



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.04.2020
Kabul Tarihi : 08.05.2020

Received Date : 21.04.2020
Accepted Date : 08.05.2020

GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ İLE BETONARME KİRİŞ DEPLASMANLARININ BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF REINFORCED CONCRETE BEAM DISPLACEMENTS BY IMAGE PROCESSING METHOD

Selçuk KAÇIN^{1*} (ORCID: 0000-0001-5406-5756)

Mesut AYDIN² (ORCID: 0000-0002-6263-1284)

^{1,2}İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Selçuk KAÇIN, selcuk.kacin@iste.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada 150x230x1400 mm boyutlarındaki, eğilme deneyine tabi tutulan betonarme kirişlerin davranışı görüntü işleme metodu kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Kirişlerde yükleme sonucu oluşan çatlakların tespit edilmesi, kiriş yüzey gerilmelerinin zamana bağlı değişiminin görselleştirilmesi ve kirişlerin yüzeyinde oluşacak olası çatlakların çatlama olmadan önce belirlenmesi amacı ile görüntü işleme tekniği kullanılmaktadır. Kirişlerdeki zamana bağlı oluşan deplasmanların görüntü işleme tekniği ile belirlenerek, klasik yöntem olan deney düzeneğinden deplasman ölçerle elde edilen deplasman değerleri ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla kirişler eğilme düzeneğine alınmadan önce birtakım boyama işlemlerine tabi tutulmuş daha sonra yüksek çözünürlüklü kamera ile video kayıtları alınmıştır. Elde edilen görüntüler görüntü işleme paket programları ile analiz edilerek deplasman değerleri, çatlaklar ve gerilme dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deney özelinde görüntü işleme tekniğinin inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında kullanımının avantajları tartışılarak deneysel çalışmalarda etkin bir araç olarak kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: görüntü işleme, kiriş deplasmanı, kiriş eğilme deneyi, kirişlerde çatlak, kirişlerde gerilme

ABSTRACT

In this study, the behavior of 150x230x1400 mm sized reinforced concrete beams, which were subjected to bending experiment, was tried to be determined by using image processing method. Image processing technique is used to detect cracks formed as a result of loading in beams, to visualize the change of beam surface stresses over time and to determine possible cracks on the surface of beams before they crack. It is aimed to determine the displacement of the timers on the beams with the image processing technique and to compare them with the displacement gauge obtained from the classical test method. For this purpose, the beams were subjected to a number of painting processes before they were taken into the bending mechanism, and then video recordings were taken with a high resolution camera. The obtained images will be analyzed with image processing package programs, and displacement values, cracks and stress distribution will be determined. In this experiment, the advantages of using image processing technique in civil engineering laboratory applications will be discussed.

Keywords: image processing, beam displacement, beam bending test, beam crack, beam stress

ToCite: KAÇIN, S., & Aydın, M., (2020). GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ İLE BETONARME KİRİŞ DEPLASMANLARININ BELİRLENMESİ *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 107-117.

GİRİŞ

Günümüzde bilgisayar teknolojileri neredeyse hayatın her alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun nedeni yapılan birçok işlemi daha hızlı, sistematik ve pratik bir şekilde gerçekleştirerek bize kolaylık sağlamasıdır. Teknolojinin her geçen gün gelişmesine paralel olarak bilgisayarlar da daha güçlü ve hızlı bir hale gelmektedir. Bu da bilgisayarlarla yapılabilecek işlemleri çeşitlendirmektedir. Görüntü işleme (image processing) de bunlardan bir tanesidir (Jähne, 2004).

Görüntü işleme metodu tıpkı insan görme sisteminin görüntüleri algılayıp tanımlaması ve değerlendirmesine benzemektedir. Görüntü işleme kısaca dijital görüntü alıcılar vasıtasıyla görüntülerin alınıp bir takım işlem adımlarına tabi tutularak bilgisayarca tanımlanması ve istenilen amaca uygun olarak görüntülerin yorumlanması olarak tanımlanabilir (Çankaya & ark., 2013; Bilici, 2017; Jähne, 2004). Görüntü işlemeden günümüzde tıp, biyomedikal, uzay ve havacılık, savunma sanayisi, mühendislik, sanat, eğitim gibi pek çok alanda faydalanılmaktadır (Çomak & ark., 2011). Son yıllarda inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında görüntü işleme metodunun kullanımı yaygınlaşmaktadır. Görüntü işlemenin inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında kullanılmasına yönelik literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur (Yue & ark., 1995; Mora ve ark., 1998; Coster & Chermant, 2001; Chambon & Moliard, 2011; Moon & ark., 2014; Dal, 2018; Kurt, 2018; Yılmaz, 2019; Aydın, 2019).

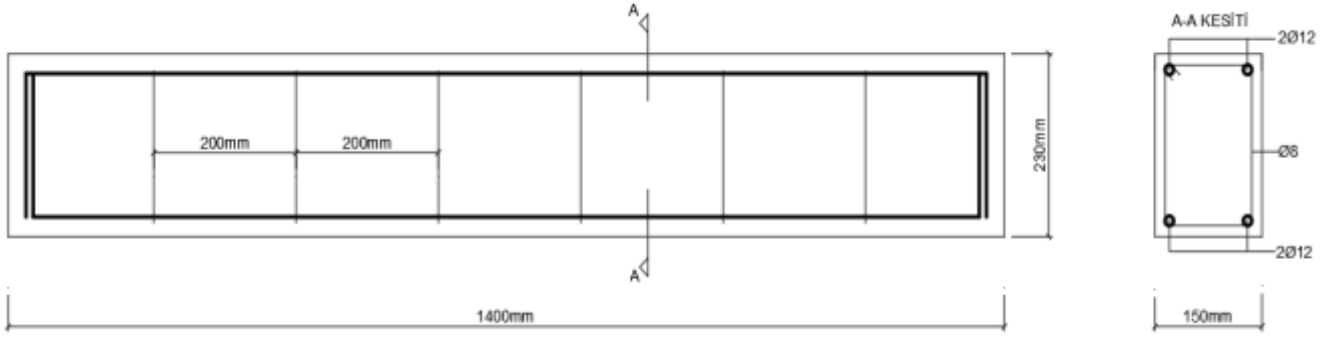
Betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneylerde de görüntü işleme metodu kullanılmaktadır (Onat, 2008; Çankaya & ark., 2013; Lee & ark., 2011; Rimkus & ark., 2015; Liu & ark., 2016; Bilici, 2017; Doğan, 2018). Bu deneylerden bir tanesi de üç nokta eğilme deneyidir. Üç nokta eğilme deneyi sabit iki mesnet üzerine yerleştirilen kirişin orta noktasından düşey yük uygulanarak kirişin bu yüke karşı gösterdiği mukavemetin ve bu yük altında göçünceye kadar yaptığı düşey deplasmanın zamana bağlı olarak ölçülmesidir (Çapık, 2015; Mindivan, 2017). Geleneksel yöntemlerde kirişin zamana bağlı olarak yaptığı deplasman kirişin alt orta noktasına yerleştirilen deplasman ölçerinin kablolulu bir sensör ağıyla bilgisayara bağlanarak birim zamanda yapılan deplasmanın kaydedilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Bunlar deplasmanın sadece deplasman ölçerinin konulduğu noktadan ölçülebilmesi, kullanılan araç-gereçlerin pahalı olması, ölçümün yapılabilmesi için önemli miktarda kablolanmanın gerektiği bir sensör ağına ihtiyaç olması ve sistemin kurulumu için fazladan zaman, enerji harcanması şeklinde sıralanabilir (Bilici, 2017; Karameşe, 2018). Ayrıca numunelere fiziksel olarak temas eden ölçüm aletlerinin sistemin doğal davranışını bozması gibi bir olasılıkta mevcuttur (Doğan, 2018). Geleneksel yöntemlerin bu dezavantajlarından dolayı alternatif yeni yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Klasik yöntemlerle kıyaslandığında görüntü işleme ile kiriş deplasmanının belirlenmesi; her hangi bir kablolulu sensör ağına ihtiyaç duyulmaması yönüyle zamandan ve enerjiden tasarruf edilmesi, kirişin istenilen herhangi bir noktasında oluşan deplasmanın ölçülmesi yönüyle daha efektif çalışma imkânı sağlaması, sisteme temas etmemesi yönüyle sistemin doğal davranışına etki etmemesi, deneyler tamamlandıktan sonra bile video kayıtlarından ölçüm alınabilmesi ve pahalı deney aletlerinin kullanımının kısıtlanması yönüyle de deney maliyetini düşürmesi gibi avantajları vardır (Karameşe, 2018; Onat, 2008).

Bu çalışmada, eğilme deneyine tabi tutulan betonarme kirişlerin zamana bağlı olarak yaptığı deplasman değerleri görüntü işleme ve klasik sensör ölçümüne dayalı teknikler kullanılarak belirlenmiştir. İki farklı ölçüm tekniği karşılaştırılarak görüntü işleme tekniğinin bu analizlerde kullanılabilirliği irdelenmiştir. Ayrıca kirişlerin yüzey gerilmeleri ve yüzeylerinde oluşan çatlakların zamana bağlı değişimi görsel olarak analiz edilmiştir.

MATERYAL

Malzeme

İskenderun Teknik Üniversitesi yapı laboratuvarında makro sentetik fiber lif katkılı ve katkısız kirişlerin eğilme deneyleri için hazırlanmış olan 150 mm eninde 230 mm yüksekliğinde ve 1400 mm uzunluğunda 2 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişlerin boyutları ve donatıları birbirileri ile özdeş olup Şekil 1’de gösterildiği gibidir. Donatı olarak S420 nervürlü betonarme çeliği kullanılmıştır. Boyuna donatı çapı 12 mm ve enine donatı (etriye) çapı 8 mm’dir.



Şekil 1. Kiriş Boyutları

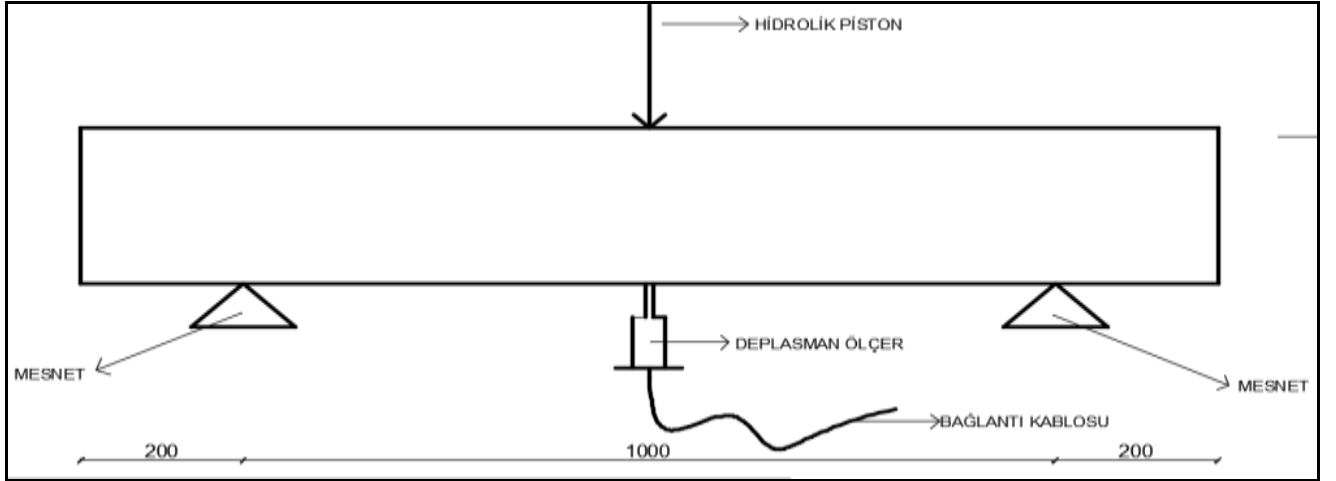
Kiriş numunelerine ait beton karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir. Kirişlerin beton karışımları hazırlanırken Kiriş-1 katkı maddesi kullanılmadan, Kiriş-2 hacimce % 0,4 oranında makro sentetik fiber lif katkı maddesi kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 1. Kiriş Numunelerine Ait Beton Karışım Oranları

Numune	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	0-4 mm agrega (kg/m ³)	4-11 mm agrega (kg/m ³)	MSF (kg/m ³)
Kiriş-1	271.35	135.67	488.42	325.62	0
Kiriş-2	271.35	135.67	488.42	325.62	4

Üç Nokta Eğilme Deneyi ile Kiriş Deplasmanlarının Belirlenmesi

Üç nokta eğilme deneyi ile kirişlerin zamana bağlı yaptığı düşey deplasman belirlenirken; iki sabit mesnet arasında yerleştirilen kiriş numunelerinin üst orta noktasından hidrolik bir piston yardımı ile düşey yük uygulanır. Kirişlerin alt orta noktasına yerleştirilen deplasman ölçer bilgisayara bağlanarak kirişlerin zamana bağlı düşey yönde yaptığı deplasmanlar elde edilir.



Şekil 2. Kirişlerin Deney Düzenine Yerleşimi

İskenderun Teknik Üniversitesi yapı laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde kirişler Şekil 2 ve Şekil 3’de görüldüğü gibi açıklığı 1000 mm olacak şekilde mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra 50 ton yük uygulama kapasiteli hidrolik piston ile açıklık ortasından yük uygulanmıştır. Deplasman ölçer vasıtası ile kirişlerin zamana bağlı yaptığı düşey deplasmanlar belirlenmiştir.



Şekil 3. Üç Nokta Eğilme Deney Düzenegi

Görüntü İşleme Metodu İle Kiriş Deplasmanlarının Belirlenmesi

Görüntü nesne üzerine gelen ışığın yansımalarıdır (Dinçer, 2009). Görüntü işleme doğada var olan görüntülerin optik bir alıcı vasıtasıyla alındıktan sonra bu görüntülerin bilgisayar ortamına aktarılarak burada görüntüden istenilen amaca göre bilgi çıkarma işlemidir. Görüntü işleme ile ilgili birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir (Karameşe, 2018). Bu çalışmada görüntü işleme için **Gom Correlate** bilgisayar programı kullanılmıştır. Gom Correlate dijital görüntü korelasyonu tekniği ile sisteme temas edilmeden deformasyon ölçümlerinin ve gerilme yığılmalarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Gom Correlate, yazılımı kendi içerisinde gömülü halde hazır bulunan bir görüntü işleme programıdır. Programın temel çalışma mantığı görüntü içerisindeki noktaların başlangıç konumundan itibaren yer değiştirmelerinin takibine dayanmaktadır. Video başlangıcında görüntü çerçevesi içerisindeki noktaların yerleri program tarafından otomatik olarak belirlenir daha sonra video ilerledikçe ardışık iki görüntü çerçevesi arasındaki noktaların görece yer değiştirmeleri birbiriyle ilişkilendirilir ve video sonuna kadar bu işlem tekrar edilir. Böylelikle noktaların başlangıçtan son duruma kadar yer değiştirmeleri belirlenmiş olur (GOM Metrology, 2011). Mevcut programda görüntü karesi piksellerden oluşmaktadır. Dolayısıyla uzunluk ölçümü yapılabilmesi için piksellerin metrik kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada metrik kalibrasyon kiriş yüksekliği baz alınarak yapılmıştır.

Kiriş numunelerinin görüntü işleme aşamaları:

- Hazırlanan kirişlerin (Şekil 4) yüzeyindeki noktaların bilgisayar programınca daha net seçilebilmesi amacıyla, kirişlerin kamera kaydı alınacak yüzeyleri önce beyaza boyandı daha sonra oluşan beyaz yüzey üzerinde noktalar oluşacak şekilde siyah boya ile püskürtme/sıçratma yapılarak boyandı (Şekil 5).

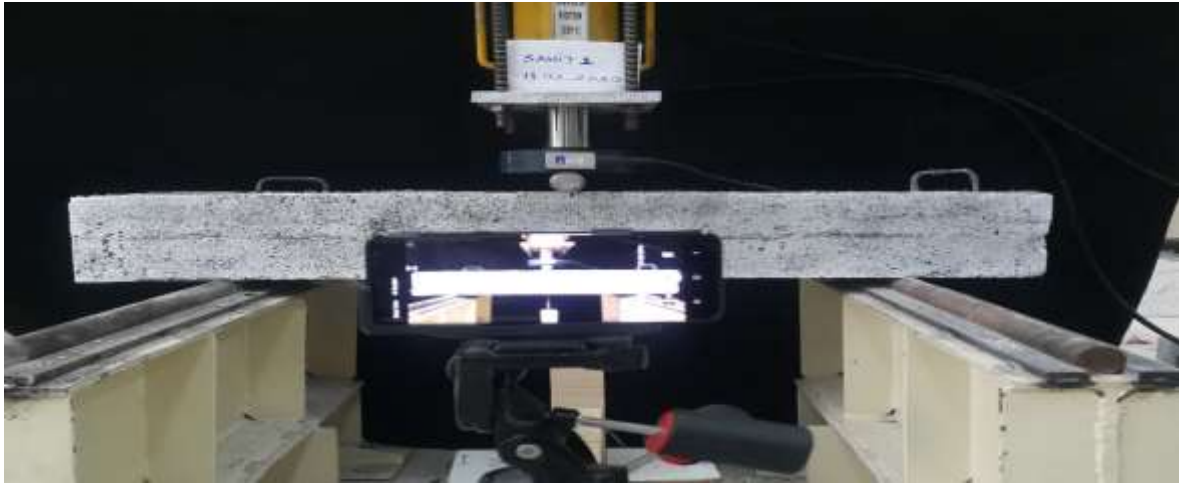


Şekil 4. Kiriş Numunelerinin Boyanmadan Önceki Hali



Şekil 5. Kiriş Numunelerinin Boyandıktan Sonraki Hali

- Daha sonra kirişler boyalı yüzeyleri kameraya bakacak şekilde deney düzeneğine yerleştirildi. Kirişlerin yüzeyini tam dik açıyla çekebilecek biçimde kamera sabitlendi. Çekim için 3840x2160 piksel çözünürlüğünde ve 30 fps (frame per second, saniyedeki görüntü karesi sayısı) video kayıt özelliğine sahip cep telefonu kamerası kullanılmıştır. Çekimler başlamadan önce yine noktaların programca daha rahat seçilebilmesi için deney düzeneğinin arkasına siyah fon perde çekilerek kirişlerin ilk yük aldığı andan göçünceye kadarki davranışlarının video kayıtları alınmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Kamera Kayıt Düzeneği

- Alınan video kayıtlarının görüntü işleme teknolojisi kullanılan paket program ile de analiz edilerek kirişlerin zamana bağlı yaptığı düşey deplasman değerleri ve yüzey gerilmeleri belirlenmiştir.

BULGULAR

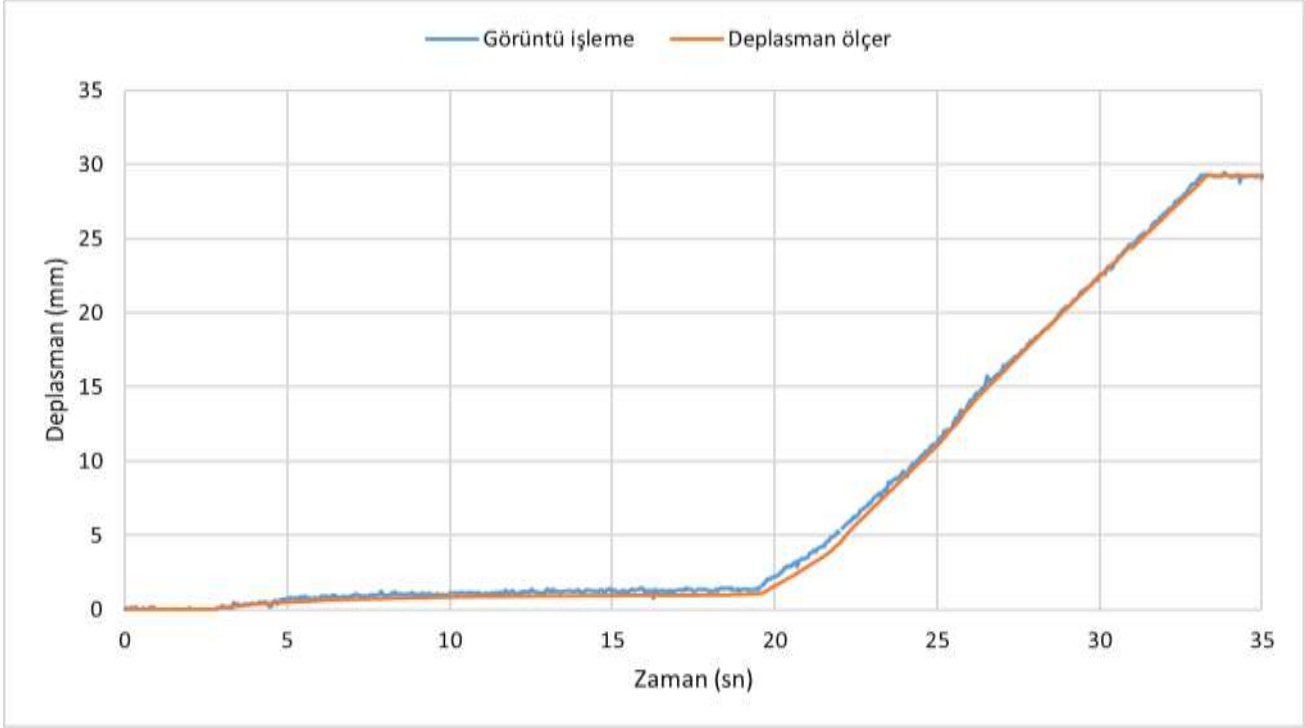
Bu bölümde deneye tabi tutulan kirişler Kiriş-1 ve Kiriş-2 olarak adlandırılmıştır. Her iki numune için yükleme başlangıcından kirişlerin göçtüğü ana kadarki video kayıt uzunluğu, deplasman ölçerden ve görüntü işlemeden elde edilen maksimum deplasman değerleri ve mutlak yüzde hata oranları Tablo 2’de gösterilmiştir. İki yöntemden elde edilen kirişlerin düşey yönde yaptığı maksimum deplasman değerleri bir biriyle karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu ve hata oranının %1’in altında olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Kirişlerin Düşey Yönde Yaptığı Maksimum Deplasmanlar

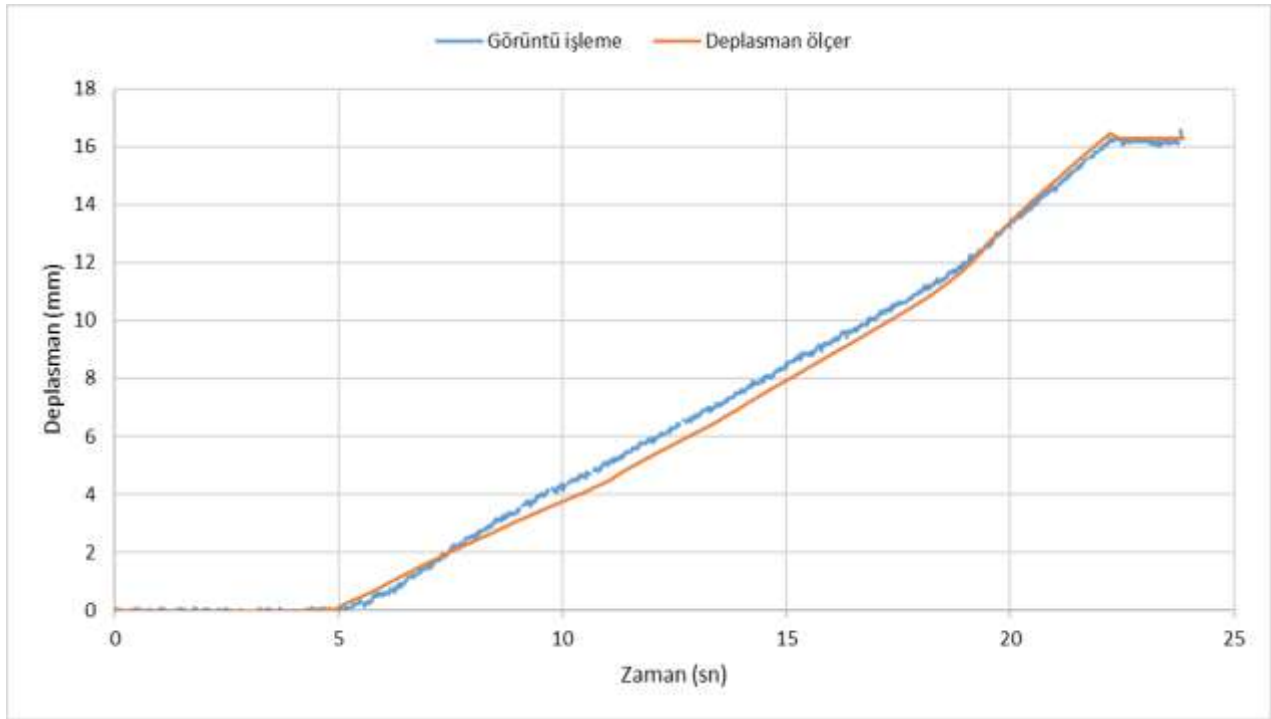
	Video Kayıt Süresi (sn)	Maksimum Deplasmanlar (mm)		Mutlak Hata Oranı (%)
		Deplasman Ölçer	Görüntü İşleme	
Kiriş-1	35	29.31	29.34	0.10
Kiriş-2	23	16.43	16.56	0.78

Deplasman-Zaman Grafikleri

Kirişlere ait deneysel çalışmadan deplasman ölçerle ve görüntü işleme ile elde edilen deplasman zaman grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8’ deki gibi bulunmuştur. Grafiklerden kirişlerin deneylerden ve görüntü işlemeden elde edilen zamana bağlı yaptığı düşey deplasmanlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



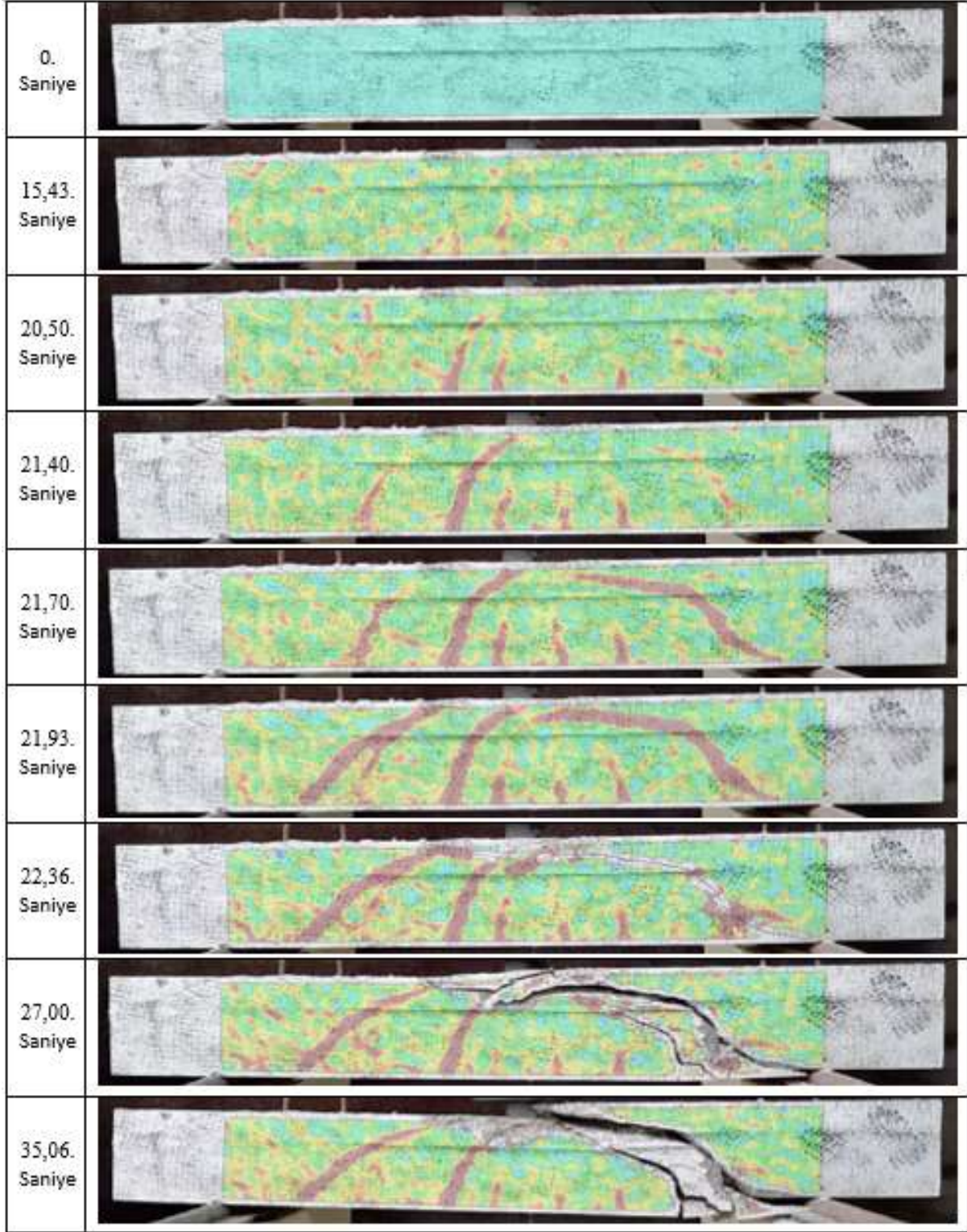
Şekil 7. Kiriş-1 Deplasman-Zaman Grafiği



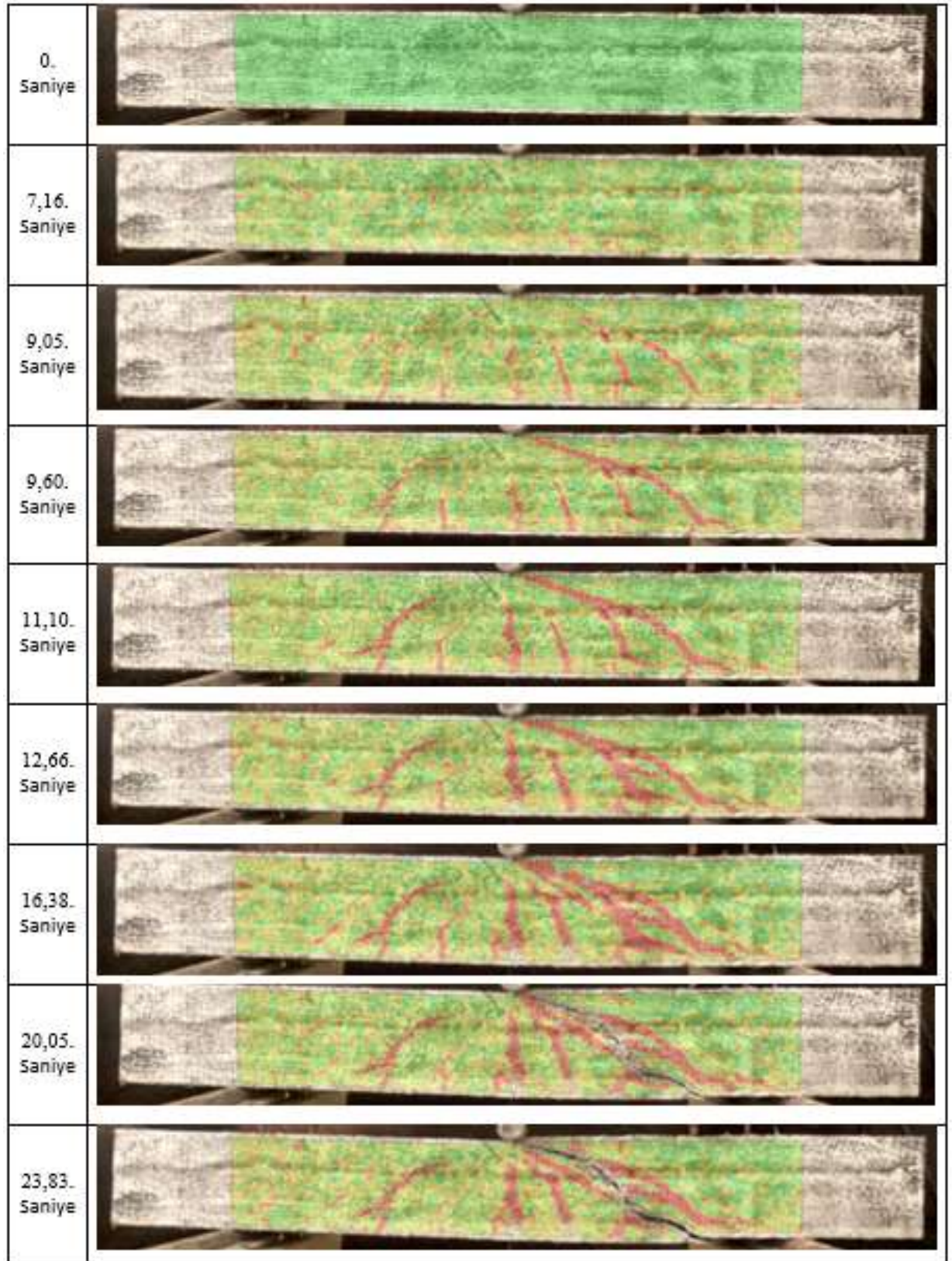
Şekil 8. Kiriş-2 Deplasman-Zaman Grafiği

Yüzey Gerilmeleri

Görüntü işleme sonucunda elde edilen kiriş yüzey gerilmeleri deneyin başlangıcından sonuna kadar, yani kirişlerin göçtüğü ana kadar aşamalı olarak Şekil 9 ve Şekil 10'daki gibi elde edilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü gibi kiriş yüzeyinde oluşan çatlaklar, kiriş yüzeyinde gerilmenin fazla olduğu kırmızı renk ile gösterilen bölgelerde gerçekleşmiştir.



Şekil 9. Kiriş-1 Numunesinin Yüzeyinde Oluşan Gerilmelerin Zamana Bağlı Değişimi



Şekil 10. Kiriş-2 Numunesinin Yüzeyinde Oluşan Gerilmelerin Zamana Bağlı Değişimi

Bu çalışmadan yola çıkılarak görüntü işleme yöntemi kullanılarak, eğilmeye tabi tutulan kirişlerin düşey deplasmanlarının belirlenmesine yönelik deneylerde analiz sonuçlarını etkileyen parametreler ile ilgili öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Video kaydının alındığı kameranın çözünürlüğünün ve saniyede aldığı görüntü sayısının (frame per second), kullanılan deneyin hassasiyetine uygun olarak seçilmesi.
- Deneye tabi tutulan kirişlerin, görüntüsü alınacak yüzeyi ile kamera lensinin paralel olarak ve kiriş yüzeyini dik açıyla çekebilecek şekilde konumlandırılması.
- Ortam aydınlatmasının video çekimi için yeterli olması.
- Kiriş yüzeyinde oluşturulan ayırt edici desenlerin kiriş yüzeyine homojen olarak dağılması ve görüntü işleme paket programlarınca rahat bir şekilde algılanabilmesi amacıyla uygun arka fon renginin sağlanması.
- Kayıt yapan kameranın görüntüsü alınan kirişe uygun uzaklıkta yerleştirilmesi.
- Deney esnasında çekim yapılan kameranın herhangi bir nedenle hareket etmesinin veya titreşiminin önlenmesi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada görüntü işleme metodunun inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarından biri olan kiriş eğilme deneyinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kiriş yükleme deneylerinde önemli parametrelerden bir tanesi yük altında meydana gelen yer değiştirmeler ve kiriş üzerinde oluşan çatlaklardır. Deneyler sırasında zamana bağlı olarak çatlakların belirlenebilmesi için belirli yük veya zaman aralıklarında deneyde yük aktarımına ara verilerek çatlaklar çizilmekte ve sonrasında yüklemeye devam edilmektedir. Bu durum hem yüklemenin düzenini bozmakta hem de insan kaynaklı hataların oluşmasına yol açmaktadır. Çatlakların ve gerilme yığılmalarının yükleme sırasında kameralar ile alınan kayıtları kullanılarak herhangi bir duraksama olmaksızın belirlenmesi kiriş yükleme deneyleri için oldukça önemli olmaktadır. Bu deneylerde artık yükleme durdurulmadan kamera kayıtları ile elde edilen görüntülerin bilgisayar ortamında analiz edilmesiyle kiriş üzerinde meydana gelen çatlakların gelişimi ve gerilme dağılımları kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu çalışmada buna örnek olması açısından iki kiriş numunesi kullanılarak yapılan deneylerde görüntü işleme tekniği ile çatlaklar ve kırılma düzlemleri oldukça başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Kırılma düzlemlerinin ve gerilme yığılmalarının hangi noktalarda olduğu kırılma meydana gelmeden önce gözlenebilmiştir. Eğilme deneyine tabi tutulan kirişlerin yaptığı zamana bağlı deplasmanlar klasik yöntemlerle ve görüntü işleme metoduyla tespit edilmiştir. Her iki yöntemden bulunan sonuçlar birbiri ile çok yakın çıkmıştır. Dolayısıyla görüntü işleme metoduyla kiriş deplasmanlarının belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. Kiriş yüzey gerilmelerinin görüntü işleme metoduyla görselleştirilebileceği gözlenmiştir. Kiriş yüzeyinde oluşan çatlakların deney durdurulmadan, herhangi bir anda çatlak uzunluklarının tespit edilebileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

Aydın M., “Görüntü işleme tekniği ile granüler zeminlerde dane boyutu analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 2019.

Chambon, S., & Moliard, J. M. (2011). Automatic road pavement assessment with image processing: review and comparison. *International Journal of Geophysics*,

Coster, M., & Chermant, J. L. (2001). Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials. *Cement and Concrete Composites*, 23(2-3), 133-151.

Çankaya, G., Arslan, M. H., & Ceylan, M. (2013). Görüntü işleme ve yapay sinir ağları yöntemleri ile betonun basınç dayanımının belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*.

Çapık M. (2020). Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarı. http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_263ff.pdf/ Erişim tarihi 19.03.20.

Çomak, B., Beycioğlu, A., Başyigit, C., & Kılınçarslan, Ş. (2011). Beton teknolojisinde görüntü işleme tekniklerinin kullanımı. In 6th. International Advanced Technologies Symposium, Elazığ (pp. 220-227).

Dal K., “Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 2018.

Diñçer S., “Dijital görüntü işleme teknikleri ile Matlab ve mikrokontrolör kullanılarak iki boyutlu görüntünün çizdirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.

Doğan G., “Betonarme kolonların deprem sonrası hasar seviyelerinin akıllı sistem tabanlı bir yöntemle belirlenmesi”, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2018.

Gom Metrology (2020). Gom metrology youtube cahnel. <https://www.youtube.com/channel/UC1D36v6xqWGLZj50F7wiMQ/> Erişim tarihi Şubat 18.02.20.

Jahne, B. (2004). Practical handbook on image processing for scientific and technical applications. CRC press, (Chapter 1).

Karameşe G., “Yapı sistemlerinde yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme büyüklüklerinin özel bir görüntü işleme yöntemiyle belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2018.

Kurt T., “Kırma taş agregaların dane boyutu dağılımı ve şekilsel özelliklerinin görüntü analizi kullanılarak belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2018.

Lee, B. Y., Kim, Y. Y., Yi, S. T., & Kim, J. K. (2013). Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks. Structure and Infrastructure Engineering, 9(6), 567-577.

Liu, Y. F., Cho, S., Spencer Jr, B. F., & Fan, J. S. (2016). Concrete crack assessment using digital image processing and 3D scene reconstruction. Journal of Computing in Civil Engineering, 30(1), 04014124.

Mindivan H.(2020). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Ve İmalat Mühendisliği Bölümü Mühendislikte Deneysel Metodlar II Dersi. <http://w3.bilecik.edu.tr/makine/wp-content/uploads/sites/27/2017/02/3-nokta-Egme-Deneyi.pdf/> Erişim tarihi 19.03.20.

Moon, K. H., Falchetto, A. C., & Jeong, J. H. (2014). Microstructural analysis of asphalt mixtures using digital image processing techniques. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(1), 74-86.

Mora, C. F., Kwan, A. K. H., & Chan, H. C. (1998). Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. Cement and Concrete Research, 28(6), 921-932.

Onat M., “Dijital görüntü işleme yöntemleriyle lifli beton numunelerindeki çatlakların tespit edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 2008.

Rimkus, A., Podvieszko, A., & Gribniak, V. (2015). Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members. Procedia Engineering, 122, 239-243.

Senem B., “Görüntü işleme yöntemi kullanılarak yapısal deformasyonların ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2017.

Yılmaz A., “Akışkan-yapı etkileşimi problemlerinin deneysel ve sayısal incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay, 2019.

Yue, Z. Q., Bekking, W., & Morin, I. (1995). Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure. *Transportation Research Record*, 1492, 53-60.