansları incelenmiştir. İlk olarak görüntü işleme yöntemlerinden elde edilen yer değiştirmeler, LVDT yardımıyla ölçülen yer değiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yöntemlerin performanslarını frekans alanında incelemek amacıyla görüntü işleme ile elde edilen deneysel modal parametreler alışılagelmiş ivmeölçerler ile alınan kayıtlar ile karşılaştırılmıştır (Erdoğan, 2018).

Jo vd. yaptıkları çalışmalarda iki farklı görsel işleme tekniğini birleştirerek ölçülebilir alanı genişletmeyi ve yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla işaretleyiciyi izlemek için NCC işlevini görüntü işleme algoritması olarak kullanarak şablon tabanlı eşleştirmeyi uygulamıştır. Geometrik bozulmayı gidermek için, homografi matris ile düzlemsel bir projeksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bu araştırma sayesinde, köprü yer değiştirmelerini kullanıcı dostu bir arayüzle ölçmek için GUI tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Laboratuvar ölçek testine ek olarak, önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için saha testleri yapılmıştır. Ölçüm hatasını ölçmek için, RMSE'ye dayalı bir hata değerlendirmesi yapılmıştır. Önerilen yöntem, akıllı telefon kamerası ile işaretleyici arasındaki açı arttığında bile yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu göstermiştir (Jo, Lee, Jo, & Khan, 2018).

Görüntü işleme tekniklerinden şablon eşleştirme yöntemi ile asma bir köprünün askı kablolarının titreşim frekanslarının bulunmasında kullanılmakla beraber bir demiryolu köprüsünün tren geçişleri esnasındaki titreşimlerinin ölçülmesinde de

kullanılmıştır (Freng, Fukuda, Feng, & Mizuta, 2015). Görsel akış algoritması ise asma köprü kablolarının titreşim ölçümlerinde sabit bir referans hedefe ihtiyaç olmaksızın uygulanmıştır (Kim & Kim, 2013), (Ji & Chang, 2008).

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyi ile elde edilen dinamik parametreleri ile görüntü işleme tekniği ile istatikselsel olarak hesaplanan dinamik parametreleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve Abaqus programı ile modellenmiş, çelik çerçeve üzerinden referans alınan noktalardaki dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Görüntü işleme tekniğinde çok yaygın kullanılan, iki görüntü arasındaki hareketli objeleri bulma tekniği incelenmiştir. Genel olarak kullanılan normalize edilmiş çapraz korelasyon katsayısı yöntemi ile uygulanan görsel işleme tekniğinde oluşan hatalara farklı bir yaklaşımla bir algoritma ile çözüm bulunmuştur.

Yöntem ve Materyal

Çelik Çerçevenin Geometrik Özellikleri

3 katlı çelik çerçevenin iki kolonun merkezleri arasındaki mesafe 130 cm olup, katlar arası yükseklik 75 cm'dir. Çelik çerçevenin kolon ve kirişlerinde IPN 100 profili kullanılmıştır. Birleşim bölgelerinde L40x40x4 profili kullanılmıştır. Ayrıca profilin her iki yönünde 2'şer adet M12 bulonları kullanılarak 1450 Nm tork uygulayabilen havalı somun sıkma (Gav 2212) aleti kullanılarak bağlantı gerçekleştirilmiştir. Çerçevenin güçlü eksen kiriş-kolon birleşimi yarı rijit birleşim tipi iken zayıf eksen kolon-kiriş birleşimi mafsallı tip birleşimdir. Kolon-kolon birleşimi 4 mm levha ile 8 adet M12-8.8 bulonları ile gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak S235 çeliği kullanılmıştır. Her kat tek doğrultuda çalışan ahşap kalaslar üzerinde 750 kg statik yüke sahip yaklaşık 225 adet her biri 20x10x10 boyutlarına sahip parke taşı konulmuştur.

Tablo 1. Çeliği Mekanik Özellikleri

Minimum Çekme Gerilmesi (MPa)	360
Maksimum Akma Gerilmesi (MPa)	235
Elastisite Modülü (MPa)	200000
Yoğunluk (kg/m ³)	7850

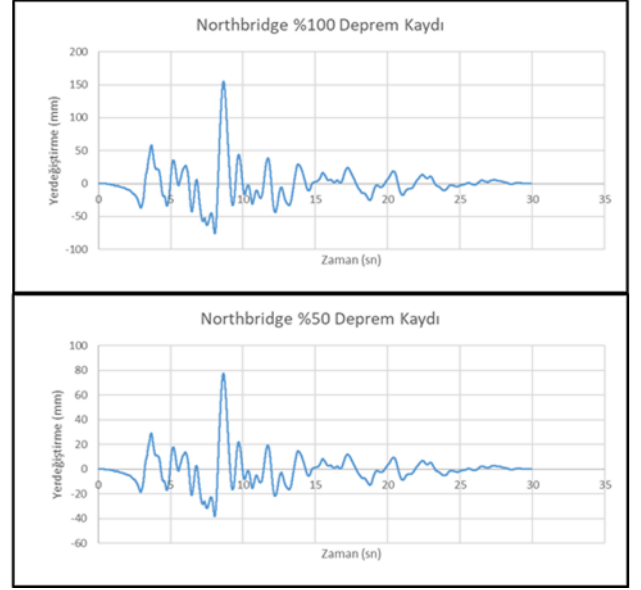


Şekil 1. Sarsma masası deney düzeneği

Yükleme Testi ve Sonuçları

Sarsma tablasının üzerinden ivmeölçer ve LVDT yardımıyla referans sismik veriler kaydedilmiştir. Gerçek ve referans sismik verileri karşılaştırmak ve aynı zamanda dinamik yer değiştirmelerini gözlemlemek için tüm deneyler aynı açıdan video kaydı alınmıştır.

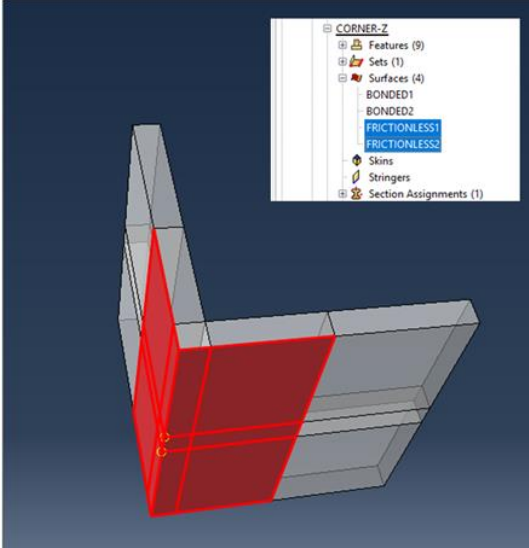
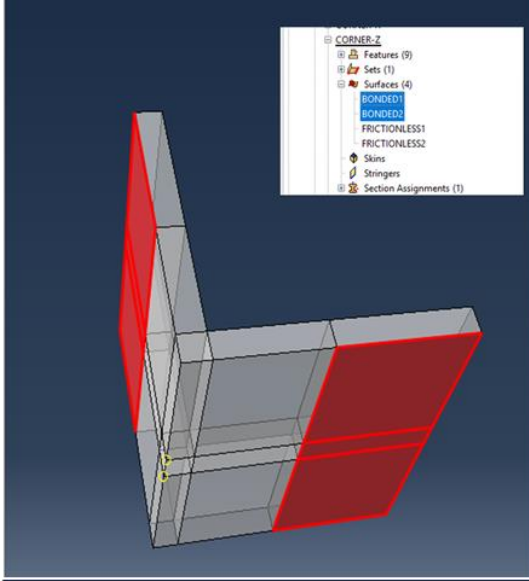
Sismik yükleme deneyi ivme parametreleri Northridge depremi için %50 ve %100 oranda uygulanmıştır (Şekil 2).



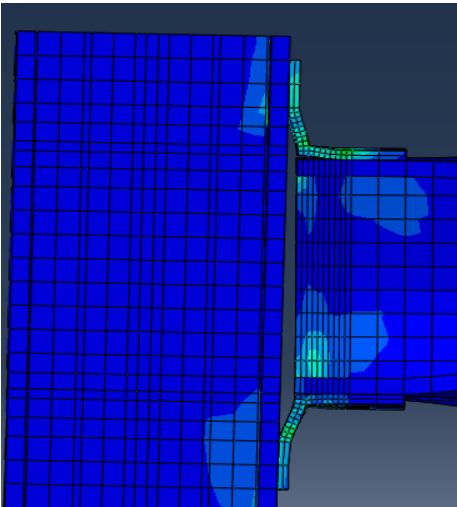
Şekil 2. Sarsma masasından alınan yatay yer değiştirme parametreleri

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

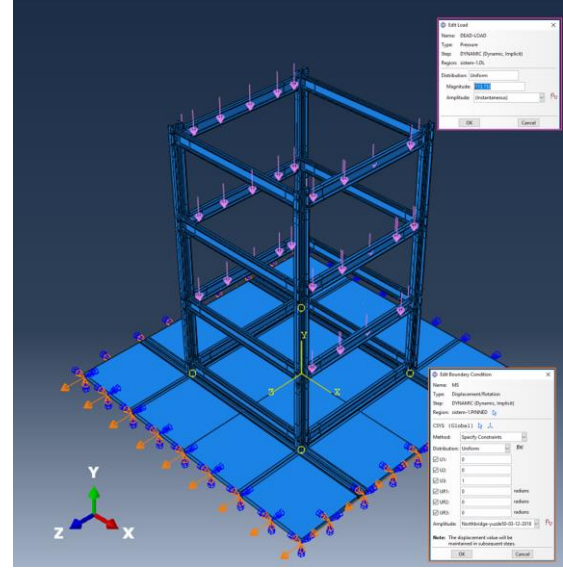
3 boyutlu çelik çerçeve deney numunesi, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile çözümleme yapan ABAQUS paket programı ile modellenmiştir. Çerçeve sistem Şekil 6'de görüldüğü gibi modellenmiştir. Birleşim bölgelerindeki L40x40x4 profil kollarının dış yüzeyleri iki eşit alana bölünmüştür. Dış yüzeylerin uç kısımları tam bağlantılı seçilirken, diğer kısımları frictionless (sürtünmesiz) olarak atanmıştır (Şekil 3). Bu şekilde tanımlama ile gerçek duruma yakın sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüştür. Sistem mesh ataması (Şekil 4) birleşim bölgelerinde sıklaştırılıp düzensizlik oluşturmayacak şekilde gerekli yerlerde özel olarak bölümlenmiştir. Statik yük ve dinamik yükler Şekil 5'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Implicit dinamik analiz ile dinamik parametreler elde edilmiştir (Şekil 6).



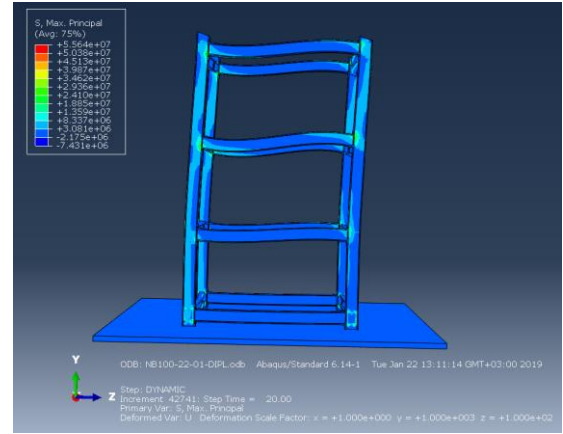
Şekil 3. Kolon kiriş birleşim detayı (z doğrultusu)



Şekil 4. Kolon-kiriş birleşimin arttırılmış deformasyon ve mesh detayı



Şekil 5. Statik ve dinamik yük atamaları



Şekil 6. Deney numunesinin Abaqus modeli ve maksimum gerilme değerleri

Görüntü İşleme Yöntemi ile Dinamik Yer Değiştirmelerin Ölçülmesi

Bu çalışmada, 3 katlı çelik çerçeve sistemi sarsma masası yardımıyla %50 ve %100 oranında ölçeklendirilmiş Northridge depremi ivme kaydı altında test edilmiş ve dinamik yer değiştirme verileri kamera ile kaydedilmiştir. Kamera sisteme yaklaşık olarak 220 cm uzaklığında ve durağan halde iken numuneye ortalanmış vaziyette dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Video kayıt cihazı olarak akıllı telefon kullanılmıştır. Akıllı telefon kamerasının çözünürlüğü 1080x1440 piksel, hızı ise 30 fps'dir. Bu görüntülerden dinamik yer değiştirme verilerinin alınabilmesi için görüntü işleme yöntemi, Matlab yazılım programı dilinde bir algoritma geliştirilmiştir.

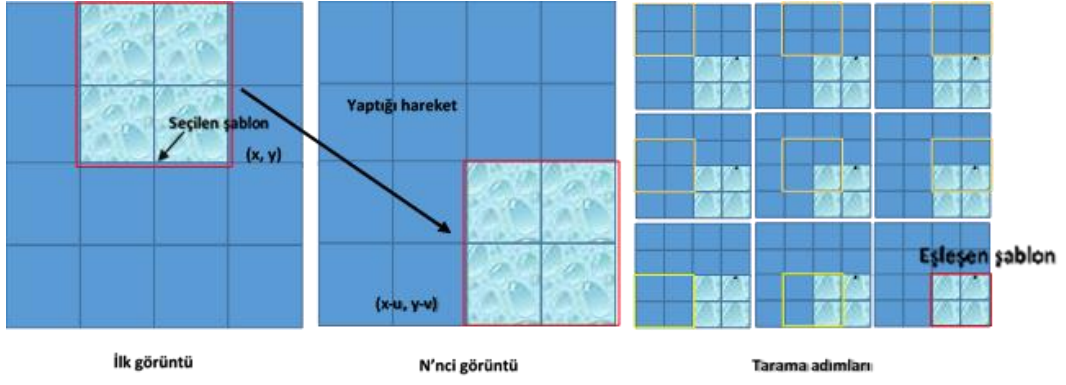
Görüntü işleme tekniğinde, ilk olarak dijital videodan alınan görüntüler bilgisayar ortamında veri biçimleri sayısallaştırılır. Her görüntü içinde RGB renk uzayına sahip sayısal matrislerden oluşmaktadır. Bu matrislerin her bir elemanı bir piksele denk gelir. Bir piksele denk gelen mm cinsinden karşılığı kameranın hedefe uzaklığı ve açısı ile değişir.

Görüntüdeki piksel değerlerinin ağırlığını belirten grafiksel bir gösterim olan histogramın düzgün yayılı hale getirilmesi (histogram eşitleme) ile görüntüler netleştirilebilir. Görüntü işleme tekniğinin ilgi alanları; görüntü iyileştirme (renk, keskinlik ve parlaklık ayarlama, gürültü giderme), görüntü bölümlenme (kenar belirleme, alan yakalama), görüntü dönüşümleri (büyütme, küçültme; döndürme), görüntü onarma, sıkıştırma, algılama, görüntüleri birleştirme, görüntüleri çıkarma vb. uygulamalardır. Bir görüntüdeki şablonun başka bir görüntüdeki yerinin tespit edilme işlemine şablon eşleştirme adı verilir. Görüntüden nokta detaylar, kenarlar ya da alanlar çıkarılarak bu ayrıntılara dayalı eşleme gerçekleştirilebilir. Görüntü boyutu, şablon görüntüsünün boyutundan büyük olmalıdır.

Sarma masası deneyinden görüntü işleme tekniği ile dinamik yer değiştirmelerin ölçülebilmesi için, numunenin üzerinde ayırt edici şekil ve renkte olan etiketler bulunmalıdır. Bu etiketler, dinamik yer değiştirmelerin tespitinde kolaylık sağlamaktadır.

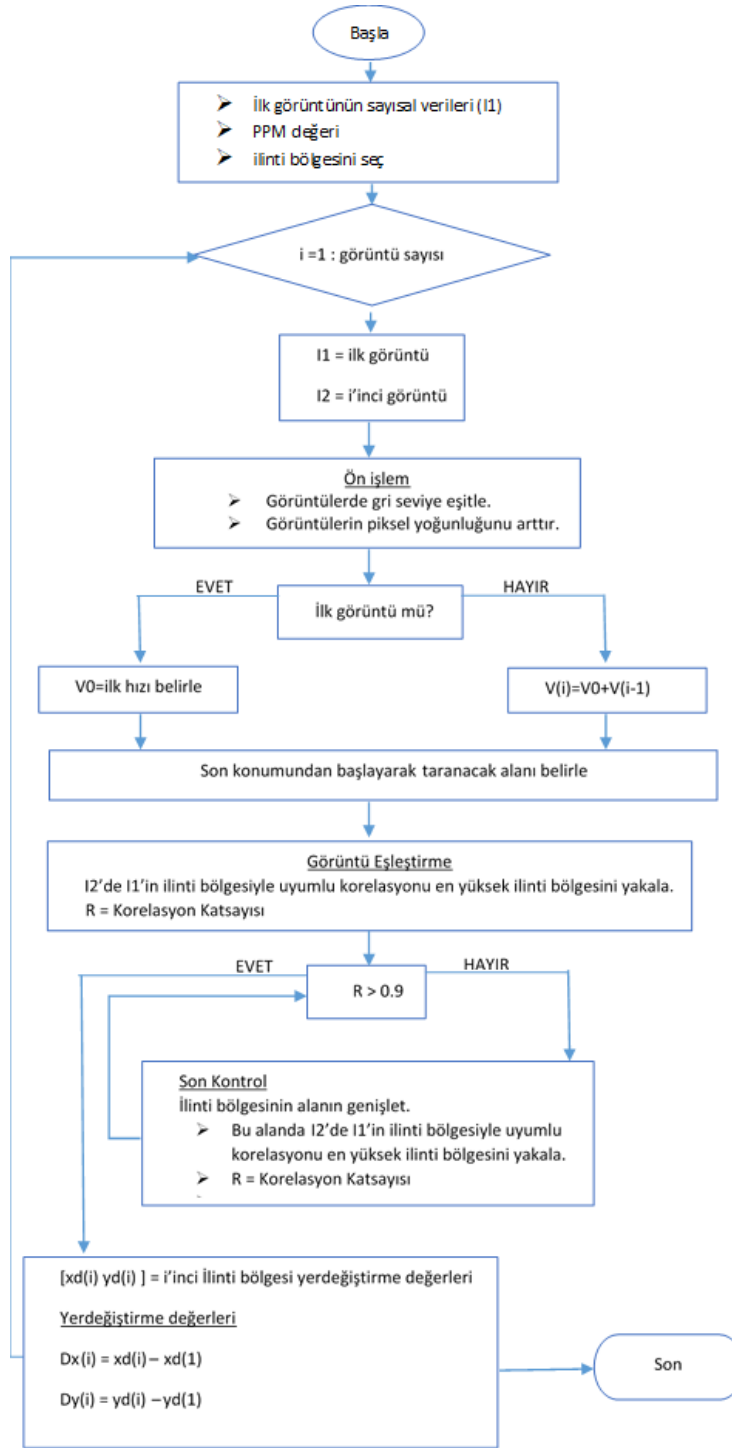
Korelasyon tabanlı şablon eşleştirme yönteminde, ilk görüntüden herhangi bir etiket şablon içine alınır, şablonun piksel bazlı koordinatları kaydedilir. İlk görüntülerde seçilen şablon ile sonraki görüntülerde en yüksek benzerliğe sahip bölge tespit edilir. Şekil 7'de görüldüğü gibi seçilen şablon referans görüntüde x ve y yönünde taranır. Fakat bu durum maliyetlidir. Bu sebeple akıllı tarama sistemleri bu maliyeti en aza indirir.

İki görüntü arasındaki benzerlik birçok yöntem ile belirlenebilir. Bu çalışmada normalize edilmiş korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. İstatistiksel olarak iki görüntü arasındaki hareketli objenin tespiti, Matlab programında hazır olarak bulunan `normxcorr2` ve `cpccorr` kodları ile yapılmaktadır. Fakat tek başına bu kodların kullanılması durumunda hesaplamalarda hataların oluşabileceği görülmüştür. Referans alınan bölge yer değiştirirken piksel derinliği, yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumda istatistiksel olarak yapılan hesaplamalarda hatalar oluşabilmektedir. Diğer yandan referans bölgesi ile aynı şekle sahip başka bölgeler olduğunda yine istatistiksel olarak hatalar oluşmakta benzer olan diğer bölgeyi seçebilmektedir. Bu oluşan hatalardan dolayı farklı bir algoritma geliştirme gereği duyulmuştur. Geliştirilen algoritmada benzerlik ilişkisi, Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden `Corr2` kodu olan, çapraz korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Fakat burada ilave olarak akıllı arama sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 7. Şablon eşleştirme yönteminin temel gösterimi

Akıllı Arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi Algoritması



Korelasyon ilişkisinin daha güçlü sağlanması ve daha hassas hareketleri bulabilmek için görüntünü piksel başına düşen metrik değeri küçültülmüştür

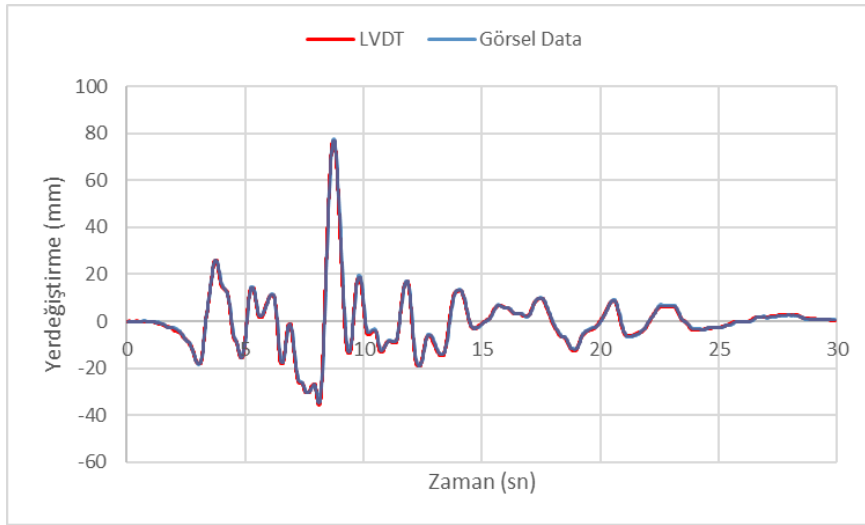
(Matlab/Toolbox/Image/Resize). Bunu yaparken lineer dağılım göstermektedir.

Seçilen bölgenin korelasyon ilişkisi istenilen seviyede değilse, ilinti alanı belirli

seviyede artırılıp global sistemdeki hareket kontrol edilir. Program global sistem hareketi ile ilinti bölgesinin taranması gereken alanı belirleyip, ilinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediğinin kontrolünü yapmaktadır. Genel olarak, bölgenin şekli değişmişse ve/veya dönme yapmışsa bu durum ortaya çıkmaktadır. Kontrol aşamasında, ilinti bölgesinin alanı artırılır. İlinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediği belirlenmektedir.

Sarsma Masası Deneyi ve Görüntü İşleme Tekniği İle Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

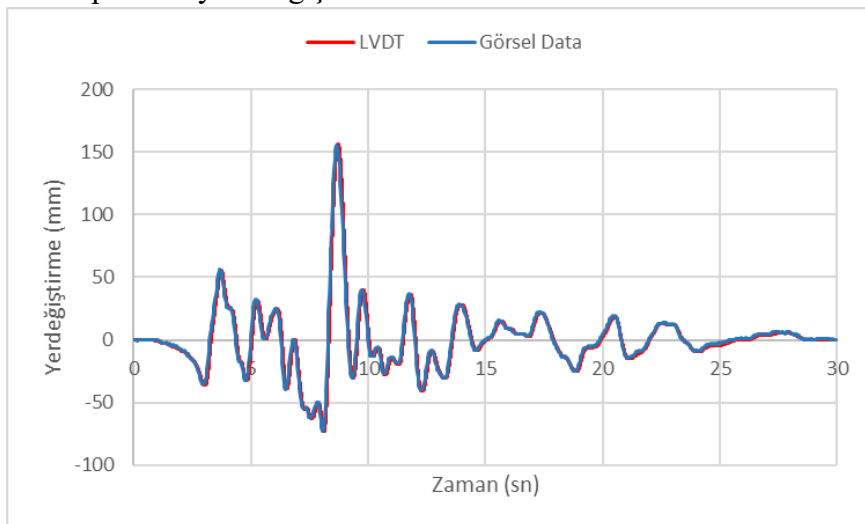
Sarsma masası üzerindeki ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), sarsma masası üzerindeki herhangi iki montaj deliğinin arası piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur.



Şekil 8. Northridge %50 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

Şekil 8'de %50 ölçekli Northridge deprem hareketi altında sarsma tablasına uygulanan yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından hesaplanan yer değiştirme

değerleri zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9971 olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Northridge %100 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

Şekil 9'da görüldüğü üzere %100 ölçekli Northridge deprem kaydının sarsma tablasına uyguladığı yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından elde edilen verilerin yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9982 olarak bulunmuştur.

Görüldüğü üzere sarsma masası üzerinden alınan yer değiştirmeler ile görüntüden hesaplanan yer değiştirmeler arasında %0.1'in altında bir hata oranı bulunmuştur. Görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik parametrelerin doğruluğu bu şekilde kanıtlanmıştır. Bundan sonraki aşamada çelik çerçeve numunesi Abaqus programında

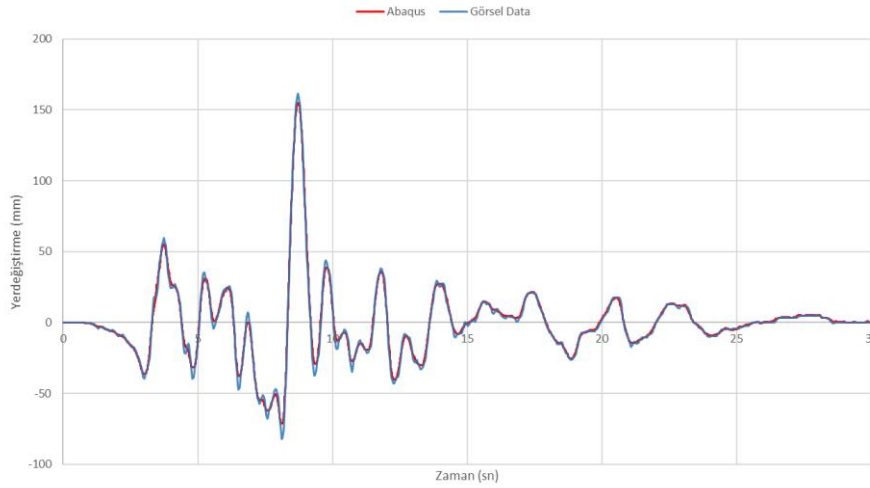
modellenmiş ve buradan alınan veriler ile görüntü işleme tekniği ile elde edilen yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır.

Abaqus Programı ve Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

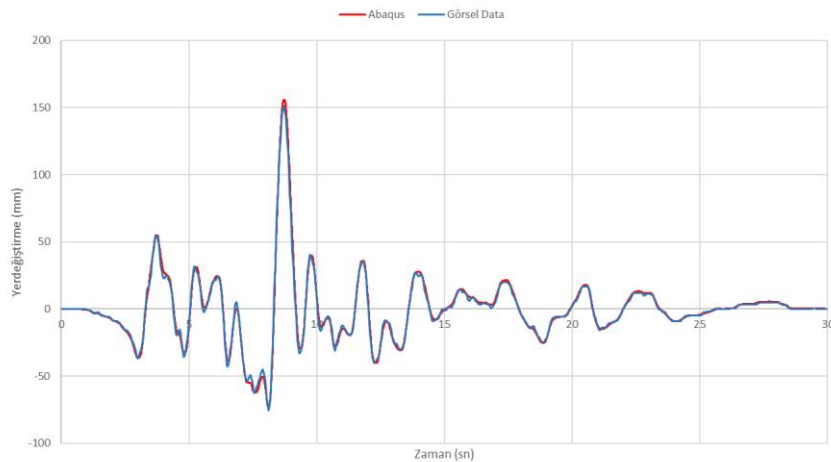
Tüm ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), bulonlar arası mesafe piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur.

Referans şablonun kameranın merkez noktasından uzaklığı ve açısı ile PPM değeri de değişeceği için hesaplamalarda en yakın bulonlar arası mesafe ile PPM değeri bulunmuştur.

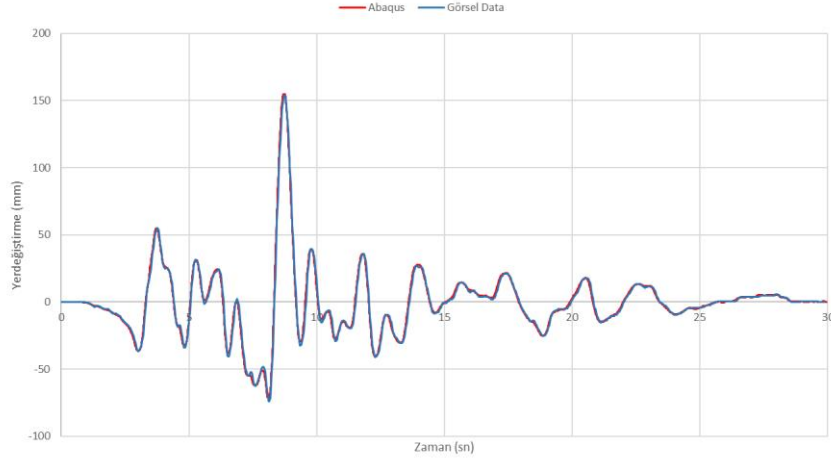
%100 ölçekli Northridge deprem kaydı için yatay yer değiştirme parametreleri



Şekil 10. Northridge %100 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerinin karşılaştırılması

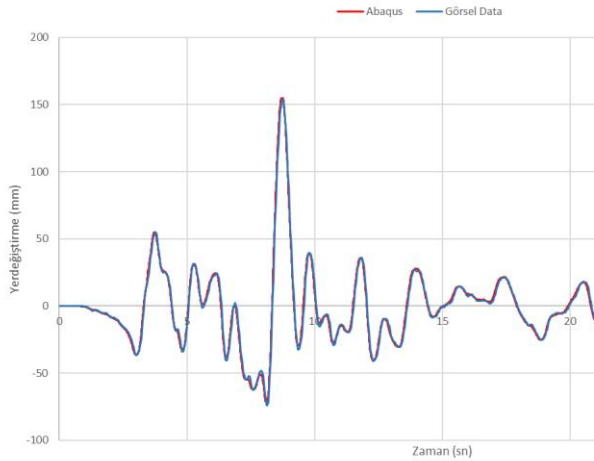


Şekil 11. Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerinin karşılaştırılması



Şekil 12. Northridge %100 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

Şekil 10'da görüldüğü gibi 3. kat sol kolonun üst kısmında PMM değeri 2.2 mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9855 olarak bulunmuştur. Şekil 11'de görüldüğü gibi 2. kat sol kolonunda PMM değeri 2.1 mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9915 olarak bulunmuştur.



Şekil 12'de görüldüğü gibi 2. kat sol kolonun üst kısmında PMM değeri 2.2mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9955 olarak bulunmuştur.

Abaqus programından alınan yer değiştirmeler ile şablon eşleştirme yöntemi ile alınan yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde çelik çerçevenin en üst katından alt katlara doğru gidildikçe grafikler arası korelasyon

katsayısının arttığı ve grafiğin tepe ve dip noktalarındaki sapmaların azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin Abaqus programında parke taşların arasında oluşan küçük boşlukların oluşturacağı titreşimlerin göz ardı edilmesidir. En üst katta yer değiştirme daha büyük olduğu için bu etki daha fazla görülmektedir.

Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyinde LVDT ve ivmeölçer ile edilen dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik parametreler ile karşılaştırılmıştır. Görüntü işleme tekniği akıllı tarama sistemi geliştirilerek hata yapma oranı en aza indirgenmiştir. Bunun sonucunda hata oranları % 0.1'in altında bulunmuştur. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi Abaqus SE programı ile modellenmiş olup, çelik çerçeve üzerinde referans alınan noktalardaki yatay dinamik yer değiştirmeler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Farklı ölçeklerde uygulanan Northridge deprem kayıtları için tüm karşılaştırma grafiklerine bakıldığında grafiğin en üst ve en alt noktalarındaki değerler arasında fark olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin Abaqus SE modelinde parke taşlarının titreşim etkisinin göz ardı edilmesi olduğu

düşünülmektedir. Uygulanan deprem hareketinin hızı sifıra yaklaştığında parke taşlarının titreştiği gözlenmiştir. Ayrıca referans şablon artı yönde yaptığı hareket kameranın görüntü merkezine yaklaşmakta, eksi yönde yaptığı hareket ise kameranın görüntü merkezinden uzaklaşmaktadır. Burada da mm/piksel değeri değişmektedir. Bu çalışmada tek bir mm/piksel değeri belirlenmiştir. Hareketin kamera merkezine en yakın ve en uzak olduğu durumlarda hatalar oluşabilmektedir. Genel olarak hata oranı kabul edilebilir düzeyde kalmakla birlikte istenirse, (Choi, Kim, & Kim, 2016), (Khuc & Catbas, 2017) ve (Feng & Feng, 2017)'de olduğu gibi bu düzeltmeler yapılabilir.

Görüntü işleme tekniği ile dinamik analiz deneyimleri sonucunda önem arz eden bazı hususlar fark edilmiştir. Deney esnasındaki video kaydı yapan kameranın çözünürlüğü ve hızı arttıkça elde edilen veriler daha sağlıklı olmaktadır. Çözünürlüğü az olan bir kamera görüntüsünün boyutu değiştirilerek (Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden resize kodu ile görüntünün boyutu değiştirilmiştir) mm/piksel oranı artırılabilir. Bu işlem çözünürlük sorunu büyük oranda çözebilmektedir. Fakat yüksek hızlı yer değiştirmelerde kameranın kaydetme hızının önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kameranın dinamik parametreleri alınmak istenilen noktaya olan uzaklığı ve açısının artması yine görüntü işleme tekniğinde maliyetli bir durumdur. Burada önem arz eden husus elde edilen verilerin hata oranını kabul edilebilir seviyede tutacak kamera uzaklığı ve açısı belirlemektir. Ayrıca deney numunesinin ve referans noktalarının birbirine zıt iki renk seçilmesi görüntü işleme analizini kolaylaştıracaktır.

Bu çalışmada olduğu gibi sarsma masası deneyinde, büyük ölçekli bir deneysel numune kullanıldığında birçok noktadan dinamik parametreler elde edilmek istenebilir. Ölçüm aletlerinin numune üzerine yerleştirilmesi, ölçümlerin hassasiyeti, ölçüm alınan noktaların

fazlalığı bu dinamik parametrelerin elde edilme maliyetini arttırır. Fakat görüntü işleme tekniği kullanılarak dinamik parametreler daha ekonomik olarak elde edilebilir. Ayrıca görüntü işleme tekniği ile yer değiştirme parametreleri tayininde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Anlaşılacağı üzere birçok yöntemeye göre görüntü işleme tekniği çok daha pratik ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

Gelecekte yapılacak sarsma tablası deneylerinde alınacak video kayıtlarında yüksek kayıt hızına sahip kamera kullanılması ile daha hassas sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan Sarsma Tablası için Kalkınma Ajansına TR10/15/YNK/034 Nolu Proje'ye sağladığı desteklerinden dolayı teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

- Choi, I., Kim, J., & Kim, D. (2016). A Target-Less Vision-Based Displacement Sensor Based on Image Convex Hull Optimization for Measuring the Dynamic Response of Building Structures. *Sensors*, 16, 1-17.
- Erdoğan, Y. S. (2018). Sayısal Görüntü İşleme ile Titreşim Yer Değiştirmelerinin Ölçümü ve Modal Parametre Tayini. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 401-415.
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2017). Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 88, 199-211.
- Fırat Alemdar Z., B. J. (2011). Photogrammetric Measurements of Rc Bridge Column Deformations, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 33 Issue 8 , 2407-2415.
- Fırat Alemdar, Z., Bilici, S., & Alemdar, F. (2018). Photogrammetric

- Measurements of Rc Bridge Column Deformations. *Sigma J Eng & Nat Sci* 9(2), 149-156.
- Freng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D., & Mizuta, M. (2015). Nontarget Vision Sensor for Remote Measurement of Bridge Dynamic Response. *Journal of Bridge Engineering*, 20, 1-11.
- Ji, Y. F., & Chang, C. C. (2008). Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement. *Journal of Bridge Engineering*, 13, 34-42.
- Jo, B.-W., Lee, Y.-S., Jo, J., & Khan, R. (2018). Computer Vision-Based Bridge Displacement Measurements Using Rotation-Invariant Image Processing Technique. *Sustainability*, 10, 1785.
- Khuc, T., & Catbas, F. N. (2017). Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*, 24.
- Kılınç , İ. (2009). *Çelik Malzemelerde Korozyon Oyuklarının Görüntü İşleme Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi*. Sakarya: Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Kim, S. W., & Kim , N. S. (2013). Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing. *NDT&E International*, 59, 25-33.
- Mahdavi, M. (2014). *Arı-I Sarsma Masası Performans Değerlendirmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Onat, M. (2008). *Dijital görüntü işleme yöntemleriyle lifli beton numunelerindeki çatlakların tespit edilmesi*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Measurement of dynamic parameters in shaking table tests with image processing method

Extended abstract

In this study, the dynamic parameters of the 3-dimensional steel frame experimental sample obtained by the shaking table experiment and the dynamic parameters calculated by image processing technique are compared. In addition, the 3D steel frame was modeled with the Abaqus program and the dynamic parameters at the reference points on the steel frame were compared with the data obtained by image processing technique. The technique of finding moving objects between two images, which is widely used in image processing technique, is examined. The solution has been found by using an algorithm with a different approach to the errors in the visual processing technique applied by the normalized cross correlation coefficient method.

It has been observed that errors can occur in calculations if the cross-correlation coefficient and the template matching method are used alone. When changing the reference area, the pixel depth may vary depending on the displacement and deformation. In this case, errors can occur in the statistical calculations. On the other hand, when there are other regions with the same shape as the reference region, statistical errors can be selected and the other region which is similar is selected. Therefore, a smart scanning system has been developed. The movement area of the referenced template is calculated by adding the standard deviations to the speed obtained by the displacement of the selected template in the temporal area so that it does not deviate to other similar regions a while the correlation zones are being scanned. If the correlation relationship of the selected region is not at the desired level, the template area is increased at a certain level. With the global system movement, the program determines the area to be screened for the template region and checks whether the correlation zone is correctly identified.

As a result, the dynamic parameters of the 3-dimensional steel frame experimental specimen, the LVDT and the accelerometer in the shaking table experiment were compared with the dynamically calculated dynamic parameters by the image processing technique. The image

processing technique is developed by intelligent scanning system and the error rate is minimized. As a result, the error rates were less than 0.1%. In addition, the 3D steel frame system was modeled with the Abaqus SE program and the horizontal dynamic displacements at the reference points on the steel frame were compared with the data obtained by the image processing technique. When the comparison graphs for Northridge earthquake records are applied at different scales, it is seen that there is a difference between the values at the top and bottom points of the graph. The reason for this is that the vibration effect of the paving stones in the Abaqus SE model is considered to be ignored.

As in this study, it is desirable to obtain dynamic parameters from many points when a large scale experimental sample is used in the shaking table experiment. The placement of the measuring instruments on the sample, the accuracy of the measurements, the excess of the measured points, increase the cost of obtaining these dynamic parameters. However, dynamic parameters can be obtained more economically by using image processing technique. In addition, very good results were obtained in the determination of displacement parameters by image processing technique. As it will be understood, in many ways the image processing technique offers much more practical and economical solutions.

Keywords: *Shaking table experiment, Visual processing technique, Normalized cross correlation coefficient, Dynamic parameters of steel frame*