

Çarpma Etkisi Altında Kalan Armut Meyvelerinin (Ankara çeşidi) Zedelenme Hacminin Doğrusal Olmayan Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi ile Belirlenmesi

H. Kürşat ÇELİK*, İbrahim AKINCI

Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü
hkcelik@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 06.05.2016 Kabul Tarihi (Accepted): 27.07.2016

Özet: Özellikle meyve ve sebzeler gibi tarımsal ürünlerin hasat, taşıma, sınıflandırma, paketlenme ve hasat sonrası işlemleri gibi süreçlerde kullanılan makine sistemlerinin tasarımında odaklanılan temel tasarım amaçlarından birisi, bu sistemlerin ilgili işlemler sırasında işlenen ürüne her hangi bir şekilde mekanik bir zarar vermemesidir. Bu tip süreçlerde rastlanılan en yaygın mekanik zarar türü, ürünün çarpma etkisi altında mekanik olarak zedelenmesidir. Bu zedelenme ürünün dış etkenlerle etkileşimi veya birbirleri ile teması nedeniyle olabilmektedir. Bu tip durumlara maruz kalan ürünlerin zedelenme miktarının ve zedelenme ilerleyişinin hassas bir şekilde belirlenmesi, bu süreçlerde kullanılan makine sistemlerinin tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, birbirleri ile çarpışma etkisi altında kalan örnek bir tarımsal ürünün (Armut-Ankara çeşidi) çarpışma sürecinde maruz kaldığı yapısal gerilmelerin zamana bağlı değişimi ve çarpışma sonucu ortaya çıkan zedelenme hacimleri, ileri düzey doğrusal olmayan dinamik sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. Çalışmada, ele alınan örnek ürünün bazı mühendislik özellikleri fiziksel ölçüm ve testler ile belirlenmiştir. Örnek ürün, tersine mühendislik yaklaşımı ile dijital ortama aktarılmış ve sonlu elemanlar yöntemi temelli, doğrusal olmayan dinamik analiz yaklaşımı ile çarpışma durumu simüle edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonda, iki ürünün 1 [m] yükseklikten birbirleri üzerine düşme senaryosu simüle edilmiştir. Simülasyon sonucu oldukça faydalı görsel ve sayısal çıktılar elde edilmiştir. Sonuç olarak, tanımlanan çarpışma durumunda ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme değeri çarpan ve çarpılan ürünler için sırasıyla 0.395 [MPa] ve 0.538 [MPa], zedelenme hacimleri ise sırasıyla 6278.40 [mm³] ve 30197.41 [mm³] olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Çarpma testi, gerilme analizi, bilgisayar destekli mühendislik, tarım makineleri tasarımı, biyolojik malzeme, zedelenme hacmi

Determination of Bruise Volume of Pear Fruit (Ankara Variety) under Mechanical Collision Effect by means of Non-Linear Dynamics Finite Element Analysis

Abstract: The major aim in designing optimal agricultural equipment/machinery systems used in the agricultural production phases of harvesting and post harvesting is to provide harvesting, transporting, grading, processing and/or packing the products with no bruise. Bruises are the most common type of mechanical damage which are seen in agricultural products in collision or impact cases. Determination of the bruise amount is an important issue and this parameter may be used as a design constraint in design processes of related machinery systems. In this research, it is focused on determination of time dependant structural stress progression and bruise volume of a sample agricultural product (Pear- Ankara variety) under collision effect, by means of non-linear dynamic finite element analysis (Explicit dynamics). Some engineering properties of the sample product have been determined by physical measurements and experimental test methods. The

product has been digitalised using reverse engineering approach and collision case has been simulated by means of finite element method based non-linear dynamics simulation. In the simulation scenario, one of the products dropped from 1 [m] height on to other one and the collision case of the products has been simulated. Simulation outputs revealed useful visuals and numerical results from the collision case. Maximum structural stresses were calculated as 0.395 [MPa] and 0.538 [MPa] and bruise volumes were 6278.40 [mm³] and 30197.41 [mm³] for the dropped product and the other one respectively.

Key words: Stress analysis, computer aided engineering, design of agricultural machinery, biological materials, bruise volume

GİRİŞ

Meyveler ve sebzeler gibi bazı tarımsal ürünlerin hasat, taşıma, sınıflandırma, paketlenme ve hasat sonrası işlemleri sırasında karşılaşılan en yaygın ürün zararlarından biri, mekanik darbeler sonucu ürünlerde meydana gelen zedelenmelerdir. Bu tip zedelenmeler yaygın olarak ürünlerin birbirleriyle ve/veya dış etkenlerle çarpışması sonucu ortaya çıkmaktadır. Özellikle zedelenmelere karşı daha hassas olan elma, armut vb. gibi meyvelerin, hasat edilmesinden tüketicilere ulaştırılmasına kadar geçen safhalardaki bu tip zedelenmeler istenmeyen ekonomik kayıplara neden olmaktadır (García vd. 1995; Zeebroeck vd. 2003; Berardinelli vd. 2005; Zeebroeck vd. 2007; Eissa vd. 2012; Abedi ve Ahmadi 2013; Komarnicki vd. 2016). Bu nedenle, ürünlerin mekanik çarpma/çarpışma kaynaklı zedelenmelerin ölçülmesi ve zedelenme miktarlarının belirlenmesi, ilgili üretim ve ürün işleme süreçlerinde kullanılan makine sistemlerinin tasarımında önemli bir rol almaktadır (Sarig 1991).

Özellikle meyvelerin zedelenme miktarlarının tespitinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi, mekanik etkiye maruz kalmış ürünlerin zedelenme hacminin ölçülmesidir. Bu konuda görüntü işleme tekniklerine ek olarak pendulum ve düşme/çarpma testi gibi deneysel çalışmalara dayanan ölçüm yöntemleri mevcuttur (Opara ve Pathare 2014). Ancak bu yöntemler özellikle belirli kabuller doğrultusunda kullanılmakta ve zedelenmeye neden olan kuvvet altında oluşan yapısal gerilme değişimini zamana bağlı olarak göstermekte yetersiz kalabilmektedir. Alternatif olarak bu tip deformasyon durumlarının analizinde ve zedelenme miktarlarının belirlenmesinde, sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method: FEM) gibi sayısal yöntemler daha hassas sonuçların elde edilmesinde oldukça faydalı görülmektedir

(Sitkei 1986). Bu yöntemin kullanıldığı çok sayıda çalışma ilgili bilimsel literatürlerde yer almaktadır (Cardenas ve Strohshine 1991; Chen ve De Baerdemaeker 1993a,b; Chen vd. 1996; Lu ve Abbott 1997; Hernaández ve Belle's 2007; Celik vd. 2008; Fabbri vd. 2011; Celik vd. 2011; Ihueze vd. 2013; Tinoco vd. 2014; Guessasma ve Nouri 2015; Fabbri ve Cevoli 2016).

Literatürlerde yer alan bu tip FEM destekli araştırmaların çoğunluğunda zedelenmeye neden olan yükleme durumları için statik yükleme durumu, doğrusal (lineer) elastik malzeme modelleri, doğrusal temas (linear contact) ve küçük deformasyon kabulleri yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde ilgili tarımsal ürünlerin deformasyonunu zamana bağlı olarak doğrusal-olmayan yaklaşım ile değerlendiren çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Günümüzün ileri düzey bilimsel, mühendislik ve teknolojik uygulamalarında, bu tip doğrusal analiz yöntemine dayanan yaklaşımlar göreceli olarak yetersiz kalmaktadır (Munjiza vd. 2015).

Çarpma ve düşme durumları gibi anlık göreceli olarak yüksek ve doğrusal olmayan yüklenmelerin ve buna bağlı deformasyonların incelenmesinde, yeni nesil FEM temelli doğrusal olmayan dinamik analizler ve mühendislik simülasyon (Explicit Dynamics) teknikleri, farklı mühendislik alanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Wakabayashi vd. 2008; SolidWorks Doc. 2010; Lee 2012; Wu ve Gu 2012; ANSYS Doc. 2015). Ancak bu tip yeni nesil mühendislik simülasyon uygulamaları, tarımsal ürünlerin zamana bağlı deformasyon analizi çalışmalarında henüz başı çeken uygulamalar arasında yer almamaktadır.

Meyve ve sebzelerin bilgisayar destekli deformasyon ve zedelenme analizlerinde karşılaşılan bir diğer zorluk, bu tip ürünlerin geometrik şekillerinin gerçeğe uygun şekilde tarif edilememesidir. Bu ürünler yüksek derecede düzensiz yüzeylere sahip olabilmektedir. Bu nedenle bu ürünlerin geometrik yapıları basitleştirilerek düzgün geometrik yapılarla temsil edilmeye çalışılmaktadır. Ancak deformasyon analizlerinde ürün geometrisi, ürünlerin deformasyon karakteristiklerinde rol oynayan önemli unsurlardan biridir. Bu nedenle bu tip geometrik şekillerde yapılan geometrik basitleştirmeler, deformasyon analizi sonuçlarını gerçek düzeyden bir miktar uzaklaşmasına neden olabilmektedir. Bu noktada, tersine mühendislik teknolojileri araştırmacılara düzensiz yüzeylere sahip ürünlerin dijital ortama gerçeğe uygun bir şekilde aktarılmasında yardımcı olmaktadır. Ancak tersine mühendislik uygulamalarının meyve ve sebzelerin deformasyon analizinde yer aldığı çalışma sayısı da sınırlı sayıda kalmaktadır (Lewis vd. 2007; Celik vd. 2011).

Ulaşılabilir literatürlerde armut meyvesinin sıkıştırma ve çarpma darbesi altında bazı mühendislik özelliklerinin, deformasyon davranışının ve zedelenme hacminin belirlenmesi üzerine yapılmış çalışmalara rastlamak mümkündür (García vd. 1995; Blahovec vd. 2002; Blahovec vd. 2004; Yurtlu ve Erdoğan 2005, Blahovec ve Paprštejn 2005, Öztürk vd. 2009; Eissa vd. 2012; Fenyvesi vd. 2013; Komarnicki vd. 2016; Yousefi vd. 2016). Ancak özellikle Ankara çeşidi armut meyvesinin FEM temelli doğrusal olmayan dinamik analizi ile zedelenme hacminin belirlenmesi üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanılamamıştır.

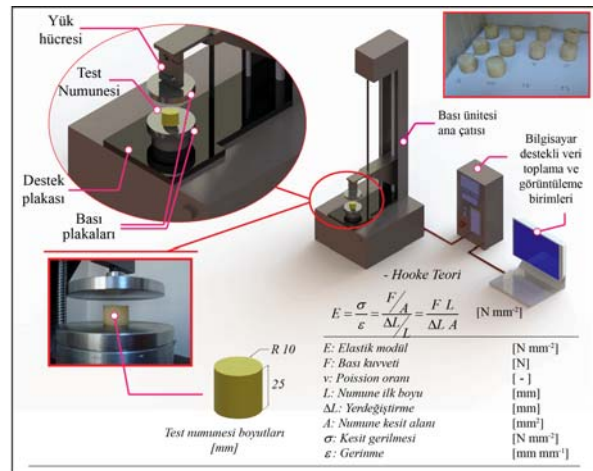
Bu çalışmada örnek olarak armut meyvesi (Ankara Çeşidi) ele alınmış ve birbirleri üzerine düşen iki meyvenin çarpışma durumundaki zamana bağlı deformasyon davranışı simüle edilerek, zedelenme hacimleri hassas bir şekilde ileri düzey bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik teknolojileri kullanılarak hesaplanmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Fiziksel Ölçüm ve Bası Testi

Araştırmada, çarpma zedelenmelerine karşı yüksek hassasiyet durumu ve elma vb. gibi diğer meyve çeşitlerine göre daha düzensiz yüzey formuna sahip

olması göz önünde bulundurularak armut meyvesi (Ankara çeşidi) örnek materyal olarak ele alınmıştır. Materyal örnekleri 2016 yılında yerel bir süpermarketten rastgele olarak seçilmiştir. Seçilen meyvelerin geometrik ölçüleri ve kütleleri hassas ölçüm cihazları (kumpas-0.01 [mm]- ve hassas tartı-0.001 [g]-) kullanılarak üç tekerrürlü olarak ölçülmüştür. Fiziksel ölçümlerde onar adet meyve kullanılmıştır. Daha sonra her bir meyveden silindirik bası testi numuneleri düzgün yüzeyli içi boş silindirik bir kalıp kullanılarak çıkartılmıştır (Numune boyutu $\varnothing 20 \times 25$ [mm]). Hazırlanan test numuneleri meyvenin elastik modülü, akma ve çekme sınırı gibi bazı mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bası testine tabi tutulmuştur. Tüm fiziksel ölçüm ve testler Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü biyolojik malzeme test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testlerde 2000 [N] kapasiteli bir universal biyolojik malzeme test cihazı kullanılmıştır. Testler numunelerinin tek bir nem içeriği için (%84.23±0.49 -Yaş baz; 10 adet numune-) ve oda sıcaklığı altında (20 [°C]) gerçekleştirilmiştir. Numuneler hassas sonuçların elde edilebilmesi amacıyla 2.5 [mm min⁻¹] yükleme hızı ile test edilmiş ve veriler 10 [Hz] örnekleme oranı ile kayıt edilmiştir (ASAE S368.4 W/Corr. 1 DEC 2000 (R2012)). Bası testi detayları Şekil 1'de, fiziksel ölçümler neticesinde elde edilen armut meyvesine ait bazı geometrik ve kütesel ölçüm sonuçları Çizelge 1'de ve bası testi sonucu elde edilen, test numunelerine ait kuvvet-deformasyon davranışı Şekil 2'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 1. Bası testi detayları

Figure 1. Details of the compression test

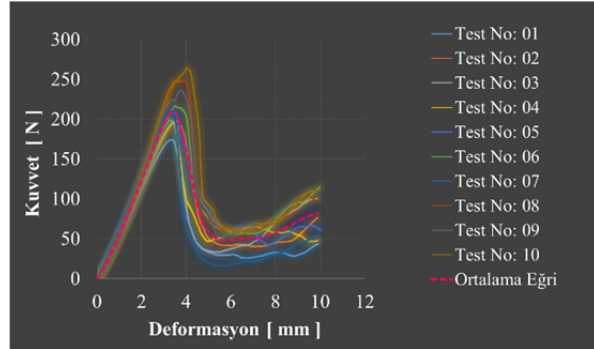
Çizelge 1 Armut meyvesi geometrik ve kütleli ölçüm sonuçları (Numunesi sayısı: 10)

Table 1. Mass and geometrical measurement results for pear fruit (sample number:10)

Tüm meyve (Armut – Ankara Çeşidi)

| Ölçüm ve Hesaplamalar | Birim | Ortalama Ölçüm Değeri | Std. Sapma |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|------------|
| Hacimsel | Uzunluk (X) | 71.94 | 5.07 |
| | Yükseklik (Y) | [mm] 81.85 | 3.71 |
| | Genişlik (Z) | 76.42 | 3.15 |
| Kütle | [g] | 239.83 | 34.39 |
| Hacim* | [mm ³] | 232353.97 | 33318.85 |
| Sferisite | [(x.y.z) ^{1/3}] / z | [-] 1.07 | 0.04 |

* Hacimler silindirik test numunelerinin ortalama yoğunluk değeri referans alınarak hesaplanmıştır. (1032.19 [kg m⁻³])



Şekil 2. Bası testi sonuçları (Test numunesi sayısı: 10)

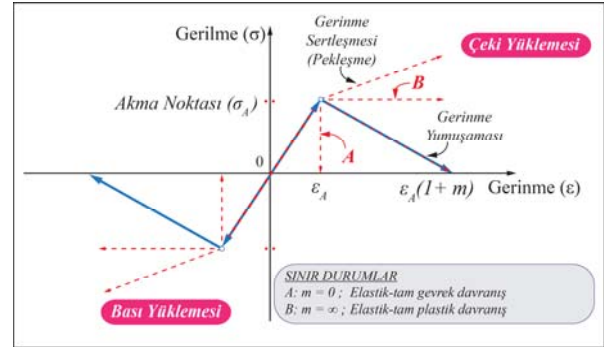
Figure 2. Results of the compression test (number of the sample: 10)

FEM Malzeme Modeli ve Özellikleri

Bası testleri sonucu her bir numune için kuvvet deformasyon değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin ortalaması alınarak, meyve deformasyonunu tarif eden bir kuvvet deformasyon eğrisi çizdirilmiştir. Bu eğri tanımlanan yükleme koşulu altında meyvenin deformasyon davranışını temsil etmektedir. Daha sonra Hooke Teorisi referans alınarak kuvvet deformasyon değerleri numune kesit alanına ve numune ilk boyuna oranlanarak önce mühendislik gerilme-gerinme değerlerine ve sonra ilgi eşitlikler ile gerçek gerilme-gerinme değerlerine çevrilmiştir. Bu değerler üzerinden elastik deformasyon bölgesi tanımlanmıştır. Bu bölge için elastik modülü değeri hesaplanmış, akma sınırı ve ötesinde çekme sınırı değerleri belirlenmiştir. Bu değerler ile elde edilen eğride akma sınırının ötesinde malzemenin plastik (kalıcı) deformasyona uğradığı görülmektedir.

Bazı mukavemet analizi uygulamalarında plastik (kalıcı) deformasyon bölgesi, yük altında çalışan malzemeler için hasar bölgesi olarak

nitelendirilmektedir. Plastisite teorisi akma noktasına kadar elastik deformasyona uğrayan ve bu noktanın ötesinde plastik (kalıcı) deformasyona uğrayan malzemelerin yük altındaki davranışı ile ilgilenmektedir. Ancak bu davranışın FEM temelli analizlerde gerçeğe uygun şekilde tarif edilmesi oldukça karmaşık ve zor bir iştir. Bunun için birçok ve çeşitli deneysel parametrenin elde edilmesi, fiziksel ölçümler ile birbirlerine uydurulması gerekmekte ve bu doğrultuda çeşitli malzeme modelleri tanımlanmaktadır. Bu noktada daha kolay tarifler için plastisite teorisi idealize edilmiş malzeme modelleri ile anlatılmaya çalışılmaktadır (Pandey 2016). FEM temelli simülasyonların kullanıldığı plastik deformasyonun hesaba katıldığı birçok uygulamada, idealize edilmiş malzeme modelleri başarı ile kullanılmaktadır. Bu bağlamda, çeki ve bası yüklemeleri altındaki idealize edilmiş çift doğrusal (Bi-linear) gerilme gerinme ilişkisi Şekil 3’de gösterildiği şekilde ifade edilebilmektedir.



Şekil 3. İdealize edilmiş çift-doğrusal gerilme gerinme ilişkisi modeli

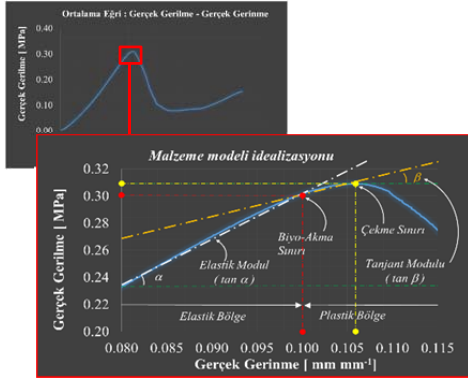
Figure 3. Idealized double-linear stress-strain correlation

Gerçekte bu durum çoğu biyolojik malzeme için geçerli olmaktadır. Bası testi sonucu elde edilen gerilme gerinme değerleri incelendiği zaman, armut meyvesi için izotropik çift doğrusal malzeme idealize malzeme modeli tanımlaması yapmak yanlış olmayacaktır. Böylelikle meyvenin akma sınırı ötesinde plastik deformasyon davranışı, gerçeğe daha uygun bir şekilde simule edilebilecektir. Testler sonucu elde edilen gerçek gerilme-gerinme eğrisinin, çift-doğrusal elastik plastik malzeme modeline göre idealize edilmesi Şekil 4’de gösterilmiştir. Armut meyvesi ve FEM temelli simülasyonda kullanılan destek elemanı için malzeme özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

FEM Simülasyon

Özellikle karmaşık yüzey formlarına sahip ürünlerin bilgisayar destekli deformasyon

analizlerinde, daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi amacıyla düzgün olmayan orijinal ürün geometrilerinin dijital ortama aktarılması oldukça önemli bir konudur. Bu çalışmada örnek olarak ele alınan armut meyvesi, tersine mühendislik yaklaşımı ile ileri düzey katı modelleme teknikleri kullanılarak dijital ortama aktarılmıştır. Çalışmada ürün geometrisini dijitalleştirme işlemlerinde NEXT ENGINE 2020i modeli 3D lazer tarayıcı kullanılmıştır. Tarama süreci meyvenin dikey ve yatay konumu için toplam 16 adımda, makro ölçekte ve HD çözünürlükte yürütülmüştür. Toplam tarama süreci yaklaşık 45 dakikada tamamlanmıştır. Daha sonra tarama sonucu elde edilen dijital ortam verileri, SolidWorks 3D katı modelleme yazılımına aktarılmış ve taranmış yüzey formları işlenerek armut meyvesinin orijinal katı modeli elde edilmiştir.



Şekil 4. Armut meyvesi malzeme modeli idealizasyonu

Figure 4. Material model of pear fruit

Çizelge 2 Armut meyvesi çarpışma simülasyonu için malzeme özellikleri

Table 2. Pear fruit material properties of the collision simulation

FEM temelli simülasyonda kullanılan malzeme özellikleri

| Özellik | Birim | Malzeme | |
|-------------------------|-----------------------|---|---------------------------------|
| | | Armut (Ankara çeşidi) ^{1,2,3} | Paslanmaz Çelik ⁴ |
| Elastik Modül | [MPa] | 3.248 (R ² : 0.9966) | 193000 |
| Tanjant Modülü | [MPa] | 1.358 (R ² : 0.9966) | 1800 |
| Poisson Oranı | [-] | 0.427 | 0.310 |
| Biyo-Akma / Akma Sınırı | [MPa] | 0.300 | 210 |
| Çekme sınırı | [MPa] | 0.309 | - |
| Kuvvet @ Biyo-Akma | [N] | 205.850 | - |
| Yoğunluk | [kg m ⁻³] | 1032 | 7750 |

1. Elastik modül (tan α): Elastik bölge / gerçek gerilme-gerçek gerilme eğrisi eğimi

2. Tanjant modül (tan β): Plastik bölge / gerçek gerilme-gerçek gerilme eğrisi eğimi

3. Poisson oranı: (Yurtlu and Erdogan 2005)

4. ANSYS – Malzeme kütüphanesi

Araştırmada, bir armut meyvesinin paslanmaz çelik bir platform üzerinde sabit duran diğer bir armut meyvesi üzerine 1 [m] yükseklikten yerçekimi etkisi (9.8066 [m s⁻²]) altında serbest düşme senaryosu simüle edilmiştir. Simülasyonda çarpma anında

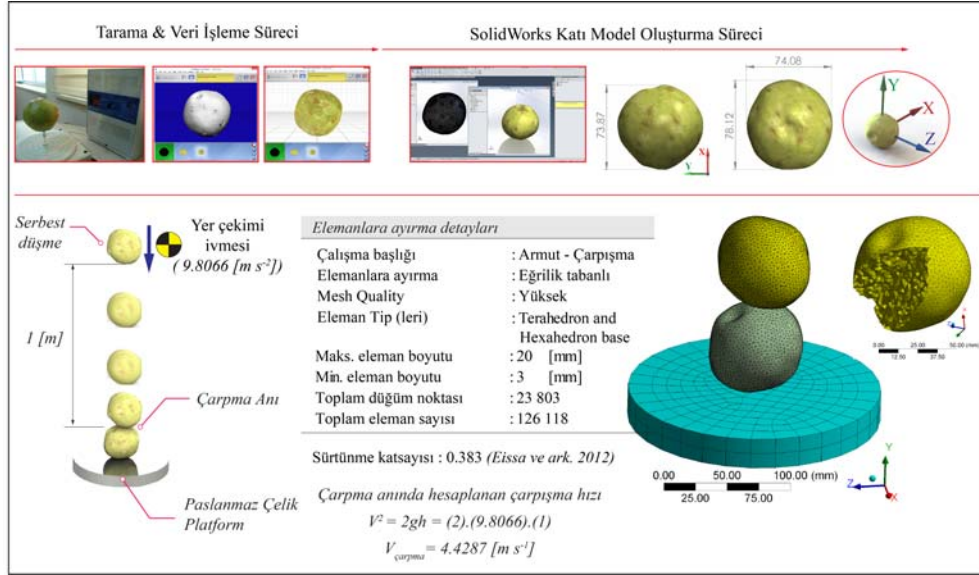
meyvelerin uğradığı deformasyon ve ani çarpma darbesi sonucu ortaya çıkan yapısal eşdeğer gerilme değerleri, zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Meyvenin zedelenme sınırı, biyolojik malzeme akma değeri olarak kabul edilmiş ve bu değer ötesine maruz kalan bölgeler, kalıcı deformasyona uğrayan bölgeler olarak tanımlanmıştır.

Simülasyon senaryosunda armut meyvesi et kısmı, kabuğu ve çekirdekleri ile bir bütün olarak modellenmiş, homojen, izotropik elastik plastik çift doğrusal malzeme modeli, sürtünmeli temas (Frictional non-linear contact) kabulleri ve doğrusal olmayan dinamik analiz yaklaşımı ile simülasyon ayarları ve sınır koşulları tanımlamaları yapılmıştır. Simülasyon için ANSYS Workbench ticari sonlu elemanlar kodu Explicit Dynamics modülü kullanılmıştır. Simülasyonda tanımlanan katı modellerin sonlu eleman modellerinin (Mesh structure) oluşturulmasında eğrilik tabanlı elemanlara ayırma stratejisi (Curvature meshing) kullanılmıştır. Elemanlara ayırma sürecinde, katı modellerin orijinal geometrilerini yeterli düzeyde temsil edebilecek eleman boyutları tanımlanmasına özen gösterilmiştir. Tanımlanan simülasyon senaryosu, tersine mühendislik süreci, sınır koşulları ve sonlu eleman modeli detayları Şekil 5’de gösterilmiştir

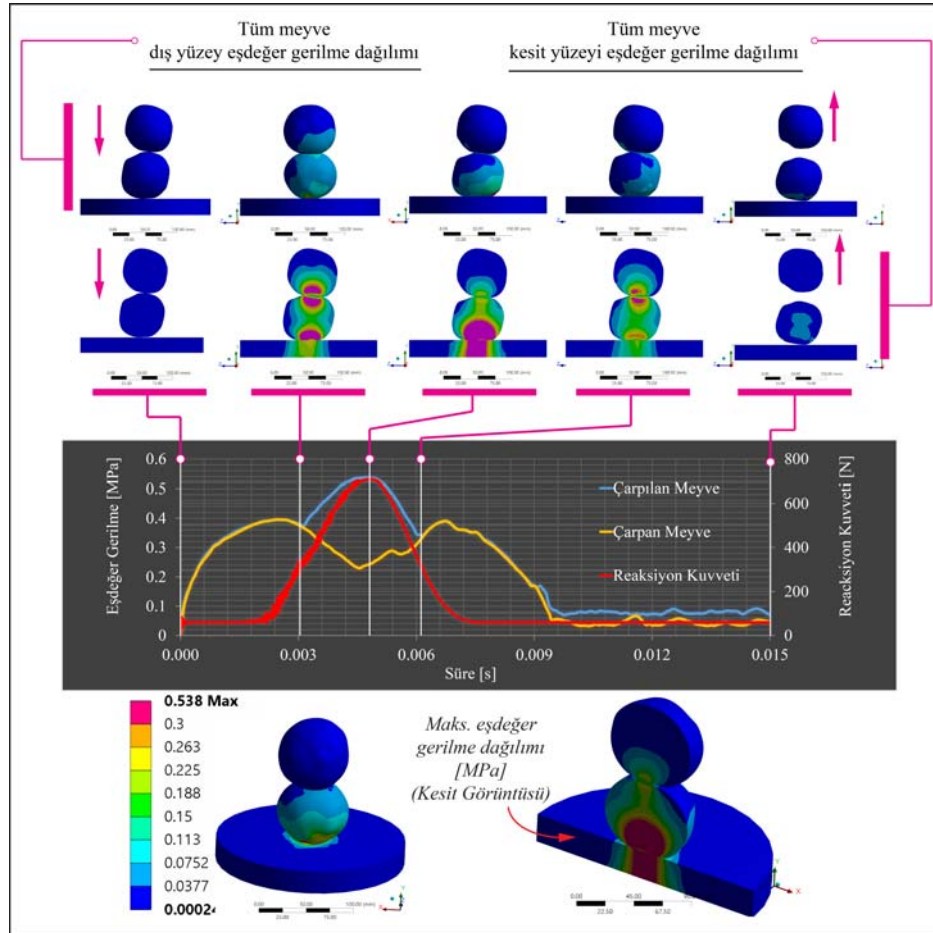
Bulgular ve Tartışma

Çözüm öncesi işlemlerin tamamlanmasının ardından, simülasyon çözdürülmüş ve tüm sayısal sonuçlar ve görsel çıktılar kayıt edilmiştir. Simülasyonda; düşen meyvenin çarpma anı ile birlikte deforme olması, geri sekmesi ve yeterli düzeyde temasının kesilmesine kadar geçen süre dikkate alınmış ve toplam 0-1.5x10⁻² [s] süre aralığında simülasyon senaryosu çözdürülmüştür. Düşen meyvenin çarpma anındaki çarpışma hızı 4.4287 [m s⁻¹] olarak hesaplanmıştır. Toplam simülasyon süresi içerisinde maksimum eşdeğer gerilme değeri, çarpılan (sabit) meyve üzerinde ilk temas anından 4.8 10⁻³ [s] sonra 0.538 [MPa] olarak elde edilmiştir. Düşen meyvede ise maksimum eşdeğer gerilme değeri, ilk temas anından 2.625 10⁻³ [s] sonra 0.394 [MPa] olarak elde edilmiştir. Çarpışma sonucunda çarpan ve çarpılan meyveler için düşey yönde oluşan maksimum deformasyon değerleri ise sırasıyla 11.516 [mm] ve 8.778 [mm] olarak elde edilmiştir. Çarpma anında çelik platformda düşey yönünde ortaya çıkan maksimum reaksiyon kuvveti ise 708.19 [N] olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen zamana bağlı bazı sonuçların grafiksel gösterimleri ve simülasyon görsel çıktıları Şekil 6’de verilmiştir.

Çarpma Etkisi Altında Kalan Armut Meyvelerinin (Ankara çeşidi) Zedelenme Hacminin Doğrusal Olmayan Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi ile Belirlenmesi



Şekil 5. Katı modelleme süreci, simülasyon senaryosu, sınır şartları ve elemanlara ayırma detayları
Figure 5. Solid modelling process, simulation scenario, boundary conditions and details of the elements' seperation



Şekil 6. Simülasyon sonuç çıktıları

Figure 6. Simulation results

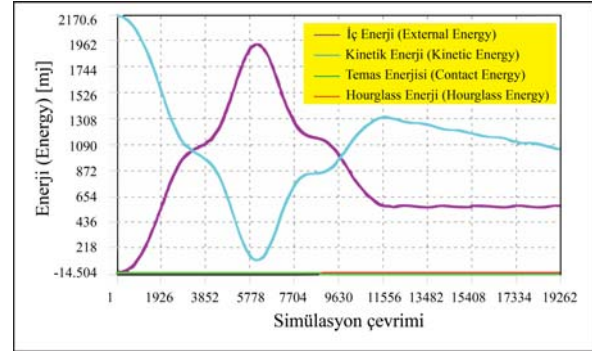
Şekil 6'da verilen çift eksenli grafikte, çarpan ve çarpılan meyvelerin maruz kaldığı maksimum eşdeğer gerilme ve platformda ortaya çıkan reaksiyon kuvveti değerlerinin, çarpma süresince zamana bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Bu değişiminin sayısal ve görsel verilerinin deneysel ve/veya analitik yöntemlerle elde edilmesi, oldukça karmaşık veya neredeyse imkansız bir durum haline gelebilmektedir. Bu çalışmada özellikle meyvelerin maruz kaldığı iç gerilme dağılımlarının çarpma olayı süresince değişimi, doğrusal olmayan yaklaşım ile (özellikle malzeme ve temas durumları) ileri düzey mühendislik simülasyon teknikleri ile başarılı bir şekilde ortaya konabilmiştir.

Grafikte her iki meyve için gerilme değişimleri incelendiğinde, çarpma anından (ilk temas) itibaren $0-3 \cdot 10^{-3}$ [s] aralığında gerilme değerlerinin her iki meyve için artarak eş ilerlediği, ancak bu sürenin ardından çarpılan meyvede gerilme değerlerinin artışı görülürken, çarpan meyvenin gerilme değerlerinin düşme eğilimi gösterdiği görülmektedir. $4.8 \cdot 10^{-3}$ [s] anına kadar düşme eğilimi gösteren çarpan meyvenin gerilme değerleri bu andan sonra tekrar bir artış göstermektedir. Bunun en önemli sebebi olarak, çarpma durumunda çarpan meyvede çarpma enerjisinin çarpılan meyveye geçişi olduğu söylenebilir. $4.8 \cdot 10^{-3}$ [s] anı simülasyonda maksimum eşdeğer gerilme değerinin elde edildiği andır. Bu anda, platformda hesaplanan reaksiyon kuvveti de maksimum değerine ulaşmaktadır ve bu nokta çarpan meyvenin çarpma etkisiyle geri sekme anı olmaktadır. Bu noktanın ardından ise reaksiyon kuvvetinde düşme görülmektedir. $6.67 \cdot 10^{-3}$ [s] sonunda ise her iki meyvedeki gerilme değerleri eş olarak düşüş göstermekte ve $1.2 \cdot 10^{-2}$ [s] anında ise iki meyvenin teması kesilmektedir.

Simülasyon görsel çıktılarına ek olarak kurulan simülasyon senaryosunun çözdürülmesi ile edilen toplam enerji dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğruluğunu test eden göstergelerden birisi de simülasyon sonucu elde edilen enerji hareketliliğidir. Bu hareketlilikte toplam enerjinin sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum, doğru analiz sonuçlarının göstergelerinden birisidir (Chotika vd. 2001; Elitok vd. 2006). Şekil 7'de kinetik enerjinin zamanla azalıp iç enerjiye dönüştüğü (meyveler ve platform tarafından absorbe edilen enerji) görülmektedir. Temas enerjisi ve Hourglass

enerjisinin (sayısal yöntem temelli dinamik analizlere özgü gerçekçi olmayan sonlu eleman dengesizlikleri/düzensizlikleri kaynaklı enerji tarifi: sahte sıfır enerji modu) (Hallquist 2006; Stewart vd. 2006; Wallmeier vd. 2015) kinetik ve iç enerji değerlerine göre çok küçük değerlerde ve göz ardı edilebilir düzeyde kaldığı gözlemlenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde Hourglass enerjisi, sayısal analizde kullanılan eleman ağının doğruluğu için iyi bir göstergedir. Eğer bu enerji, iç enerji değerinin %5-10 değerinden daha küçük kalıyorsa, sonlu eleman modeli kalitesinin tatmin edici olduğu söylenebilir (Björkmon 2010; Dilek ve Gedikli 2014, ANSYS Doc. 2015). Simülasyon sonucunda ortaya çıkan iç enerjiye göre, %5'den daha düşük seviyedeki Hourglass enerjisi simülasyon çalışmasında sonlu elemanlar modelinin iyi düzeyde tanımlandığının bir göstergesidir.



Şekil 7. Simülasyon enerji dağılım özeti

Figure 7. Energy distribution summary of the simulation

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, tanımlanan düşme senaryosu neticesinde her iki meyvede de, biyolojik akma sınırının ötesinde bir gerilme değerine maruz kaldığı bölgelerin olduğu görülmektedir. Biyolojik akma sınırı, malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye yani kalıcı deformasyon bölgesine geçtiği sınır olarak dikkate alındığında (hasar durumu kabulü), bu sınırın ötesinde bir gerilme değerine maruz kalan malzeme bölgeleri "zedelenmiş bölgeler" olarak tanımlanabilir. Bu bölgelerin hacmi ise "zedelenme hacmi" olarak kabul edilebilir. Bu bölgelerin hassas bir şekilde hesaplanmasında, sonlu elemanlar kodu işlem sonrası fonksiyonları kullanılmış ve meyvenin biyolojik akma sınırı gerilme değerlerini aşan bölgeler tüm meyve modellerinden çıkartılmıştır. Çıkartılan bölgeler katı modelleme yazılımında işlenmiş ve zedelenme bölgelerinin toplam hacimleri, kütleleri

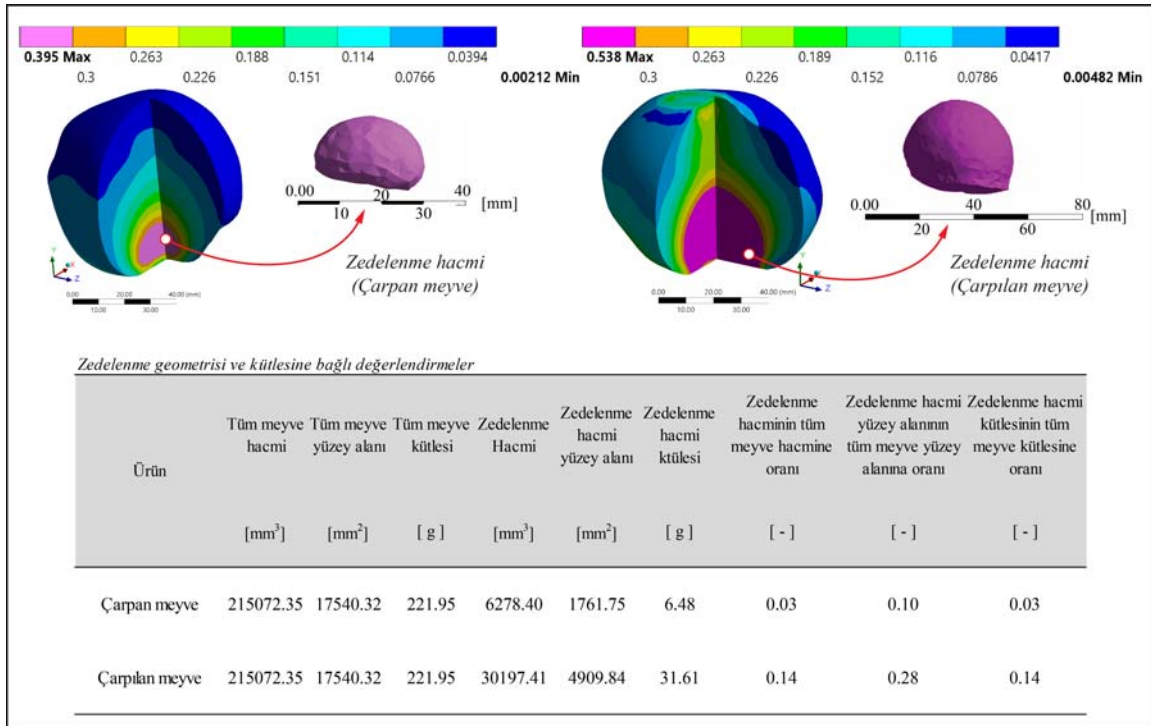
Çarpma Etkisi Altında Kalan Armut Meyvelerinin (Ankara çeşidi) Zedelenme Hacminin Doğrusal Olmayan Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi ile Belirlenmesi

ve yüzey alanları elde edilmiştir. Buna göre meyveler için tanımlanan çarpma senaryosunda, zedelenme hacminin toplam hacme oranı sırasıyla çarpan ve çarpılan meyveler için 0.03 ve 0.14 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler çarpılan meyvenin çarpan meyveye oranla daha fazla zedelendiğinin bir göstergesidir. Bunun en büyük nedeni çarpılan meyvenin çelik platform ve çarpan meyve arasında anlık ve hızlı bir şekilde sıkıştırılmaya maruz kalmasıdır. Çarpan meyve düşme durumunda kazandığı kinetik enerjiden kaynaklı kuvveti çarpılan meyveye iletmış, çarpılan meyve bu enerjiyi absorbe ederken, bu kuvveti taşıyamadığı bölgelerde zedelenme sınırı aşılmıştır. Zedelenme bölgelerinin ortaya çıkartılması ve bu bölgelere ait değerler Şekil 8'de verilmiştir.

Sonuç

Meyve ve sebzeler gibi tarımsal ürünlerde karşılaşılan en yaygın zedelenmeler, meyvenin dış etkenlerle veya birbirleriyle çarpışması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. İlgili tarımsal üretim ve ürün işleme süreçlerinde kullanılan makine sistemlerinin tasarımı, ürün zedelenme miktarlarının belirlenmesi ve bu değerlerin tasarım sınırları içerisinde bir

optimizasyon parametresi olarak kullanılması optimum makine sistemlerinin geliştirilmesi çalışmalarında önemli bir rol almaktadır. Ancak zedelenme parametrelerinin geleneksel mekanik test ve analitik yöntemlerle hassas bir şekilde ortaya konması oldukça zahmetli, bazı durumlarda ise imkânsız olmaktadır. Bu noktada ileri düzey bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik simülasyon teknolojilerinin kullanımı zedelenme parametrelerinin daha hassas bir şekilde ortaya çıkartılması adına oldukça faydalı olacaktır. Bu araştırmada örnek bir meyve (Armut-Ankara çeşidi) için çarpışma senaryosu kurulmuş ve meyvelerin birbirleri ile çarpışması neticesinde ortaya çıkan zedelenmelerin zamana bağlı değişimi, ilerleyişi ve zedelenme hacimlerinin belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır. Araştırma sonucunda ele alınan meyveler için tanımlanan çarpma kaynaklı zedelenme hacimleri başarı ile hassas bir şekilde belirlenmiş ve bu tip tarımsal ürünlerin deformasyon analizlerinde doğrusal olmayan dinamik analiz yaklaşımı ile ileri düzey bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik teknolojileri kullanımının oldukça faydalı olabileceği örnek bir simülasyon çalışması ile gösterilmiştir.



Şekil 8. Zedelenme hacminin belirlenmesi

Figure 8. Determination of bruise volume

LİTERATUR LİSTESİ

- Abedi G and Ahmadi E (2013). Design and evaluation a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: bruise modeling of red delicious apple. *Australian Journal of Crop Science*, 7: 962-968.
- ANSYS Documentation (2015). Release notes: Explicit dynamics analysis. Release 16.2. ANSYS Inc.
- ASAE S368.4 W/Corr. 1 DEC2000 (R2012). Compression test of food materials of convex shape. American Society of Agricultural Engineers (ASAE) Standards.
- Berardinelli A, Donati V, Giunchi A, Guarnieri A and Ragni L (2005). Damage to pears caused by simulated transport. *Journal of Food Engineering*, 66: 219-226.
- Björkmon M (2010). Evaluation of finite element tools for transient structural dynamic simulations of firing systems. MSc Thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden.
- Blahovec J and Paprštejn F (2005). Susceptibility of pear varieties to bruising. *Postharvest Biology and Technology*, 38: 231-238.
- Blahovec J, Mareš V and Paprštejn F (2004). Static and dynamic tests of pear bruise sensitivity. *Res. Agr. Eng.*, 50: 54-60.
- Blahovec J, Vlckova M and Paprštejn F (2002). Static Low-Level Bruising in Pears. *Res. Agr. Eng.*, 48: 41-46.
- Cardenas WM and Strohshine RL (1991). Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping. *Trans. ASAE*, 34: 920-929.
- Celik HK, Kabas O, Ozmerzi A and Akinci I (2008). Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *J. Sci. Food Agric.*, 88: 1537-1541.
- Celik HK, Rennie AEW and Akinci I (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104: 293-298.
- Chen H and De Baerdemaeker J (1993a). Modal analysis of the dynamic behaviour of pineapples and its relation to fruit firmness. *Trans. ASAE*, 36: 1439-1444.
- Chen H and De Baerdemaeker J (1993b). Finite-element-based modal analysis of fruit firmness. *Trans. ASAE*, 36: 1827-1833.
- Chen H, De Baerdemaeker J and Bellon V (1996). Finite element study of the melon for nondestructive sensing of firmness. *Trans. ASABE*, 39: 1057-1065.
- Chotika T, Biermann J-W and Koetnuyom S (2011). Energy Absorption Analysis of Various Vehicles under Crash Test Simulation. The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October 2011, Krabi Thailand.
- Dilek D ve Gedikli H (2014). Kare Kesitli İçi Boş Tailor-Welded Tüplerin Çarpışma Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*, 55: 56-64.
- Eissa A, Alghannam A and Azam M (2012). Mathematical Evaluation Changes in Rheological and Mechanical Properties of Pears during Storage under Variable Conditions. *Journal of Food Science and Engineering*, 2: 564-575.
- Elitok K, Güler MA, Avcı FH and Stelzmann U (2006). LS-DYNA ile ECE-R66 Yönetmeliği'ne Uygun Otobüs Devrilme Analizi. *TurkCAD/CAM.net Dergisi*, p 13.
- Erdoğan D ve Yurtlu YB (2005). Effect of Storage Time on Some Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Pears and Apples. *Turk J Agric For*, 29: 469-482.
- Fabbri A and Cevoli CC (2016). Rheological parameters estimation of non-Newtonian food fluids by finite elements model inversion. *Journal of Food Engineering*, 169: 172-178.
- Fabbri A, Cevoli C, Cocci E and Rocculi P (2011). Determination of the CO₂ mass diffusivity of egg components by finite element model inversion. *Food Research International*, 44: 204-208.
- Fenyvesi L, Fenyvesi D and Csatár A (2013). Stress Analysis in Fruits. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Mechanical Engineering*, 2013: 1-6.
- García J, Ruiz-Altisent M and Barreiro P (1995). Factors Influencing Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Apples and Pears. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61: 11-17.
- Guessasma S and Nouri H (2015). Compression behaviour of bread crumb up to densification investigated using X-ray tomography and finite element computation. *Food Research International*, 72: 140-148.
- Hallquist JO (2006). LS-Dyna Theory Manual. Livermore Software Technology Corporation, California.
- Hernaández LF and Belle's PM (2007). A 3-D finite element analysis of the sunflower (*Helianthus annuus L.*) fruit. Biomechanical approach for the improvement of its hullability. *Journal of Food Engineering*, 78: 861-869.
- Ihuezze CC, Okafor CE and Ogbobe PO (2013). Finite design for critical stresses of compressed biomaterials under transportation. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013*, 3-5 July 2013, vol. III, London U.K.
- Komarnicki P, Stopa R, Szyjewicz D and Młotek M (2016). Evaluation of bruise resistance of pears to impact load. *Postharvest Biology and Technology*, 114: 36-44.
- Lee H-H (2012). Finite element simulation with ANSYS Workbench 14. SDC Publications.
- Lewis R, Yoxall A, Canty L and Romo E (2007). Development of engineering design tools to help reduce apple bruising. *Journal of Food Engineering*, 83: 356-365.
- Lu R and Abbott JA (1997). Finite element modelling of transient responses of apples to impulse excitation. *Trans. ASAE*, 40: 1395-1406.
- Munjiza A, Rougier E and Knight EE (2015). Large strain finite element method. John Wiley & Sons, UK.

Çarpma Etkisi Altında Kalan Armut Meyvelerinin (Ankara çeşidi) Zedelenme Hacminin Doğrusal Olmayan Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi ile Belirlenmesi

- Opara U and Pathare P (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce-A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91: 9-24.
- Ozturk I, Ercisli S, Kalkan F ve Demir B (2009). Some chemical and physico-mechanical properties of pear cultivars. *African Journal of Biotechnology*, 8: 687-693.
- Pandey PC (2016). Continuum Damage Mechanics: Review of Plasticity Concepts, NPTEL - Civil Engineering Lecture Notes - Module 4 (Lectures 15-20). <http://www.nptel.ac.in/courses/105108072/4> (date of access: 01.01.2016).
- Sarig Y (1991). Review: Impact loading associated with agricultural products. *International Journal of Impact Engineering*, 11: 251-275.
- Sitkei G (1986). *Mechanics of agricultural materials*. Elsevier Science Publisher, Hungary.
- SolidWorks Documentation (2010). SolidWorks simulation premium: nonlinear-Training Manual Serial No: 22658021044 ENG0001. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, USA.
- Stewart JR, Gullerud AS and Heinstein MW (2006). Solution verification for explicit transient Dynamics problems in the presence of hourglass and contact forces. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195: 1499-1516.
- Tinoco HA, Ocampo DA, Peña FM and Sanz-Urbe JR (2014). Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea Arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108: 17-27.
- Van Zeebroeck M, Tijskens E, Liedekerke P, Deli V, Baerdemaeker J and Ramon H (2003). Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. *Journal of Sound and Vibration*, 266: 465-480.
- Van Zeebroeck M, Van linden V, Ramon H, De Baerdemaeker J, Nicolai B and Tijskens E (2007). Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45: 157-167.
- Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T and Igarashi Y (2008). Nonlinear finite element analyses: Advances and challenges in dental applications. *Journal of Dentistry*, 36: 463-471.
- Wallmeier M, Linvill E, Hauptmann M, Majschak J-P and Östlund S (2015). Explicit FEM analysis of the deep drawing of paperboard. *Mechanics of Materials*, 89: 202-215.
- Wu SR and Gu L (2012). *Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient Dynamics*. Wiley Publication, p 352.
- Yousefi S, Farsi H and Kheiralipour K (2016). Drop test of pear fruit: Experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*, 147: 17-25.