Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi
30(1), 139-149, 2018

Science and Eng. J of Fırat Univ.
30(1), 139-149, 2018

Kompozit Boru Kesitlerinin Çarpma Etkisi Altında Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi

Engin GÜCÜYEN[1], R. Tuğrul ERDEM[1*], Erkan KANTAR[1]
[1]Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa
*tugrul.erdem@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.07.2017; Kabul/Accepted: 16.10.2017)

Özet

Boru hatları, kullanım ömürleri boyunca statik ve dinamik kuvvetlerin etkisi altındadır. Statik kuvvetler altında verilen tepki kolayca belirlenebilmektedir. Dinamik etkiler ise, ani olarak ortaya çıkar ve kısa aralıklarla etkilerini gösterir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte, ani dinamik kuvvetlerin oluşturacağı etkileri belirlemek için yapılan çalışmalar önem kazanmıştır. Araştırmacılar, deprem, ani rüzgâr, çarpma, patlama, kaya düşmesi ve araç kazası gibi dinamik etkiler altında çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çalışmalar yapmaktadırlar. Üretilen deney elemanlarının darbe kuvvetleri altında davranışlarını belirlemek için deney düzenekleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan kompozit boru deney elemanları, laboratuvarda üretilmiştir. Deney elemanlarının davranışları, ani darbe kuvvetleri altında serbest ağırlık düşürücü deney aleti ile belirlenmiştir. Deney düzeneğinde, ivmeölçer, halka kuvvet algılayıcı, lvdt ve veri kaydedici gibi ölçüm cihazları kullanılmıştır. Deney elemanlarında oluşan ivme, deplasman, çarpma kuvveti değerleri belirlenmiş ve hasar gelişimleri takip edilmiştir. Nümerik analiz kısmında ise, deney elemanları ve deney düzeneği Abaqus sonlu elemanlar analiz programında modellenmiştir. Malzeme özellikleri ve mesnet koşulları programda tanımlandıktan sonra, analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen değerler, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit boru, Darbe kuvveti, Deney düzeneği, Sonlu elemanlar analizi

Experimental and Numerical Investigation of Composite Pipe Sections under Impact Effect

Abstract

Pipelines are under the effect of static and dynamic forces during their useful lives. Reaction is easily determined under static forces. On the other hand, dynamic effects occur suddenly and show their effects in short ranges. With technological developments, studies investigating the effects due to sudden dynamic forces become important. Researchers perform studies to determine mechanical properties of several materials under dynamic effects such as earthquake, sudden wind, impact, blasting, rock fall and vehicle crash. Test setups have been developed to determine the behavior of test members under impact forces. Composite pipe test members that are used in the scope of this study are produced in the laboratory. Behaviors of test members under impact forces are determined by free weight falling testing apparatus. Measurement devices as accelerometer, ring force sensor, lvdt and data-logger are used in the test setup. Acceleration, displacement and impact force values of test members are determined and failure developments are followed. In the numerical analysis section, test members and test setup are modeled by Abaqus finite elements analysis program. Analyses are performed after defining material properties and support conditions in the program. Obtained values after analyses are compared with test results.

Keywords: Composite pipe, Impact force, Test setup, Finite elements analysis

1. Giriş

Boru sistemleri, bir noktadan başka bir noktaya gerekli malzemelerin taşınması için kullanılan önemli yapı sistemlerindendir. Boruların oluşturduğu sistemler, uzun yapı sistemleridir ve farklı coğrafik yerlerden geçmek durumundadırlar. Boru sistemleri; yalnızca içme suyu ya da atık suların taşınmasında kullanılmaz. Buna ilave olarak, petrol ve doğalgaz gibi enerji

üretiminde kullanılan malzemelerin taşınmasında da önemli rol almaktadırlar.

Farklı boru tiplerinin birleşimiyle oluşturulan kompozit borular, yüksek verimlilik ve kullanım avantajları sağlayarak; kanalizasyon hatları, su taşıma kanalları ve drenaj hatları gibi boru sistemlerinin tasarımında kullanılmaktadır. Ayrıca, kompozit borular kimyasal maddelere karşı yüksek direnç göstermesi, kireçlenme ve paslanmaya karşı dayanıklı olması, montaj firesinin az olması, hızlı ve seri montajlama olanağı sağlaması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır.

Boru hattı tasarımının amacı, hattın kullanım ömrü içerisinde işletme ve bakım masrafını minimum kılacak şekilde, izin verilen dayanma sınırını aşmayarak, en uygun kesit boyutlarını seçmektir. Bunu gerçekleştirirken, çevresel koşullar, inşaat-işletme-bakım yöntemleri ve teknolojik gelişmeler göz önünde bulundurulmalıdır. Böylelikle, boru hatlarının stabilizasyonu sağlanacak şekilde uygun malzeme miktarları belirlenerek, optimum tasarım gerçekleştirilmektedir.

Rüzgâr, dalga, akıntı, deprem, jeolojik koşullar, sıcaklık ve suyun kimyasal bileşenleri gibi çevresel unsurlar, boru sistemlerinin fonksiyonları üzerinde olumsuz etki yaratabilmektedir. Boru sistemleri, vadi geçişlerinde ve dağlık alanlarda meydana gelebilecek heyelanlar ve kaya düşmesi nedeniyle oluşabilecek hasar tehditleriyle karşı karşıyadır. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde, deneysel çalışmaların gerektirdiği bazı zorluklardan dolayı, araştırmacıların kompozit malzemeleri daha çok sonlu elemanlar yazılımlarıyla analiz ederek, davranışları hakkında fikir sahibi olmaya çalıştıkları görülmüştür.

Mühendislik alanındaki yaşanan gelişmeler, kullanılan malzemelerin çeşitliliğine göre değişmektedir. Kullanılacak malzemelerin avantajlarının, kusurlarının, farklı yükleme koşulları etkisindeki dayanımlarının ve davranışları ile şekil değiştirmelerinin bilinmesi, deneysel ve teorik çalışmalarda fayda sağlamaktadır.

Yapısal elemanlar, kullanım ömürleri boyunca farklı yüklemelerin etkisi altındadırlar. Yapıya etkiyen yükler, statik ve dinamik olarak iki ana başlık altında incelenmektedir. Statik yükler, kalıcı yüklerdendir. Dinamik yükler ise, aniden ortaya çıkan ve belli bir süre devam ederek yapıları etkileyen yüklerdir. Deprem yükleri, ani oluşan rüzgârlar ve makine titreşimleri, dinamik yüklere örnek olarak verilebilir. Dinamik yüklerin vereceği hasarlar büyük olabileceğinden dolayı, bu yüklerin meydan geldiği durumlarda yapısal elemanların vereceği cevap doğru tahmin edilmelidir.

Çarpma etkisi, nesneler arasında çarpışma anında oluşan dinamik etkiler sonucunda ortaya çıkan gerilmelerin, elemanların mekanik özellikleri üzerinde oluşturduğu değişimlerdir. Yapısal elemanlarda, çarpma etkisi sonucunda oluşan dinamik etkilerin oluşturduğu belirsizlikleri gidermek amacıyla tasarlanan deney düzenekleri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır [1-3].

Literatürdeki çalışmalarda, farklı malzemelerden üretilen boru elemanlar, hem deney düzenekleri hem de sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir [4-12]. Bu çalışmada, farklı çaplardaki kompozit deney elemanlarının çarpma etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları yardımıyla elde edilen sonuçlar ile deney elemanlarının davranışları hakkında fikir sahibi olunmuştur [13].

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda, serbest düşmeye bırakılan ağırlık düşürme yöntemi kullanılmıştır. Kompozit boru kesitlerinden oluşan deney elemanları, laboratuvarda üretilmiştir. Üretilen boru elemanlar darbe kuvvetleri altında test edilmiştir. Deneylerde serbest düşen çekiçli deney aleti, ivmeölçer, halka kuvvet algılayıcı, lvdt ve veri kaydedici kullanılmıştır. İvme değerleri ivmeölçerler ile, deplasman değerleri lvdt ile, çarpma kuvveti değerleri ise kuvvet algılayıcı ile kayıt altına alınmıştır. Bu değerler ile, ivme-zaman, deplasman-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca, deney elemanlarında oluşan hasar gelişimleri izlenmiştir. Çalışmanın analiz kısmında ise, Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılarak [14], deney elemanları ve deney düzeneği modellenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sayısal değerler, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Üretilen kompozit boru deney elemanlarında dinamik çarpma kuvvetleri sonucunda oluşan etkileri incelemek amacıyla, serbest ağırlık düşürücü deney aleti, ivmeölçer, kuvvet algılayıcı, lvdt ve veri toplayıcı kullanılmıştır.

Deney aleti kullanılarak, deney elemanları istenilen düşme yüksekliği ve çekiç kütlesi altında test edilebilmektedir. Serbest düşme hareketi tamamlanıncaya kadar geçen süre ve yapılan düşme sayıları, bağlantı kulesi üzerinden okunabilmektedir. Deney aletinde yer alan kilitlenme mekanizması ile, çarpma kuvveti deney elemanına aktarıldıktan sonra, sıçrama hareketleri engellenebilmektedir. Böylelikle, deney elemanları tek serbest düşme hareketi için incelenebilmektedir.

Deney aleti, 2500 mm yükseklikten farklı kütleleri düşürebilecek kapasitededir. Tabanda deney elemanlarının yerleştirileceği platform, 1000x1000x200 mm boyutlarında ve çelik levhadan yapılmıştır.

Serbest ağırlık düşürücü deney aletinde, deney elemanlarına çarpma kuvveti uygulandığı anda potansiyel enerji, kinetik enerjiye dönüşmektedir. Serbest düşme hareketi esnasında kaybedilen enerji, deney elemanı tarafından kazanılan enerjiye eşit olmaktadır. Deney aleti Şekil 1'de sunulmuştur.

İvmeölçerler, mutlak hareket ölçümlerinin yanı sıra, titreşim ve şok ölçümlerinde de kullanılmaktadır. Deneylerde oluşan ivme değerlerini ölçmek için şok ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler, piezoelektrik malzeme kullanılarak üretilmektedir. Şok ivmeölçerler, kısa süreli ve çok yüksek değerlere ulaşabilen ivme değerlerine karşı koymak ve ölçmek üzere özel olarak tasarlanmışlardır.

Şok ivmeölçerler, çeşitli malzemelerin çarpma davranışlarının belirlenmesinde, mermi ve roket çarpmaları sonucu oluşan etkilerde ve kazık çakma işlemlerinin izlenmesi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Deneylerde, Şekil 2'de sunulan PCB Group firmasına ait ICP tipi 350B03 model ivmeölçer kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney aleti



Şekil 2. İvmeölçerin görünüşü

Kuvvet algılayıcıları, uygulanan kuvveti elastik bir elemanın deformasyonuna çevirirler. Halka kuvvet algılayıcılar, dinamik basınç ölçümleri için tasarlanmışlardır. Yüksek doğrusallık ve tekrar edilebilirlik özellikleri oldukça iyidir. Malzeme ve dayanım testi alanlarında birçok uygulama için kullanılabilirler.

Deneylerde, PCB Group firmasına ait olan 203B model ICP türü halka kuvvet algılayıcı

kullanılmıştır. Ölçümlerin doğruluğu açısından, kuvvet algılayıcının montajı önemlidir. Montajda, berilyum-bakır karışımı malzemeden yapılan vida yardımıyla kuvvet algılayıcı monte edilmiştir. Halka kuvvet algılayıcının görünüşü, Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Kuvvet algılayıcının görünüşü

Lvdt (doğrusal değişken fark transformatörü), rvdt (döner değişken fark transformatörü) ve ortak indüktanslı yakınlık sensörlerinin çalışmasının temelidir. Lvdt, mekanik olarak hareketlendirilmiş nüvesi ile bir transformatördür. Lvdt'nin ani yer değişimlerini ölçebilmesi için, osilatör frekansının hareketin en yüksek frekansından en azından 10 kat daha büyük olması gerekir. Yavaş yer değişim işleri için kararlı osilatör yerine, 50-60 Hz'lik besleme kaynağı frekansı kullanılabilir.

Lvdt, bir objenin doğrusal olan mekanik hareketini, elektrik sinyallerine dönüştüren elektromekanik bir dönüştürücüdür. Lvdt yer değişimi algılayıcıları, 0.01µ seviyelerindeki yer değişimlerini belirleyebilecek kapasitededir. Lvdt, yer değişiminin büyüklüğü yanında yönünü de verebilmektedir.

Lvdt dayanıklı bir yapıya sahip olduğundan dolayı, çeşitli çevre koşullarında kullanılabilmektedir. Sürtünmeye dair kayıplar olmadığından, herhangi bir bakım yapılmadan çalışma süresi uzun olabilmektedir. Yapılan deneylerde, Testart firmasına ait SDVB-50 model yaylı lvdt kullanılmıştır. Kullanılan lvdt'nin görünüşü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Lvdt'nin görünüşü

Veri toplayıcılar, elektronik kartın üzerindeki sensörler veya harici sensörler nedeniyle, zamana göre bilgileri kaydeden elektronik cihazlardır. Özel yazılımları sayesinde, programlanabilme özelliğine sahiptirler. Standart veya yapılacak çalışmalara göre üretilebilen ve birçok çeşidi olan veri toplayıcılar, deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarından elde edilen ölçümleri toplayıp, bilgisayar verilerine çevirmektedir.

Deneylerde, Testart firmasına ait Testbox2010 dinamik veri toplama cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, özellikle yapısal sağlık takibi, inşaat mühendisliği, deprem mühendisliği ve diğer dinamik karakterdeki uygulamalar için geliştirilmiştir. Kanal girişlerinde sinyal yükselticilere sahip olan cihaz; FBA, MEMS, ICP ve diğer tip ivmeölçerlere ek olarak strain gauge, yük hücresi gibi testlerde tercih edilen sensörlerin çoğunluğuna uyumluluk gösterir. Cihazın görünüşü Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Veri toplama cihazının görünüşü

Deneysel çalışmada kullanılan kompozit deney elemanları, farklı boyutlardaki galvanizli borular ve pvc borular ile harç karma makinesinde üretilen beton kullanılarak, laboratuvar ortamında elde edilmiştir.

Darbe kuvvetleri etkisi altındaki deney elemanının sağ ve sol uçlarında oluşacak dönme ve yanal ötelenme hareketlerine karşı koymak amacıyla, 50x50x500 mm ölçülerinde bağlantı aparatları kullanılmıştır. Çarpma etkilerine karşı dayanıklı çelik malzeme kullanılarak üretilen bu aparatlar ile mesnet koşulları sağlanmıştır.

Kompozit deney elemanlarının üretiminde kullanılan galvanizli borular, 4 mm kalınlığındadır. Deney elemanları, galvanizli borular ve pvc borularının arasına beton

yerleştirilerek elde edilmiştir. Deney elemanlarının üretilme aşamasına ait bir fotoğraf, Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Deney elemanlarının üretilmesi

Harç karma makinesi ile hazırlanan karışım, el arabası yardımıyla taşınarak, galvanizli boru ve pvc boru arasına yerleştirilmiştir. Beton kuruduktan sonra, pvc boru çıkarılarak, kompozit boru deney elemanı elde edilmiştir. 1 m^3 beton üretimi için kullanılan malzeme oranları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. 1 m^3 beton üretimi için gerekli malzeme miktarları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento (32.5R)	430
Çakıl	1030
Kum	725
Su	200
Kimyasal Katkı	5

Deney elemanları uygun mesnet koşulları sağlanarak, deney düzeneğine yerleştirilmişlerdir. İvmeölçerler, çarpma noktasından sağa ve sola simetrik olacak şekilde, 25 cm'lik mesafeye monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcı, çekiçle birlikte hareket etmektedir. Lvdt ise, çıta yardımıyla deney elemanına monte edilmiştir.

Deneylerde oluşan ivme değerleri ivmeölçerler ile, çarpma kuvveti değerleri kuvvet algılayıcı ile, deplasmanlar ise lvdt ile ölçülerek, veri kaydediciye gönderilmiştir. Toplam düşme sayısı ve düşme zamanları ise, optik fotoseller ile belirlenerek, deney düzeneğinde yer alan elektronik ekrandan okunmuştur.

Deneylerde serbest düşme yüksekliği 100 cm, çekiç kütlesi ise 12 kg olarak alınmıştır. Üretilen her bir deney elemanı, çekiç tarafından uygulanan çarpma kuvveti altında test edilmiştir. Kaydedilen ölçüm değerleri, veri kaydedici tarafından bağlantı kabloları yoluyla bilgisayara gönderilmiştir. Deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Deney düzeneği

Bilgisayardaki yazılım kullanılarak, veri kaydedici tarafından gönderilen ivme, çarpma kuvveti ve deplasman değerleri, zamana bağlı olarak grafiklere dönüştürülmüştür. Böylece, belli zaman dilimleri içerisinde deney elemanlarında oluşan etkiler elde edilmiştir.

3. Deney Sonuçları

Deneylere, boru elemanlarda maksimum deplasmanların oluştuğu göçme durumuna ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Deneyler sonucunda, deney elemanlarında oluşan zamana bağlı ivme, deplasman ve çarpma kuvveti değerleri kullanılarak, ivme-zaman, deplasman-zaman ve çarpma kuvveti-zaman grafikleri elde edilmiştir.

Uygulanan çarpma kuvveti etkisi altında oluşan ivme, deplasman ve çarpma kuvveti değerleri ile göçme hasar durumunun oluştuğu toplam düşme adetleri kayıt altına alınmıştır. 3″ çaplı kompozit boruda, lvdt tarafından kaydedilen maksimum deplasmanın oluştuğu, göçme hasar durumu Şekil 8'de görülmektedir.

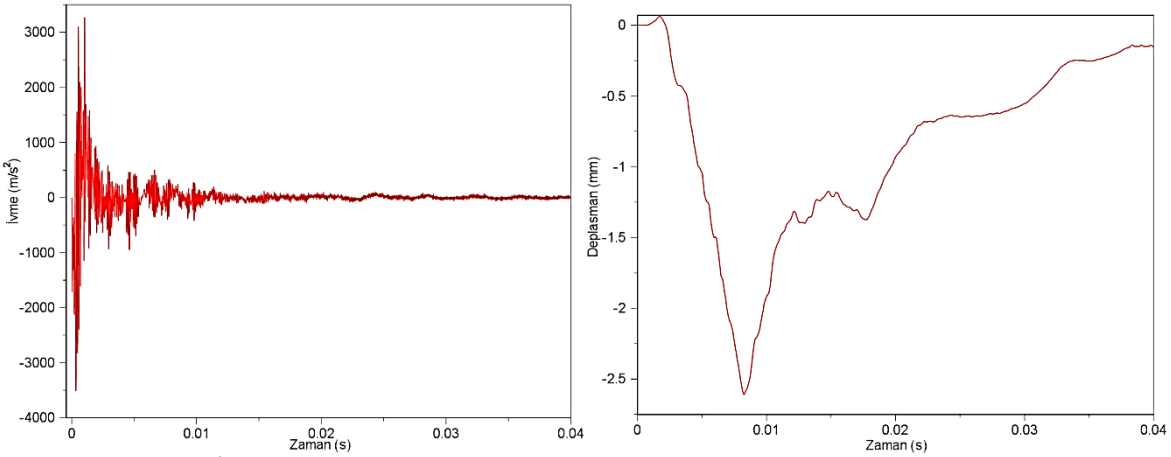


Şekil 8. Göçme hasar durumu

Deneylerde, serbest ağırlık düşürücü deney aletinde yer alan kilitlenme mekanizması devreye sokularak, çekicin yaptığı ilk serbest düşme hareketinin ardından oluşan sıçrama hareketleri engellenmiştir. Böylece, deney sonuçları çekicin yaptığı tek bir düşme hareketi için elde edilmiştir.

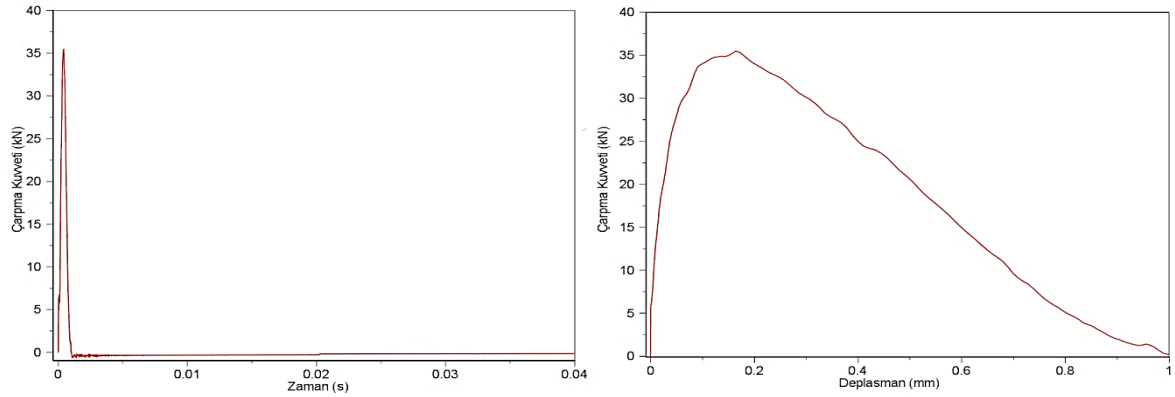
İvmeölçerler deney elemanlarına simetrik olacak şekilde yerleştirildiği için, iki ivmeölçerden elde edilen değerler birbirine yakın ölçülmüştür. Deney elemanları üzerinden alınan 2 adet ivme ölçümünden büyük olan ivme değeri kullanılarak, ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Deplasman-zaman ve çarpma kuvveti-zaman grafikleri yardımıyla, çarpma kuvveti-deplasman grafiği elde edilmiştir.

2″ çaplı kompozit boru için çizilen ivme-zaman, deplasman-zaman, çarpma kuvveti-zaman ve çarpma kuvveti-deplasman grafikleri Şekil 9'da sunulmuştur.



a) İvme-zaman grafiği b) Deplasman-zaman grafiği

Şekil 9. 2″ çaplı kompozit boru için elde edilen grafikler **(devam)**



c) Çarpma kuvveti-zaman grafiği d) Çarpma kuvveti-deplasman grafiği

Şekil 9. 2″ çaplı kompozit boru için elde edilen grafikler

Deney elemanları, oluşturulan deney düzeneğinde göçme durumuna gelinceye kadar deneylere devam edilmiştir. Deney elemanlarında, ilk serbest düşme hareketi sonucunda elde edilen değerler hasarsız durum olarak ele alınmıştır. Lvdt tarafından maksimum deplasmanın ölçüldüğü serbest düşme hareketi ise, göçme hasar durumu olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarında hasar durumlarına göre ölçülen değerler, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney elemanları için elde edilen değerler

Deney Elemanı	Hasar Durumu	İvme (m/s^2)		Mak. Deplasman (mm)	Mak. Çarpma Kuvveti (kN)
		Min.	Mak.		
2″ Çaplı Kompozit Boru	Hasarsız Durum	-3508	3267	2.61	35.46
	Göçme Durumu	-2917	3004		
3″ Çaplı Kompozit Boru	Hasarsız Durum	-3761	3986	2.17	42.12
	Göçme Durumu	-3425	3173		
4″ Çaplı Kompozit Boru	Hasarsız Durum	-4251	4428	1.34	46.26
	Göçme Durumu	-3529	3752		

Deney elemanlarında maksimum deplasmanın ölçüldüğü göçme hasar durumuna ulaşıncaya kadar, serbest düşme hareketine devam edilmiştir. Her bir eleman için yapılan toplam düşme sayısı, deney düzeneğindeki elektronik ekrandan okunabilmektedir. Deney elemanları için yapılan toplam düşme sayısı Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Toplam düşme sayıları

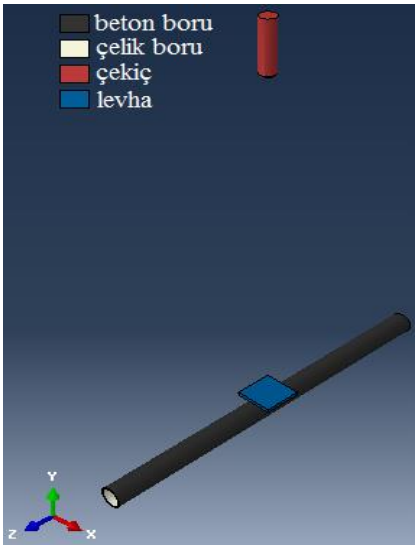
Deney Elemanı	Toplam Düşme Sayısı
2″ Çaplı Kompozit Boru	14
3″ Çaplı Kompozit Boru	25
4″ Çaplı Kompozit Boru	37

4. Nümerik Analiz

Bu kısımda, deney elemanları ve deney düzeneği Abaqus sonlu elemanlar analiz programı ile modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Program, farklı malzeme modellerini bünyesinde barındırmakta ve doğrusal olmayan, artımsal dinamik analizlere olanak sağlamaktadır. Programın Explicit modülü ile zamana bağlı dinamik problemlerin modellenmesi ve çözümlenmesi gerçekleştirilmektedir. Explicit modülü, düşürme testleri ve çarpışma (kaza) gibi yüksek derecede doğrusalsızlığın bulunduğu problemlerin çözümü için uygundur.

Programda üç boyutlu modeller oluşturulduktan sonra, 12 kg kütlesindeki çekiç, 1 m yükseklikten düşürülerek, deney elemanları çarpma etkisi altında analiz edilmiştir. Mesnet koşulları deneysel çalışmaya uygun şekilde tanımlanmış, çelik levha deney elemanlarının

üzerine sabitlenmiştir. 2″ çaplı kompozit boruya ait oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Sonlu elemanlar modeli

Deney elemanlarına ait sonlu elemanlar modelleri oluşturulurken, malzeme özellikleri programa girilmiştir. Beton ve çelik için belirlenen malzeme özellikleri, ilgili kesitlere atanmıştır. Programda tanımlanan malzemelere ait değerler, Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Malzeme özellikleri

Özellik	Beton	Çelik Levha ve Çekiç
Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	2400	7850
Elastisite Modülü (MPa)	30000	200000
Poisson Oranı	0.20	0.30
Kayma Modülü (MPa)	12000	76923

Deneylerde herhangi bir dış kuvvet uygulanmadığından, analizlerde sadece yer çekim ivmesi tanımlanmıştır. Analizlerde, çekicin sıçrama hareketi engellenmiş ve tek bir serbest düşme hareketi uygulanmıştır. Ayrıca, analizlerdeki zaman aralıkları ile zaman adımları belirlenmiştir. Analizlerde, çekicin deney elemanına temas ettiği andan itibaren, zaman artım aralığı $2x10^{-8}$ saniye, zaman adımı ise 20000 adım olarak ele alınmıştır.

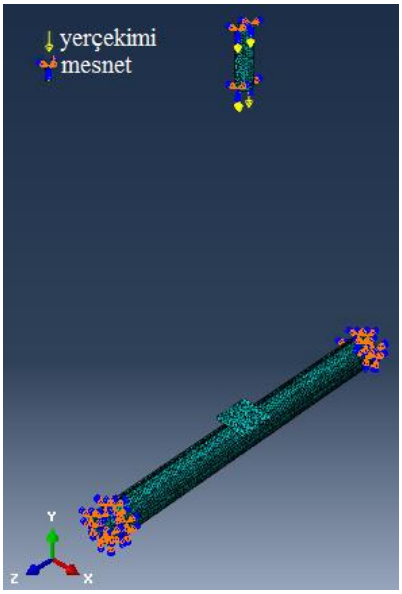
Programda oluşturulan sonlu elemanlar modelleri, daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için, analizlerden önce belli parçalara bölünmüştür. Analizlerin uygun çözüm sürelerinde tamamlanabilmesi amacıyla, sonlu eleman boyutu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modellerinde, mesh aralıkları 4 mm olarak programa girilmiştir.

Modelleme aşamasında, tetrahedron (dört yüzlü) eleman seçilmiştir. Çarpma problemlerinde kullanılan C3D10M (10-node modified tetrahedron) tipindeki eleman, analizlerde kullanılmıştır. Farklı boyutlardaki deney elemanları için hazırlanan modellerde, kullanılan nokta ve eleman sayıları değişmektedir. 2″ çaplı kompozit borunun analizi için toplam 43423 nokta ve 32000 C3D10M tipi eleman, 3″ çaplı kompozit boru için 59989 nokta ve 43000 C3D10M tipi eleman, 4″ çaplı kompozit boru için ise 70033 nokta ve 49500 C3D10M tipi eleman kullanılmıştır.

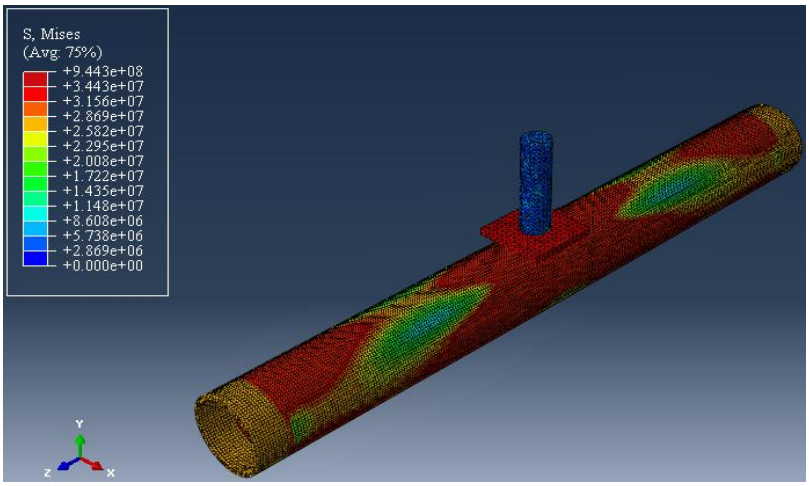
Programda çarpma davranışını gerçekçi bir şekilde tanımlayabilmek için, çekiç ile çelik levha arasındaki temasın doğru modellenmesi gerekir. Bunun için Interaction bölümünde, çekiç yüzeyi esas (master), levha yüzeyi ise bağımlı (slave) seçilmiştir.

Deney düzeneğinde yer alan ve çekicin düşey yönde hareket etmesini sağlayan kızaklar, işlem hacmini azaltmak amacıyla sonlu elemanlar modelinde kullanılmamıştır. Bu nedenle, çekiç yalnızca düşey yönde hareket yapacak şekilde modellenmiştir. 3″ çaplı kompozit boru için, alt geometrilere bölündükten sonra oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 11'de görülmektedir.

Analizler, çekicin yaptığı ilk serbest düşme hareketi için yapılmıştır. İlk düşme hareketi sonucunda 4″ çaplı kompozit boru için elde edilen gerilme dağılımı Şekil 12'de verilmiştir. Maksimum gerilmelerin, çarpma kuvvetinin uygulandığı bölgede yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 11. Mesh işleminin ardından oluşturulan model



Şekil 12. Gerilme dağılımı

Analizler sonucunda, her bir deney elemanında oluşan ivme, deplasman, çarpma kuvveti değerleri, Abaqus programı ile belirlenmiştir. Elde edilen değerler ve deneysel sonuçlar ile aralarındaki ilişki Tablo 5'te ve Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 5. İlk düşme hareketi için ivme değerlerinin karşılaştırılması

Deney Elemanı		Mak. İvme (m/s^2)		
		Deney	**Analiz**	**Deney/Analiz**
2″ Çaplı Kompozit Boru	Min.	-3508	-3286	1.07
	Mak.	3267	3424	0.95
3″ Çaplı Kompozit Boru	Min.	-3761	-3657	1.03
	Mak.	3986	3492	1.14
4″ Çaplı Kompozit Boru	Min.	-4251	-3708	1.15
	Mak.	4428	4027	1.10

Tablo 6. Maksimum deplasman ve çarpma kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

Deney Elemanı	Mak. Deplasman (mm)			Mak. Çarpma Kuvveti (kN)		
	Deney	Analiz	Deney/Analiz	Deney	Analiz	Deney/Analiz
2″ Çaplı Kompozit Boru	2.61	2.27	1.15	35.46	36.91	0.96
3″ Çaplı Kompozit Boru	2.17	1.83	1.18	42.12	38.79	1.08
4″ Çaplı Kompozit Boru	1.34	1.59	0.84	46.26	42.17	1.10

5. Sonuçlar ve Öneriler

Boru hatları, doğalgaz, petrol ve su gibi malzemelerin, bir noktadan başka bir noktaya taşınması için kullanılan yapı sistemleridir. Boru hatları, içsel gaz veya sıvı basıncı gibi işletme yükleri ile statik ve dinamik yüklere göre tasarlanmaktadır. Bunun yanında, boru hatları heyelanlar ve kaya düşmesi gibi ani çarpma etkilerine maruz kalmaktadır. Bu ani etkileri modellemek amacıyla, deney düzenekleri kullanılmaktadır.

Kompozit borular, farklı boru tiplerinin birleşmesi ile elde edilmektedir. Uygulamadaki avantajları nedeniyle, boru hatlarının tasarımında kompozit borular yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı çaplara sahip kompozit boru deney elemanlar çarpma etkisi altında test edilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla, deney elemanı ve deney düzeneği Abaqus sonlu elemanlar programında modellenerek, analizler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen ivme değerleri, çarpma kuvvetinin uygulandığı noktadan her iki yana 25 cm mesafede simetrik olarak yerleştirilen ivmeölçerler tarafından kayıt altına alınmıştır. En büyük ivme değerleri, 4″ çapındaki kompozit boru için ölçülürken, tüm deney elemanlarında ivme değerlerinin göçme hasar durumuna doğru giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

Kompozit boru elemanlarda oluşan deplasman değerleri, lvdt yardımıyla ölçülmüştür. Deney elemanlarında oluşan hasar ilerledikçe, deplasman değerlerinin arttığı görülmüştür. Deney elemanları arasında oluşan maksimum deplasman değeri, 2″ çapındaki kompozit boruda elde edilmiştir.

Çekicin uç kısmına monte edilen kuvvet algılayıcı ile, her bir serbest düşme hareketi sonucunda oluşan çarpma kuvveti değerleri ölçülmüştür. İlk düşme hareketinden, göçme hasar durumuna doğru ölçülen çarpma kuvveti değerlerinde azalma görülmüştür. Maksimum çarpma kuvveti değeri, 4″ çapındaki kompozit boru için elde edilmiştir. Çarpma kuvveti-deplasman grafiklerinin altında kalan alan ile, deney elemanlarının enerji yutma kapasiteleri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Deney elemanlarında, ilk düşme hareketinden göçme hasar durumuna doğru gidildikçe, enerji yutma kapasiteleri azalmıştır.

Deney elemanlarının çarpma dirençleri, göçme durumuna ulaşıncaya kadar yapılan toplam serbest düşme sayıları ile belirlenmiştir. Toplam serbest düşme sayıları incelendiğinde, en fazla düşme sayısı, 4″ çapındaki kompozit boruda ölçülmüştür. Kesit çapı arttıkça, deney elemanları daha geç göçme durumuna ulaştığı için, daha fazla serbest düşme hareketi yapılmıştır.

Deneysel çalışmanın ardından, deney elemanları oluşturulan deney düzeneği ile birlikte Abaqus sonlu elemanlar programında modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarında oluşan ivme, deplasman ve çarpma kuvveti değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çarpma kuvveti deney elemanına aktarıldığı anda, deney elemanında oluşan gerilme durumu, sonlu elemanlar analizi ile izlenmiştir. Böylece, hem deneysel hem de analiz çalışması ile kompozit boruların çarpma kuvveti altındaki davranışı hakkında fikir sahibi olunmuştur.

6. Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin ve deney aletlerinin alınması için gerekli olanaklar, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından sağlanmıştır.

7. Kaynaklar

1. Nataraja, M.C., Dhang, N., Gupta, A.B. (1999). Statistical variations in impact resistance of steel fiber-reinforced concrete subjected to drop weight test. *Cement and Concrete Research*, **29(7)**: 989-995.

2. Banthia, N.P. (1987). Impact resistance of concrete. PhD Thesis, The University of British Columbia, 335s.

3. Erdem, R.T. (2013). Farklı kesit boyutlarına sahip beton ve betonarme kesitlerin çarpma etkisi altında incelenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 304s.

4. Pichler, B., Hellmich, C., Mang, H.A., Eberhardsteiner, J. (2006). Loading of a gravel-buried steel pipe subjected to rockfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132(11)**: 1465-1473.

5. Yang, J.L., Lu, G.Y., Yu, T.X., Reid, S.R. (2009). Experimental study and numerical simulation of pipe-on-pipe impact. *International Journal of Impact Engineering*, **36**: 1259-1268.

6. Tafreshi, S.N.M., Khalaj, O. (2011). Analysis of repeated-load laboratory tests on buried plastic pipes in sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**: 1-15.

7. Jones, N., Birch, R.S. (2010). Low-velocity impact of pressurised pipelines. *International Journal of Impact Engineering*, **37**: 207-219.

8. Kristoffersen,M., Børvik,T., Westermann, I., Langseth, M., Hopperstad, O.S. (2013). Impact against X65 steel pipes – an experimental investigation. *International Journal of Solids and Structures*, **50**: 3430–3445.

9. Anil, Ö., Erdem, R.T, Kantar, E. (2015). Improving the impact behavior of pipes using geofoam layer for protection. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **132-133**: 52-64.

10. Shah, Q.H. (2011). Experimental and numerical study on the orthogonal and oblique impact on water filled pipes. *International Journal of Impact Engineering*, **38**: 330-338.

11. Guades, E., Aravinthan, T., Manalo, A., Islam, M. (2013). Experimental investigation on the behaviour of square FRP composite tubes under repeated axial impact. *Composite Structures*, **97**: 211-221.

12. Gezeri O. (2012). Çelik ve kompozit boruların çarpma davranışı ve koruyucu yapıların etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 108s.

13. Gücüyen, E., Erdem, R.T., Kantar E. (2017). Yerüstü boru hatlarında dinamik kuvvetlerin oluşturduğu etkilerin deneysel olarak incelenmesi. Bilimsel Araştırma Projesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi.

14. ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA. (2015). Dassault Systèmes Simulia Corp.