

Ayrık Elemanlar Metodunun Tarım Makineleri Tasarımında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma

Mustafa ÜÇGÜL¹, Chris SAUNDERS¹, Ali AYBEK²

¹Barbara Hardy Institute, School of Engineering, University of South Australia, Mawson Lakes, SA 5095, Australia

²Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, 46040, Kahramanmaraş, Türkiye

✉ : mustafa.ucgul@unisa.edu.au

ÖZET

Tarımsal üretim için kullanılan enerjinin çok büyük bir kısmı toprak işlemede kullanılmaktadır. Bu nedenle tarımda verimliliği artırmak ve enerji kullanımını azaltmak için enerji gereksinimi düşük olan tarım alet ve makinelerinin geliştirilmesi gereklidir. Tarım makinelerinin analiz ve tasarımı için çeşitli metotlar kullanılıyor olsa da (örneğin: deneysel, analitik ve nümerik (sonlu elemanlar) metotlar) bu metotların her birinin çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada yeni bir yöntem olan ayrık elemanlar metodu tanıtılmış ve bu metodun tarım makineleri tasarımında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla daha önce Saunders (2002) tarafından kulaklı pulluk kullanılarak yapılmış olan deneysel bir çalışma, ayrık elemanlar metodu kullanılarak çeki kuvvetinde maksimum %20.5 ve ortalama toprak profilinde % 9.3 bağıl hata ile simüle edilmiştir. Çalışmanın sonuçları ayrık elemanlar metodunun tarım makineleri tasarımında verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

DOI:10.18016/ksudobil.308577

Makale Tarihi

Geliş Tarihi : 24.04.2017

Kabul tarihi : 25.08.2017

Anahtar Kelimeler

Ayrık elemanlar metodu,
çeki kuvveti,
toprak profili

Araştırma Makalesi

A Research on Utilizing of Discrete Element Method in the Design of Agricultural Machineries

ABSTRACT

The energy required for tillage processes accounts for a significant proportion of total energy usage in crop production. Development of more efficient tillage tools is essential to reduce the energy consumption and to increase agricultural production. Although there are some methods which are currently being used to analyze and design agricultural machineries (i.e. empirical, analytical and continuum numerical (Finite element method) methods), each of which has its own shortcomings. In this study, as a novel approach discrete element method was explained and then the possibility of using discrete element method to design agricultural machineries was investigated. For this purpose, draught forces and soil profile measured by Saunders (2002) for soil-mouldboard plough interaction was simulated. Simulation results showed that draught forces can be predicted with a maximum relative error of 20.5%, while soil profile was simulated with 9.3 % relative error. Results of the study proved that the discrete element method can effectively be used to design agricultural machineries.

Article History

Received : 24.04.2017

Accepted : 25.08.2017

Keywords

Discrete element method,
draught force,
soil profile

Research Article

To Cite : Üçgül M, Saunders C, Aybek A 2018. Ayrık Elemanlar Metodunun Tarım Makineleri Tasarımında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. KSÜ Tarım ve Doğa Derg 21(3): 304-311. DOI:10.18016/ksudobil.308577

GİRİŞ

Tarımsal üretim için kullanılan enerjinin çok büyük bir kısmı toprak işlemede kullanılmaktadır. Petrol fiyatlarındaki artışla birlikte tarımda enerji kullanımının azaltılması daha da önem kazanmıştır. Çeki kuvvetinin büyüklüğü bir tarım makinesinin

enerji gereksinimini belirlemede kullanılan en temel unsurlardan biridir. Eğer tarım makinesi ile toprak arasındaki etkileşim hassas bir şekilde modellenerek çeki kuvveti azaltılabilirse, enerji verimliliği yüksek tarım makineleri, çok pahalı ve zaman alıcı olan ve ancak yılın belirli dönemlerinde yapılabilen arazi testlerine gereksinim duyulmadan tasarlanabilirler.

Genel olarak tarım makinesi ve toprak arasındaki etkileşimi modellemek için üç temel metod kullanılmaktadır. Bu metodlar deneysel, analitik ve nümerik metodlardır. Deneysel modelleme yöntemleri kısa surede pratik bilgiler vermeleri açısından faydalı yöntemler olsalar da, deneysel işlemlerin zaman alıcı ve pahalı olmaları ve sonuçların ancak spesifik durumlar için geçerli olmaları nedeniyle verimli olarak kullanılmamaktadırlar (Raji, 1999). Analitik yöntemler geçmişte ve günümüzde pek çok araştırmacı tarafından tarım makinelerinin tasarım ve analizi amacı ile kullanılsalar da (McKyes, 1985; Godwin ve ark., 2007) toprak yapısının homojen olmaması nedeni ile bütün toprak işleme sürecinde ortaya çıkan kuvvetleri tek bir yönetici denklemle hesaplamak çok gerçekçi bir yaklaşım değildir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak deneysel ve analitik yöntemlerin eksikliklerini gidermek amacı ile nümerik yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerin en çok kullanılanları sonlu elemanlar (Kushwaha ve Shen, 1995; Fielke, 1999) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Karmakar ve Kushwaha, 2005; Karmakar ve ark., 2009) yöntemleridir. Bu yöntemlerle makine-toprak etkileşimi sonucu oluşan kuvvetleri çok pratik bir şekilde hesaplamak mümkün olsa da, toprak için yapılan “süreklilik” varsayımı, toprak yapısında bir değişim ve yer değiştirme olduğunda geçerliliğini yitirmektedir. Ayrıca bu metodlarla toprak hareketini tamamen modellemek mümkün değildir (Asaf ve ark., 2007).

Bazı araştırmacılar, sonlu elemanlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodlarındaki eksiklikleri gidererek makine-toprak iletişimde ortaya çıkan kuvvetleri daha hassas bir şekilde hesaplamak ve bunun yanında toprak hareketini de modellemek amacı ile ayrıık elemanlar yönteminin kullanılabilir olduğunu vurgulamaktadırlar (Shmulevich ve ark., 2007; Chen ve ark., 2013; Ucgul ve ark., 2014; Bravo ve ark., 2014).

Bu çalışmada, ayrıık elemanlar metodunun temel prensipleri ve tarım makinesi ile toprak arasındaki etkileşimi modellemede nasıl kullanılabilceği açıklanmıştır. Daha sonra pulluk ile toprak arasındaki etkileşim sonrası ortaya çıkan çeki kuvveti, ayrıık elemanlar yöntemi kullanılarak modellenip sonuçlar daha önce yapılmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Deney düzeni

Toprak ile kulaklı pulluk arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan kuvvetleri ölçmek için Cranfield Üniversitesi laboratuvarında deneysel bir çalışma Saunders (2002) tarafından yapılmıştır. Çalışmada Kverneland marka tek kulaklı bir pulluk kullanılmıştır (Şekil 1). Pulluğun kesme genişliği 508 mm'dir (uç demiri genişliği 455 mm). Toprak işleme durumundaki şartları tam yansıması açısından (kesilen toprak devrildiğinde açık bir boşluğa düşmesi için) ilk önce deney toprağının bir tarafı pulluğun iş genişliği kadar kesilip test düzeneğinden çıkarılmıştır. Ardından pulluk deneysel düzenek yardımı ile sürülüp işlem tamamlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Pulluk ve test düzeneği



Şekil 2. Deney işlemleri (a) kesip çıkarılan toprak (b) pulluk işlemi

Deneylerde kullanılan toprak kumlu-tınlı toprak olup %68.1 kum, %22.1 silt ve % 9.8 kil ihtiva etmektedir. Deneyler sırasında kullanılan toprağın ortalama kuru yığın yoğunluğu 1523.8 kg m^{-3} , nem oranı %8.2 dir. Toprak işlemede oluşan kuvvetleri ölçmek için Extended Octagonal Ring Transducer (EORT) kullanılmıştır. Bu cihaz ölçülen değerleri 103 Hz ile kaydeden bir veri kaydediciye bağlıdır. Deneyler 4.5 km h^{-1} hızda 120, 170, 225 ve 290 mm derinliklerde yapılmıştır (Saunders, 2002).

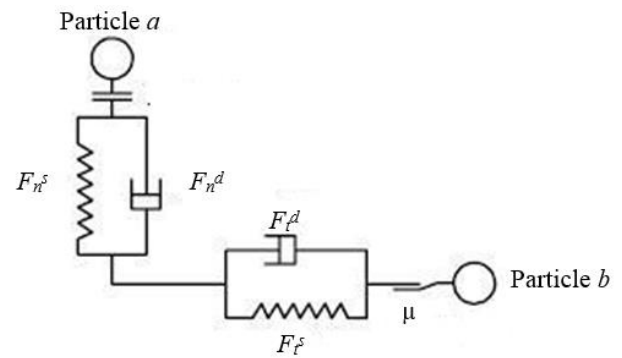
Ayrık elemanlar metodu

Ayrık elemanlar metodu Cundall ve Strack (1971) tarafından geliştirilmiştir. Bu metodun temel prensibi iki ayrık partikül arasındaki etkileşime dayanır. Partiküller arasındaki etkileşim ve buna bağlı olarak ortaya çıkan kuvvetler fiziksel yasalar tarafından kontrol edilen formüllerle hesaplanır. İki partikül arasındaki kuvvetler hesaplandıktan sonra partiküllerin bir sonraki pozisyonları ve oryantasyonları Newton'un ikinci hareket yasasının integre edilmesi ile hesaplanır. Ayrık elemanlar metodunda, kuvvetlerin sadece partiküllere en yakın diğer partiküllere yayıldığı kabul edilir (EDEM, 2011). Bu nedenle hesaplamalar çok küçük zaman dilimleri kullanılarak yapılır ve bu küçük zaman dilimlerinde hız ve ivme sabit kabul edilir. Bu seri hesaplamalar döngüsü bütün sistem dengeye ulaşıncaya kadar ya da daha önce belirlenmiş olan bir toplam simülasyon zamanına kadar devam ettirilir.

Simülasyonlar iki ya da üç boyutlu olarak yapılabilir. Ayrık elemanlar metodu, iki partikül arasındaki etkileşimle ilgili olduğundan, partiküller arasındaki kontak sayısı ne kadar azaltılırsa, simülasyonu tamamlamak için gerekli süre de o kadar kısa olacaktır. Bu yüzden iki boyutlu simülasyonlarda dairesel, üç boyutlu simülasyonlarda ise küresel şekilli partiküller genellikle tercih edilmektedir. İki boyutlu simülasyonlarda daha az partikül kullanıp gerçeğe yakın partikül boyutu kullanılarak daha hassas sonuç elde edilebilir ise de, çoğu tarım makinelerinin üç boyutlu ve kompleks geometrileri nedeni ile üç boyutlu simülasyonların kullanımı daha gerçekçi olacaktır (Raji, 1999). Fakat bu durumda da toprağı modellemek için gerekli olan partikül sayısı artacağı için, toplam simülasyon süresi uzayacaktır. Bu nedenle üç boyutlu ayrık elemanlar modeli kullanılarak yapılacak simülasyonlarda gerçek toprak partikül boyutlarında ($< 2\text{mm}$) partikül kullanmak mümkün değildir. Bu durumda daha büyük partiküller kullanılacağı için malzeme ve etkileşim parametrelerinin, kullanılacak partikül boyutuna göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Ayrık elemanlar metodunda bir diğer önemli husus da kullanıma uygun bir matematiksel modelin seçilmesidir. Üçgül ve ark., (2014) ve Üçgül ve ark., (2015) daha önce yaptıkları çalışmalarda partiküllerin deformasyon davranışını göz önünde

bulunduran histerik yay modelinin toprak modelleme amacı ile kullanılabileceğini, partiküller arasındaki kohezyonunda lineer kohezyon modeli kullanılarak modellenebileceğini ispatlamışlardır.

Bu çalışmada ayrık elemanlar metodunda iki partikül arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan kuvvetler Şekil 3'de gösterilmiştir. Sistemde ilk önce partiküllerin birbirine teması sonucu ortaya çıkan normal ($F_n^s(N)$) ve teğetsel ($F_t^s(N)$) etkileşim kuvvetleri hesaplanır. Enerji emilimi, viskoz maddelerin üzerlerine etki eden kuvvet ortadan kalktığına oluşan toparlanmada bir gecikme meydana getirir. Bu davranışı göstermek için normal ($F_n^d(N)$) ve teğetsel ($F_t^d(N)$) doğrultuda iki sönümleme kuvveti sisteme eklenmiştir.



Şekil 3. Partiküller arası etkileşimin şematik gösterimi (Tanaka ve ark., 2000)

Histerik yay modelinde normal doğrultudaki etkileşim kuvveti ($F_n^s(N)$) aşağıdaki gibi hesaplanır (EDEM, 2011).

$$F_n^s = - \begin{cases} K_1 \cdot U_{abn} & \text{yüklemede} \\ K_2 \cdot (U_{abn} - U_0) & \text{boşaltmada/yüklemede} \\ 0 & \text{boşaltmada} \end{cases} \quad (1)$$

Yukarıdaki ifadedeki K_1 ve K_2 sırası ile yüklemeye ve boşaltmadaki rijitlik katsayıları, $U_{abn}(m)$ ve $U_0(m)$ ise sırası ile bağlı yer değiştirmenin normal bileşeni ve artık örtüşümdür. $K_1(N m^{-1})$, Eşitlik 2 yardımı ile hesaplanırken (Walton, 2006), $K_2(N m^{-1})$, Eşitlik 3 yardımı ile hesaplanır (Walton ve Braun, 1986).

$$K_1 = 5 r_{eq} \cdot \min(\phi_a, \phi_b) \quad (2)$$

$$K_2 = K_1 / e^2 \quad (3)$$

ϕ (MPa) partiküllerin akma dayanımı, e ise geri getirme katsayısıdır. r_{eq} eşdeğer yarıçap katsayısı olup Eşitlik 4 yardımı ile hesaplanırken, artık örtüşüm ($U_0(m)$) ise Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$1/r_{eq} = 1/r_a + 1/r_b \quad (4)$$

$$U_0 = \begin{cases} U_{abn} \cdot (1 - (K_1/K_2)) & \text{yüklemede} \\ U_0 & \text{boşaltmada/yüklemede} \\ U_{abn} & \text{yüklemede} \end{cases} \quad (5)$$

Eşitlik 4'deki r (m) yarıçap olup, a ve b partikül indeksleridir. Teğetsel doğrultudaki etkileşim kuvveti ($F_t^s(N)$) ise aşağıdaki gibi hesaplanır (EDEM, 2011).

$$F_t^s = -n_k \cdot K_1 \cdot U_{abt} \quad (6)$$

Yukarıdaki ifadedeki n_k rijitlik faktörü olup tavsiye edilen değeri 0.95'dir. U_{abt} ise bağıl yer değiştirmenin teğetsel bileşenidir. Normal ($F_n^d(N)$) ve teğetsel ($F_t^d(N)$) doğrultuda sönümleme kuvvetleri ise Eşitlikler 7 ve 8 yardımı ile hesaplanır.

$$F_n^d = -n_c \cdot ((4 \cdot m_{eq} \cdot K_1) / (1 + (\pi / \ln e)^2))^{1/2} \cdot \dot{U}_{abn} \quad (7)$$

$$F_t^d = -((4 \cdot m_{eq} \cdot n_k \cdot K_1) / (1 + (\pi / \ln e)^2))^{1/2} \cdot \dot{U}_{abt} \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitliklerde n_c sönümleme faktörü olup tavsiye edilen değeri 0.05'dir. \dot{U}_{abn} ($m \cdot s^{-1}$) ve \dot{U}_{abt} ($m \cdot s^{-1}$) ise sırasıyla bağıl hızın normal ve teğetsel bileşenleridir. m_{eq} eşdeğer kütle olup katsayısı Eşitlik 9 yardımı ile hesaplanır.

$$1/m_{eq} = 1/m_a + 1/m_b \quad (9)$$

Eşitlik 9'deki m (kg) kütle olup, a ve b partikül indeksleridir. Toplam normal ($F_n(N)$) ve teğetsel ($F_t(N)$) kuvvetler ise Eşitlik 10 ve 11'de gösterildiği gibi hesaplanırlar.

$$F_n = F_n^s + F_n^d \quad (10)$$

$$F_t = -\min(F_t^s + F_t^d, \mu \cdot F_n^s) \quad (11)$$

Eşitlik 11'deki μ static sürtünme katsayısıdır. Partiküller arası sürtünmenin teğetsel hareketi sınırladığı varsayılarak, kohezyon, kohezyon kuvvetinin toplam normal kuvvete eklenmesi ile hesaplanır. Kohezyon kuvveti ($F_c(N)$) şu şekilde hesaplanır;

$$F_c = \xi \cdot A_c \quad (12)$$

Eşitlik 12'deki ξ ($J \cdot m^{-3}$) kohezyon enerji yoğunluğu olup bir partikülün kendine en yakın olan diğer partikülden ayrılması için gerekli olan enerjinin, ayrılan partikülün toplam hacmine bölünmesi ile hesaplanır. A_c (m^2) etkileşim alanıdır (EDEM, 2011). Kohezyon kuvvetinin hesaplanmasından sonra Eşitlik 10, Eşitlik 13 de gösterildiği gibi yeniden düzenlenir.

$$F_n = F_n^s + F_n^d + F_c \quad (13)$$

Teğetsel kuvvetten (M (Nm)) ve yuvarlanma direncinden (M_r (Nm)) dolayı oluşan momentlerin büyüklükleri Eşitlik 14 ve 15'de görüldüğü gibi hesaplanır (Raji, 1999).

$$M = r_{con} \cdot F_t \quad (14)$$

$$M_r = -\mu_r \cdot F_n^s \cdot r_{con} \cdot \lambda_\theta \quad (15)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $r_{con}(m)$ partiküller arasındaki kontak noktasından, partiküllerin ağırlık merkezlerine olan mesafedir. μ_r yuvarlanma direni katsayısı ve λ_θ açılal hızın birim vektörüdür. Toplam kuvvetler ve momentler hesaplandıktan sonra partiküllerin yeni pozisyon ver oryantasyonları Eşitlik 16 ve 17 yi integre etmek suretiyle aşağıdaki gibi hesaplanırlar.

$$\ddot{U} = (F_n + F_t + F_c) / m \quad (16)$$

$$\ddot{\theta} = (M + M_r) / I \quad (17)$$

Eşitlik 16 ve 17'deki \ddot{U} ($m \cdot s^{-2}$) hareket ivmesi, $\ddot{\theta}$ ($rad \cdot s^{-2}$) açılal ivme, I ($kg \cdot m^2$) atalet momentidir.

Ayrık elemanlar metodu kalibrasyon ve simülasyonu

Similasyonlar DELL Precision T7910 Intel ® Xeon CPU E5-2680 v3 @ 2.50 GHz marka bir bilgisayar ve EDEM 2.7™ yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlarda toprak parçacıklarını modellemek için 10 mm nominal yarıçaplı küresel partiküller kullanılmıştır. Partiküller nominal yarıçapın 0.75 ile 1.5 katı arasında olacak şekilde üretilmiştir. Ayrık elmanlar metodu simülasyonunda kullanılan parametreler Çizelge 1 de sunulmuştur.

Çizelge 1'deki bazı parametreler Saunders (2002) tarafından laboratuvarında yapılan ölçümlerle saptanmış olup geri kalan parametreler mevcut literatürden ya da kalibrasyon ile elde edilmişlerdir. Kalibrasyon prosesini, simüle edilen çeki kuvveti sonuçlarının ölçülen test sonuçları ile karşılaştırılmasından oluşmaktadır. Çizelge 1'deki bilinen parametreler kullanılarak, toprağın toprak üzerindeki geri getirme ve toprağın toprak üzerindeki yuvarlanma direnci katsayıları deneme yanılma metodu ile ölçülen değerler bulunana kadar değiştirilmiştir. Saunders (2002) tarafından toprakla metal arasındaki adhezyon ihmal edilebilir seviyede rapor edildiğinden, similasyonlarda bu değer dikkate alınmamıştır.

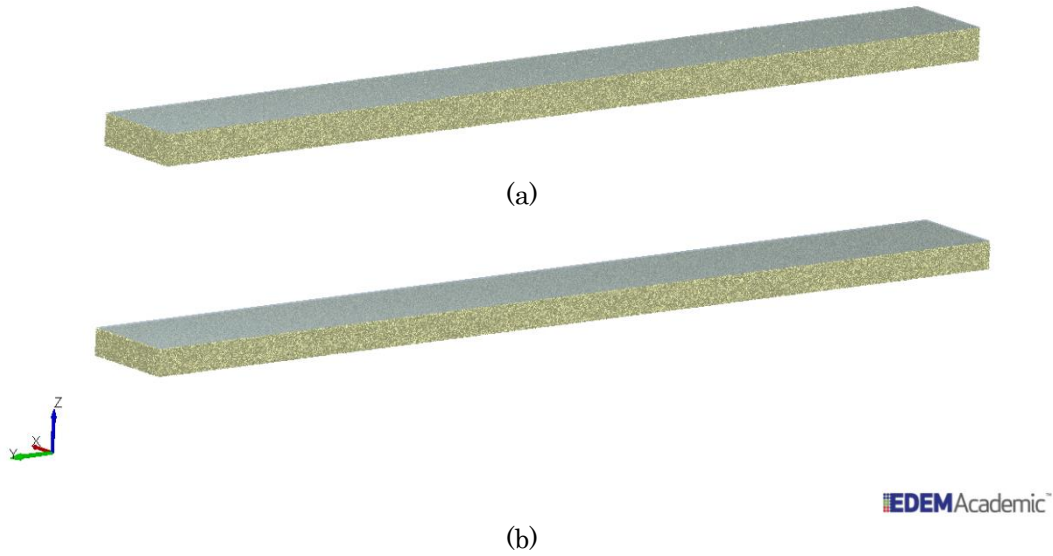
Simülasyonlar için 20 m uzunluğunda, 2 m genişliğinde ve 0.6 m derinliğinde sanal bir toprak parçası 3169791 adet partikül üretilerek oluşturulmuştur. Daha sonra bu toprak parçasının tam üzerinde sanal bir düzlem oluşturulmuş ve testlerin yapıldığı kuru yığın yoğunluğu olan 1523.8 $kg \cdot m^{-3}$ elde edilene kadar bu sanal toprak parçası preslenmiştir (Şekil 4).

Daha sonra pulluğun sanal bir modeli yapılarak, simülasyona aktarılmıştır (Şekil 5a). Simülasyona aktarılan pulluğun hızı 4.5 $km \cdot h^{-1}$ olarak sabitlenmiş ve daha sonra simülasyon 120, 170, 225 ve 290 mm pulluk derinlikleri tekrarlanmıştır. Testlerde iş genişliği kadar kesilip test düzeneğinden çıkarılan toprağı modellemek için pulluğun yaklaşık 2.5 m önünde, birinci pullukla aynı hız ve derinlikte hareket

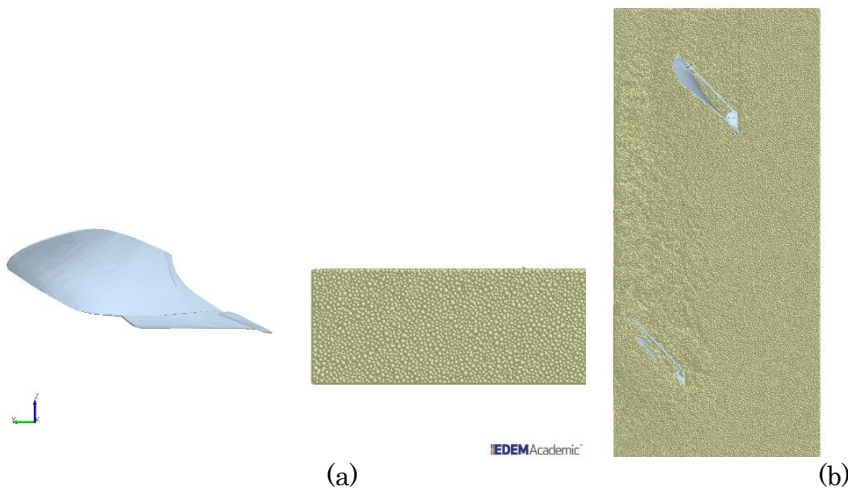
eden ikinci bir pulluk simülasyona eklemiştir (Şekil 5b).

Çizelge 1. Ayrık elemanlar metodu simülasyonunda kullanılan parametreler

Özellik	Değeri	Kaynak
Toprak partiküllerinin yoğunluğu (kg m^{-3})	2.600	Huser ve Kvernold (1998)
Pulluk metalinin yoğunluğu (kg m^{-3})	7.865	Hudson Tool Steel (2016)
Toprağın kayma modülü (Pa)	5×10^7	Academia (2015)
Pulluk metalinin kayma modülü (Pa)	7.9×10^{10}	Hudson Tool Steel (2016)
Toprağın Poisson oranı	0.3	Asaf ve ark, (2007)
Pulluk metalinin Poisson oranı	0.3	Budynas ve Nisbett (2012)
Toprağın kayma gerilmesi (Pa)	1×10^5	Doğrudan makaslama
Toprağın toprak üzerindeki geri getirme	0.3	Kalibre edilmiştir
Toprağın toprak üzerindeki sürtünme	0.6	Saunders (2002)
Toprağın metal üzerindeki sürtünme	0.45	Saunders (2002)
Toprağın toprak üzerindeki yuvarlanma	0.3	Kalibre edilmiştir
Toprağın metal üzerindeki yuvarlanma	0.05	Ucgu ve ark, (2014)
Kohezyon enerji yoğunluğu (Jm^{-3})	10,540	Saunders (2002)
Partikül boyut dağılımı	0.75-1.5	Seçilmiştir

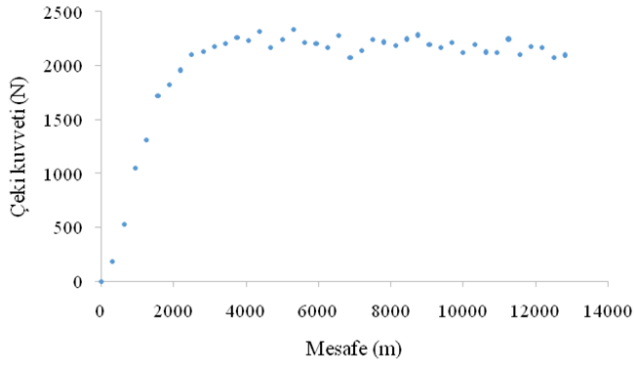


Şekil 4. Modellenen toprağın istenen yığın yoğunluğuna kadar preslenmesi, (a) preslenmeden önce (b) preslemeden sonra

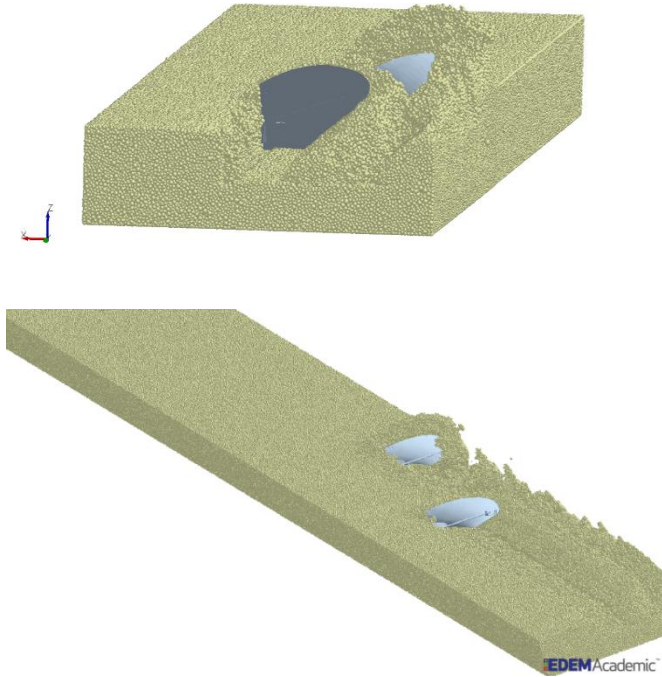


Şekil 5. (a) Modellenen pulluğun simülasyona transferi (b) karık açmak için kullanılan ikinci pulluk

Simülasyonda 20 m gibi uzun bir toprak parçasının kullanım nedeni stabil bir kuvvet bölgesi elde etmek amacı içindir (Şekil 6). Her bir simülasyon yaklaşık 57 saatte tamamlanmıştır. Simülasyondan elde edilen bazı ekran görüntüleri Şekil 7’de sunulmuştur.



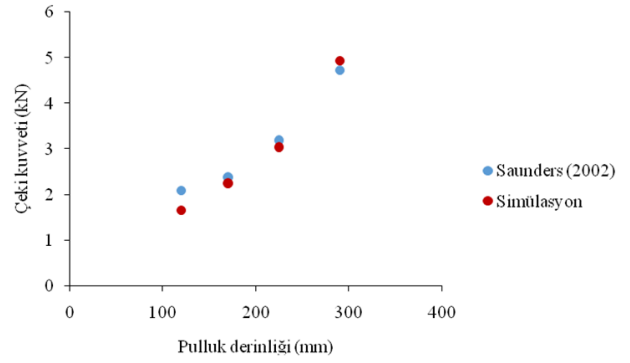
Şekil 6. Çeki kuvveti-mesafe grafiği



Şekil 7. Simülasyondan alınan ekran görüntüleri

BULGULAR ve TARTIŞMA

Simülasyonlar sonucu hesaplanan ve Saunders (2002) tarafından ölçülen çekme kuvvetleri Şekil 8’de sunulmuştur. Simülasyon sonucu elde edilen değerlere ait bağıl hatalar da Çizelge 2’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Simülasyon ve test sonuçları

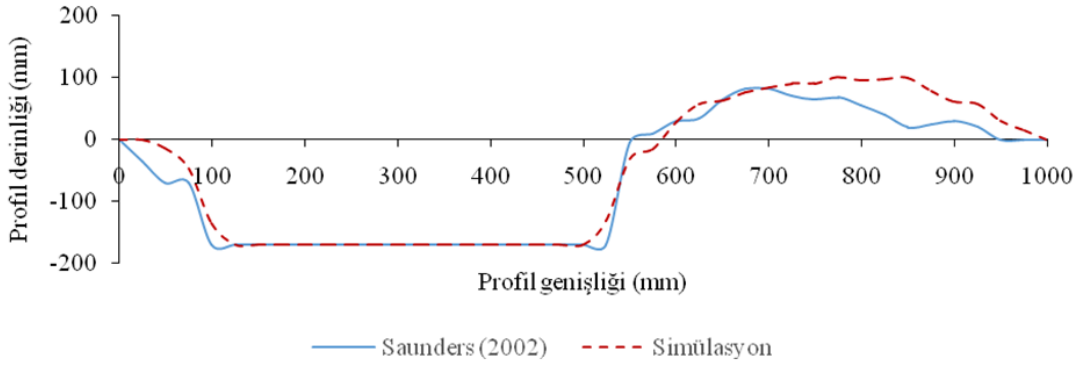
Çizelge 2. Simülasyon sonuçlarının bağıl hata değerleri

Derinlik (mm)	Bağıl hata (%)
120	%20.5
170	%5.4
225	%4.7
290	%4.2

Şekil 8 ve Çizelge 2’den görüldüğü gibi Saunders (2002) tarafından yapılan testlerde ölçülen çeki kuvvetleri, ayrık elemanlar metodu kullanılarak başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki en yüksek hata %20.5 dir. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi ayrık elemanlar metodu kullanılarak toprak profilini de modellemek mümkündür. Bunu göstermek için Saunders (2002) tarafından profil ölçme çubuğu kullanılarak 170 mm toprak derinliği için ölçülen toprak profili (Şekil 9) yine aynı derinlik için yapılan simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Şekil 10 da görüldüğü üzere, ölçülen ve simüle edilmiş ortalama toprak profilleri birbirine yakındır. Matematiksel olarak bir karşılaştırma yapmak için iki profil altındaki alanlar hesaplanmıştır. Saunders (2002) tarafından ölçülen alan 9830 mm³, ayrık elemanlar metodu ile simüle edilen alan ise 105310 mm³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Saunders (2002) tarafından ölçülen ortalama toprak profili



Şekil 10. Ölçülen ve simülasyonu yapılan ortalama toprak profillerinin karşılaştırılması

Hesaplanan iki alan arasındaki bağıl hata % 9.3'tür. Ölçülen ve simüle edilen kuvvet ve ortalama profiller arasındaki farkların normal toprak boyutlarından daha büyük partikül kullanımı nedeniyle olduğu yada deneysel ölçümlerden kaynaklanan hatalar olduğu sanılmaktadır. Daha önce kulaklı pulluğun ayırık elemanlar metodu ile modellenmesi konusunda çeki kuvveti ve toprak profili ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Dolayısı ile bu çalışmada bulunan bağıl hata değerlerinin benzer çalışmalarla karşılaştırılması mümkün değildir. Ancak daha önce Chen ve ark., (2013) tarafından kültivatör kullanılarak yapılan ayırık elemanlar metodu simülasyonlarında %1 ile % 26 arasında bağıl hata değerleri bulunmuştur. Asaf ve ark., (2007) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise hata miktarı %15 civarında bulunmuştur. Dolayısı ile bu çalışmada bulunan bağıl hata değerlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile popüler hale gelen ve tasarımcıya kuvvetlerin yanı sıra toprak hareketini de modelleme imkanı tanıyan ayırık elemanlar metodu tanıtılmış ve daha önceden Saunders (2002) tarafından yapılmış deneysel bir çalışma bu metod kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışmanın sonuçları ayırık elemanlar metodunun parametreleri iyi kalibre edildiğinde etkin bir araç olarak tarım makinelerinin tasarımında kullanılabilceğini göstermiştir. Simülasyonlar sonucu bulunan maksimum hata çeki kuvveti için %20.5, ortalama toprak profili için ise % 9.3'tür. İleriki çalışmalar için farklı hızlar ve uç demiri genişlikleri kullanılarak çalışmanın detaylandırılması planlanmaktadır. Ayrıca daha küçük partikül boyutu kullanılarak daha hassas sonuçlar elde edilebileceği beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Academia, 2015. Some useful numbers for rocks and soils. http://www.academia.edu/4056287/SomeUseful_Numbers_for_rocks_and_soils (Erişim tarihi: 15.04.2016)
- Asaf, Z., Rubinstein, D., Shmulevich, I. 2007. Determination of Discrete Element Model Parameters Required for Soil tillage. *Soil and Tillage Research*. 92(1-2): 227-242.
- Bravo, E.L., Tijskens, E., Suárez, M.H., Cueto, O.G., Ramon, H., 2014. Prediction Model for Non-Inversion Soil Tillage Implemented on Discrete Element Method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106, 120-127.
- Budynas, R.G., Nisbett, K.J., 2012. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Education
- Chen, Y., Munkholm, L.J., Nyord, T., 2013. A Discrete Element Model for Soil-Sweep Interaction in Three Different Soils. *Soil and Tillage Research*, 126: 34-41
- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1971. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29: 47-65.
- EDEM, 2011. *EDEM Theory Reference Guide*. Edinburgh, UK, DEM Solutions.
- Fielke, J.M., 1999. Finite Element Modelling of the Interaction of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(1): 91-101.
- Godwin, R.J., O'Dogherty, M.J., Saunders, C., Balafoutis, A.T., 2007. A Force Prediction Model for Mouldboard Ploughs Incorporating the Effects of Soil Characteristic Properties, Plough Geometric Factors and Ploughing Speed. *Biosystems Engineering*. 97(1): 117-129.
- Hudson Tool Steel (2016). P20 Mold steel. <http://www.hudsonsteel.com/technical-data/steelP0> (Erişim tarihi: 20.02.2017)
- Huser, A., Kvernfold, O., 1998. Prediction of Sand Erosion in Process and Pipe Components. In BHR Group Conference Series Publication (Vol. 31, pp. 217-228). Mechanical Engineering Publications Limited.

- Karmakar, S., Kushawa, R.L., 2005. Simulation of Soil Deformation around a Tillage Tool Using Computational Fluid Dynamics. *Transactions of ASAE*, 48(3): 23-32.
- Karmakar, S., Ashrafizadeh, S.R., Kushwaha, R.L., 2009. Experimental Validation of Computational Fluid Dynamics Modeling for Narrow Tillage Tool Draft. *Journal of Terramechanics*, 46(6): 277-283.
- Kushwaha, R.L., Shen, J., 1995. Finite Element Analysis of the Dynamic Interaction between Soil and Tillage Tool. *Transactions of the ASAE*, 37(5): 1315-1319.
- McKyes, E., 1985. *Soil Cutting and Tillage*. Amsterdam, The Netherlands.
- Raji, A.O., 1999. Discrete Element Modelling of the Deformation of Bulk Agricultural Particles. PhD, University of Newcastle upon Tyne.
- Saunders, C., 2002. Optimising the Performance of Shallow, High-Speed Mouldboard Ploughs. PhD, Cranfield University
- Shmulevich, I., Asaf, Z., Rubinstein, D., 2007. Interaction between Soil and a Wide Cutting Blade Using the Discrete Element Method. *Soil and Tillage Research*, 97(1): 37-50.
- Tanaka, H., Momozo, M., Oida, A., Yamazaki, M., 2000. Simulation of Soil Deformation and Resistance at Bar Penetration by Distinct Element Method. *Journal of Terramechanics*, 37:41-56.
- Ucugul, M., Fielke, J.M., Saunders, C., 2014. 3D DEM Tillage Simulation: Validation for a Sweep Tool for a Cohesionless Soil. *Soil and Tillage Research*. 144: 220-227
- Ucugul, M., Fielke, J.M., Saunders, C., 2015. Three-Dimensional Discrete Element Modelling (DEM) of Tillage: Accounting for Soil Cohesion and Adhesion. *Biosystems Engineering*. 129: 298-306.
- Walton, O.R., Braun, R.L., 1986. Stress Calculations for Assemblies of Inelastic Spheres in Uniform shear. *Acta Mechanica* 63: 73-86.
- Walton, O., 2006. Elastic-Plastic Contact Model. Company Report, DEM Solutions.