

Ayrık Elemanlar Metodu ve Tarım Makinelerindeki Bazı UygulamalarıMehmet BAHADIR^{1*}, Mehmet ACAR², Mustafa YILDIRIM², Fatma Ömür VURAL²
İrfan Baturalp DOĞAN², Osman ÖZBEK³¹Selçuk Üniversitesi, Çumra Meslek Yüksekokulu Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Konya²Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı,
Konya³Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Konya*Sorumlu yazar (Corresponding author): mehmetbahadir@selcuk.edu.tr**Geliş Tarihi (Received):** 20.05.2023**Kabul Tarihi (Accepted):** 20.06.2023**Özet**

Ayrık elemanlar yöntemi (DEM), parçacık sistemlerinin dinamik davranışlarını her bir parçacığı mikro seviyede ve yığın (dökme) malzemelerinde makro seviyelerde simüle edebilen önemli bir sayısal yöntemdir. Bu çalışma, tarımsal üretim aşamaları olan toprak işleme, ekim, gübreleme ve hasat işlemlerinde ayrık elemanlar yöntemi (DEM) uygulamalarının incelenmesini kapsamaktadır. Çalışmanın ana hatları, ayrık eleman yöntemi hakkında temel teorik bilgileri, sonrasında kalibrasyon temas modelleri ve model parametrelerinin incelenmesini ve en son olarak tarımsal üretim aşamalarında DEM uygulamaları ile ilgili yapılan akademik çalışmaları kapsamaktadır. Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında ayrık eleman metodunun (DEM) tarımsal faaliyetlerde toprak ve bitki dinamiklerini simüle etme konusunda oldukça başarılı ve etkili bir yöntem olduğu sonucu olup bundan sonraki çalışmalarda sıklıkla kullanılacağı yönündedir.

Anahtar Kelimeler: Ayrık eleman yöntemi (DEM), tarım makineleri, toprak işleme, ekim, gübreleme, hasat**Discrete Element Method and Some Applications in Agricultural Machinery****Abstract**

The discrete element method (DEM) is an important numerical method that can simulate the dynamic behavior of particle systems at the micro level and bulk (bulk) materials at the macro level. This study covers the investigation of discrete element method (DEM) applications of tillage, sowing, fertilization, and harvesting which is from the stages of agricultural production. The outline of the study includes basic theoretical information about the discrete element method, then calibration contact models and examination of model parameters, and finally academic studies on DEM applications in agricultural production stages. In the light of the data obtained from the studies, it is concluded that the discrete element method (DEM) is a very successful and effective method for simulating soil and plant dynamics in agricultural activities and will be used frequently in future studies.

Keywords: Discrete element method (DEM), agricultural machinery, tillage, seeding, fertilizing, harvest

1. Giriş

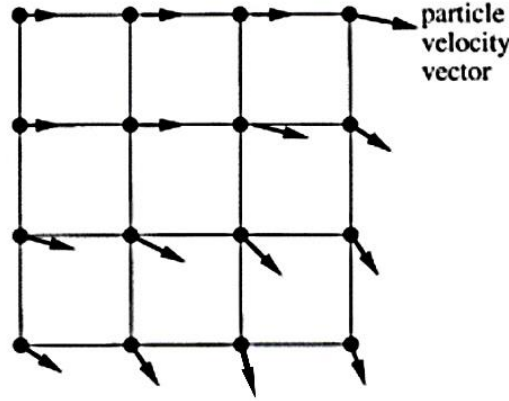
Sayısal analizler, bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak mühendislik alanlarının neredeyse tamamında sıkça kullanılmaktadır. Sayısal analiz programları sayesinde mühendislik problemleri daha kesin bir şekilde çözülebilmekte ve karmaşık projeler daha güvenle ele alınabilmektedir. Mühendislik problemleri fiziksel durumların matematiksel modelleridir. Matematiksel modeller ise başlangıç ve sınır koşullarını belirten diferansiyel denklemlerdir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal analiz metotlarına; Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Sonlu Farklar Metodu (FDM), Sınır Elemanları Metodu (BEM) ve

Ayrık Elemanlar Metodu (DEM) örnek olarak verilebilir. Sayısal analiz metotları ile çözüm yapabilmek için iki ana modelleme yaklaşımı vardır. Bunlar;

- Süreklilik Yaklaşımı
- Ayrık Yaklaşımı

1.1. Süreklilik (Eulerian) yaklaşımı

Sürekli bir sistemi, problemin karakterine uygun sonlu elemanlara bölerek, elde edilen elemanlar üzerine iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimizasyonu ve daha sonrasında da bu elemanların birleştirilmesi ile tüm sistemin çözümünü bulmak şeklinde tanımlanabilir (Örneğin, Sonlu elemanlar yöntemi-FEM). (Şekil 1)

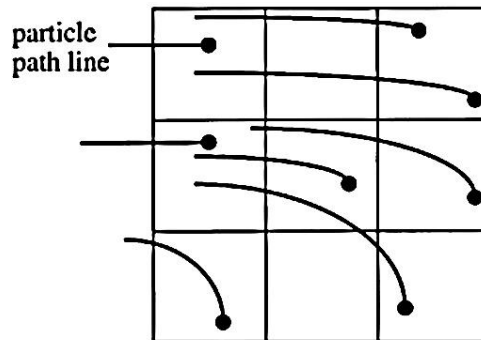


Şekil 1. Eulerian yaklaşımı (Loth, 2000)

1.2. Ayrık (Lagrangian) yaklaşımı

Ayrık yaklaşımlar her bir parçacığı ayrı bir varlık olarak modeller (Şekil 2) ve tanecikli malzemeyi ideal parçacıklar topluluğu olarak temsil eder. Genel (makroskopik) sistem davranışı, bireysel parçacıkların birbirleriyle olan

etkileşimlerinden kaynaklanır. Bu yaklaşım, parçacık çapının uzunluk ölçeğinde meydana gelen olayları araştırmak ve parçacıkların kütle davranışını simüle etmek için çok iyi bir yaklaşımdır (Örneğin, Ayrık elemanlar yöntemi-DEM).

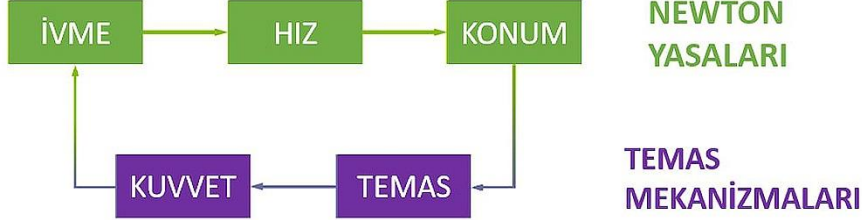


Şekil 2. Lagrangian yaklaşımı (Loth, 2000)

1.3. Ayrık eleman yöntemi

Ayrık elemanlar yöntemi, farklı geometrik şekilli (taş, mermer, ahşap vb.) kütleler veya dairesel şekilli taneciklerin modellenmesi, bu taneciklerin temas algılama algoritmaları ve uygun temas

modelleri seçilerek, ivmelere, hızlara ve pozisyonlara göre Newton'un hareket yasaları dikkate alınarak kütle, atalet ve momentum ilişkileri ile taneciklerin fiziksel hareketlerinin çözümlenmesini sağlayan sayısal bir yöntemidir (Şekil 3).



Şekil 3. Ayrık eleman yöntemi algoritması

Ayrık eleman yönteminin teorisi, 1956'da Alder ve Wainwright tarafından moleküller üzerinde dinamik çalışmalar yapılarak başlamış, prensipleri ise 1970'lerde Cundall ve Strack tarafından geliştirilmiştir. İlk olarak Cundall (1971) kaya mekaniği ile ilgili problemlerin çözümlenmesi için ileri sürmüş ve daha sonra Cundall ve Strack (1979) tarafından zemin mekaniğinde eklemlili kayaların iki boyutlu modellenmesi için kullanılmıştır. Bunu takiben farklı disiplinlerde taneciklerden oluşan makro ve mikro boyutlu malzemelerin modellenmesi için Ayrık elemanlar yöntemi uygulanmaya başlamıştır. Ayrık elemanlar yönteminin temeli, her parçacığın rijit bir gövde olarak modellenmesi ve daha sonra her parçanın konumunun ve hızının küçük bir zaman aşaması boyunca hesaplanması için Newton'un ikinci yasasının kullanılması olayıdır. Ayrık elemanlarda iki ana yaklaşım

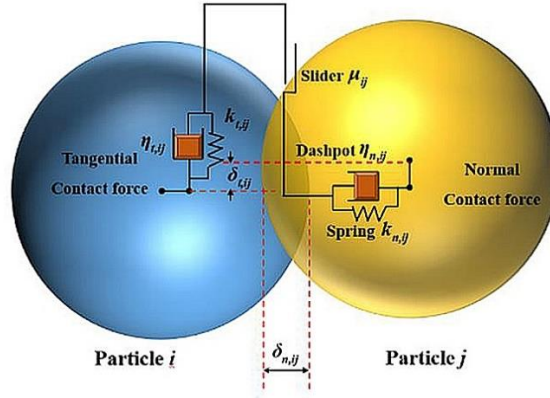
kabul görmekte olup, bunlar sert küre ve yumuşak küre yaklaşımıdır.

- **Sert küre yaklaşımı**

Etkileşim kuvvetlerinin itici olduğu varsayılır ve parçacıklar yalnızca çarpışmalar yoluyla momentum değiştirir. Parçacıklar arasındaki kuvvetler açıkça dikkate alınmaz.

- **Yumuşak küre yaklaşımı**

Partiküllerin ayrıca rijit olduğu varsayıldığı ama küçük örtüşmelerin temas sırasında deformasyonları temsil etmesine izin verildiği yumuşak küre yaklaşımı. Her iki yaklaşımda da parçacıklar çarpıştığında hafifçe üst üste binerler(örtüşme- δ) ve bu üst üste binme, her parçacığı bir yay olarak ele alarak çarpışmadaki kuvvetlerin büyüklüklerini hesaplamak için kullanılır (Şekil 4). Bu gerçekte olmamasına rağmen, üst üste binme, her parçanın bir çarpışma sırasında göstereceği deformasyona benzer olarak kabul edilebilir.



Şekil 4. Yumuşak küre çarpışma modelinin şematik diyagramı ve teğetsel ve normal kuvvetlerin hesaplanması için yay - sönümleme - kayma modeli şematik gösterimi (Li ve ark.,2022)

Granüler bir akış içindeki her parçacık 6 serbestlik derecesine sahiptir ve sonuç olarak iki hareket türü olabilir: Dönme Hareketi ve Öteleme Hareketi.

• **Dönme hareketi:** Dönme hareketi aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır:

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

M= Parçacık üzerinde oluşan dönme momenti (Nm)

I= Atalet(Eylemsilik) momenti (Nm²)

ω = Açısal hız (rad/s)

t= Zaman (s)

• **Öteleme (ilerleme) hareketi:** Öteleme hareketi ise aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = F_g + F_c + F_{nc} \quad (2)$$

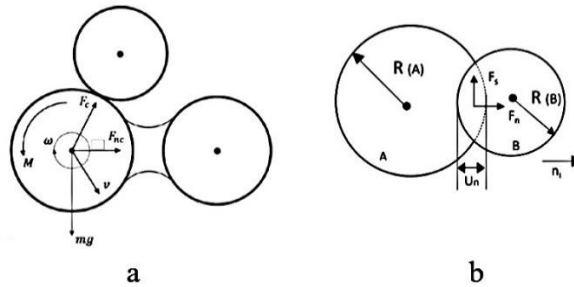
m= Parçacığın kütlesi (N)

\vec{v} = Parçacığın ilerleme hızı (m/s)

t= Zaman (s)

F_g = Parçacığı etkileyen yer çekimi kuvveti (N)

F_c, F_{nc} = Partikül ve etrafındaki partiküller arasında meydana gelen veya partikül ile duvar arasında oluşan temas ve temassız kuvvetler (N)



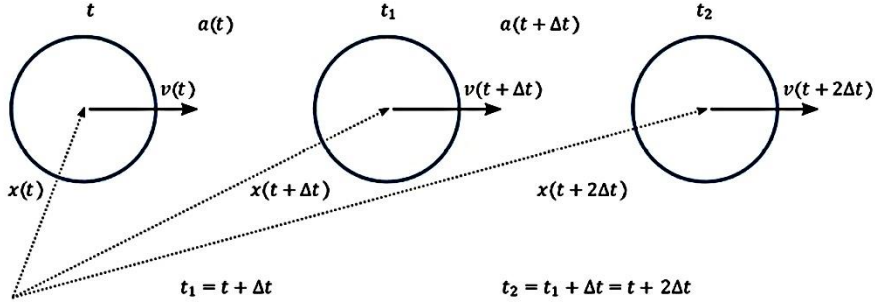
Şekil 5. Tanecikler arasındaki kuvvet-yer değiştirme etkileşimi (a: Hazzard ve ark., 2000 ; b: Potyondy ve Cundall, 2004).

Bu simülasyon yönteminin temelini Newton'un ikinci yasası olan ve çok miktardaki parçacıkların uygun bir zamanda kuvvet-yer değiştirme arasındaki ilişkinin hesaplanmasını sağlayan yasa oluşturur. Bir DEM simülasyonundaki temel eleman bir küredir ve bu nedenle tüm

parçacıklar tek küre olarak modellenir veya çoklu küre olarak bir araya toplanır. Her yinelemede, simülasyon alanındaki her parçacığın yeni hızı, konumu ve kuvveti güncellenir. Parçacıklar birbirleriyle statik veya hareketli geometrilerle temas eder. Bu temaslar, temel temas modelleriyle

hesaplanır. Şekil 5, iki parçacık arasındaki örnek bir temas modelini göstermektedir.

Bu model, bağlantı kuvvetlerini normal ve teğet yönlerde hesaplar.



Şekil 6. DEM'de ivme, hız ve konum açısından tek elemanlı hareket hesaplaması. (Anonim, 2011)

$$\sum \vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} \quad (3)$$

Bir parçacığın belirli bir t zamanında, yer değiştirme ve hız hesaplaması:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t$$

Burada;

$v(t)$: hız

$x(t)$: konum,

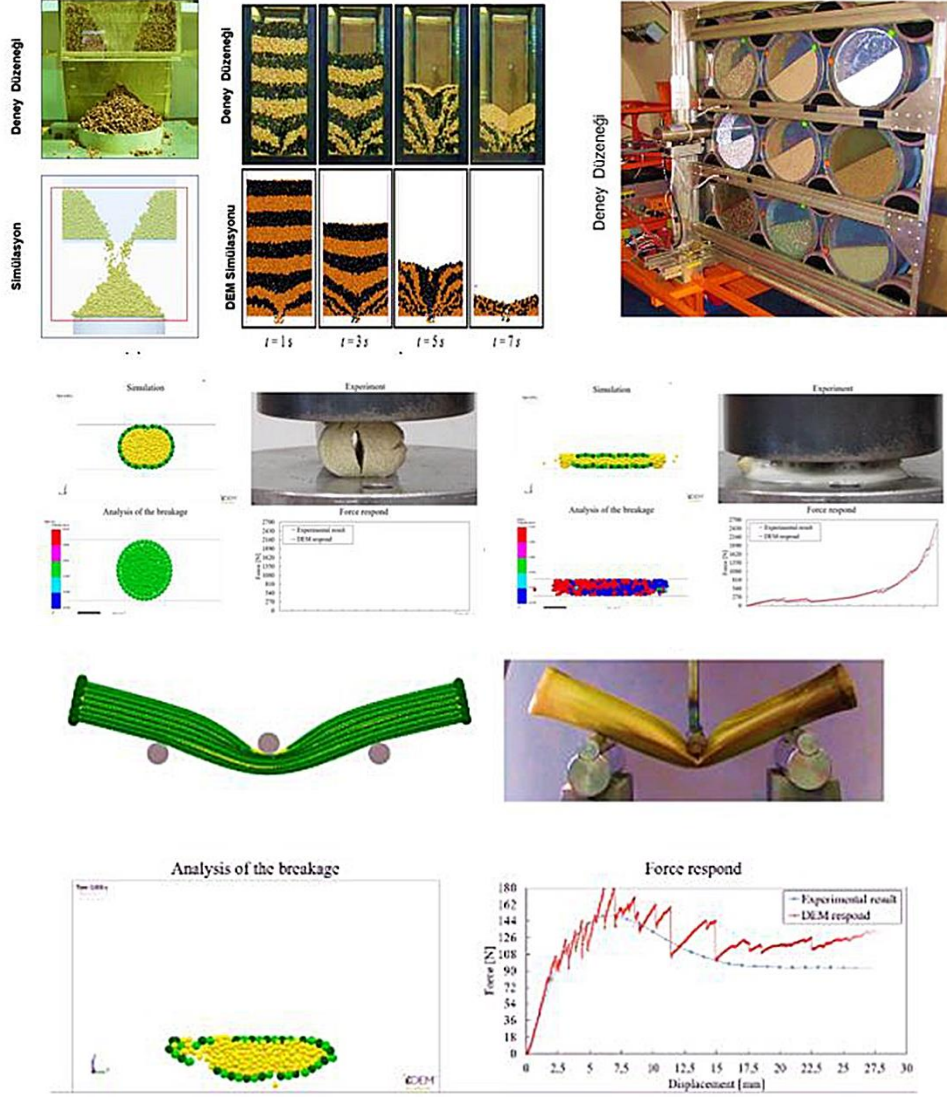
$a(t)$: ivme

Δt : Zaman adımı 'dır

2. Malzeme Kalibrasyonu

DEM simülasyon sonuçlarına dayanarak tasarım kararları verme konusunda, simülasyonda temsil edilen malzeme ile gerçek dünyadaki akış davranışı arasında bir bağlantı olması gerekir. Bu, malzeme kalibrasyonu ile elde edilir. Birçok endüstriyel uygulamadaki malzeme, çok sayıda parçacık, çeşitli

şekiller veya çok ince tanecikler içerebilir. DEM simülasyonlarında tekil malzeme parçacıklarının ayrıntılı yapısını tam olarak modellemek hesaplamalı olarak pahalıdır ya da neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, en yaygın yaklaşım, gerçek malzemenin kalibre edilmiş bir gösterimini oluşturmayı içerir. Gerçek malzeme örneklerine göre, kalibrasyon adımları için, malzeme örnekleri önce toplanır ve test için hazırlanır. Sabit huni, devirme kutusu(silindiri) döner /silindir tambur vb. gibi uygun test düzeneklerinden biri seçilir (Şekil 7). Bu düzeneklerden elde edilen doğal yığılma açısı, tek eksenli sıkıştırma gibi değerler ışığında bu testin basit bir benzer simülasyonu bir DEM yazılımında oluşturulur. Fiziksel test sırasında dökme malzemenin uygun özellikleri ölçülür. Materyal ve etkileşim özellikleri daha sonra deneysel toplu davranış eşleşene kadar simülasyon yazılımında çeşitlendirilir.



Şekil 7. Kalibrasyon örnekleri

3. Temas Modelleri

3.1. Normal kuvvet davranış modelleri

- Hysteretic Linear Spring Model: Birbirine doğru hareket eden iki parça birbirine temas ettiği anda bu parçalar zıt yönde hareketlerine devam etmektedirler.
- Linear Spring-dashpot Model: Bu model de kuvvet, doğrusal elastik itme kuvvetlerinden oluşmaktadır.
- Hertzian Spring-dashpot Model: Bu model de hem elastik hem de sönümleyici bileşenlerin normal kuvvetteki değeri gözlemlenebilmektedir.

3.2. Teğetsel kuvvet davranış modelleri

- Linear Spring Coulomb Limit Model: Bir zaman çerçevesinde teğetsel kuvvetlerin

elastik olarak değerlendirilmesine izin vermektedir.

- Coulomb Limit Model: Basitleştirilmiş tanjant kuvvet modelidir. Tanjant kuvvetlerinin hıza bağlı olarak ifade edilmesi ile hesaplanmaktadır.
- Mindlin–Deresiewicz Model: Tanjant kuvvetleri hesaplayıcılarının geliştirilmiş bir modeli olarak ifade edilmektedir.

3.3. Yapışkan kuvvet davranış modelleri

- Constant Adhesive Force Model: Sabit bir değer kabullenerek bu değer üzerinden parçaların birbirlerine çekme kuvveti uygulaması olarak yapılan bir modelleme şeklidir.
- Linear Adhesive Force Model: Sabit yapışma kuvvet modelinde yapışma oranı

sabitken bu modelde ise doğrusal olarak artmaktadır.

- Leeds Adhesive Force Model: Sadeleştirilmiş elasto-plastik yapışkan davranışı modelidir.
- JKR Adhesive Force Model: İki parçacık arasındaki temas alanı(yağ film gibi) hertz teorisine göre biraz daha büyüktür. Bu durum yüzey enerjisinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

3.4. Yuvarlanma direnci modelleri

Parçacıkların yuvarlanma dirençlerini temsil eden bir modelleme tipidir. Partikülün şekli ve kütle merkezi yuvarlanma direncini efektif olarak etkiler.

- Yuvarlanma Direnci Tip 1: Basit tip partiküller (küre gibi) için tercih edilirler
- Yuvarlanma Direnci Tip 3: Karmaşık partiküller(taş, kaya gibi) için tercih edilir.

3.5. Aşınma model

Archard'ın aşınma yasası, aşınma oranının kayma hızıyla ve normal temas kuvvetiyle orantılı olduğunu göstermektedir. Yani bir malzemenin aşınması, üzerine çarpan partiküllerin boyutuna, hızına, sürtünme katsayılarına ve çarpışma enerjisine göre belirlenmektedir.

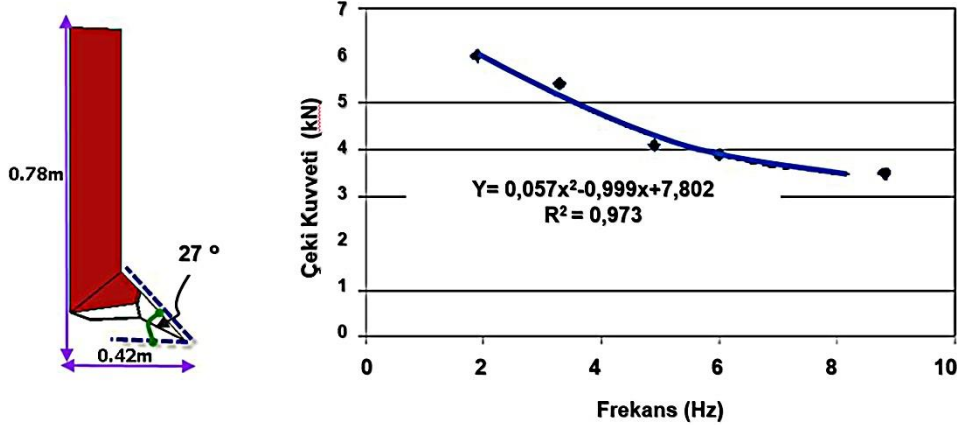
3.6. Kırılma modelleri

DEM teorisinde partiküller elastikiyet veya sürtünme göstermeden gevrek biçimde kırılırlar. Bir partikül, üzerine yüklenen enerji ve yüzey stresi etkisi altında kırılmaktadır.

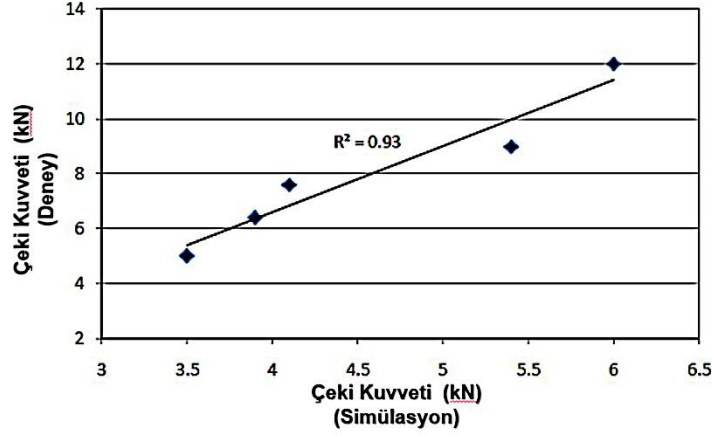
4. Ayrık Elemanlar Yönteminin (DEM) Tarım Makinalarında Bazı Uygulamaları

4.1. Toprak işlemede DEM uygulamaları

Shahgoli ve Shahi (2011), "Modeling of Soil and Oscillatory Tine Interaction Using Discrete Element Method" isimli araştırmalarında ayrık elemanlar yöntemini kullanarak titreşimli bir dipkazan modeli geliştirmişler ve dipkazanın titreşim frekansının ve salınım açısının etkisini belirlemişlerdir. Simülasyon çalışması, 38 cm derinlikte ve 0,89 m/s hızda +27° ile -22,5°'lik salınım açılarındaki ±69 mm genlik de 1.94, 3.3, 4.9, 6 ve 8.8 Hz'lik frekanslar da yapmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre frekans arttıkça çeki kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir (Şekil 8). Bununla beraber deney sonuçlarından elde edilen çeki kuvveti ile simülasyon sonuçlarından elde edilen çeki kuvveti arasındaki korelasyon katsayısını $R^2 = 0.93$ hesaplamışlardır (Şekil 9).



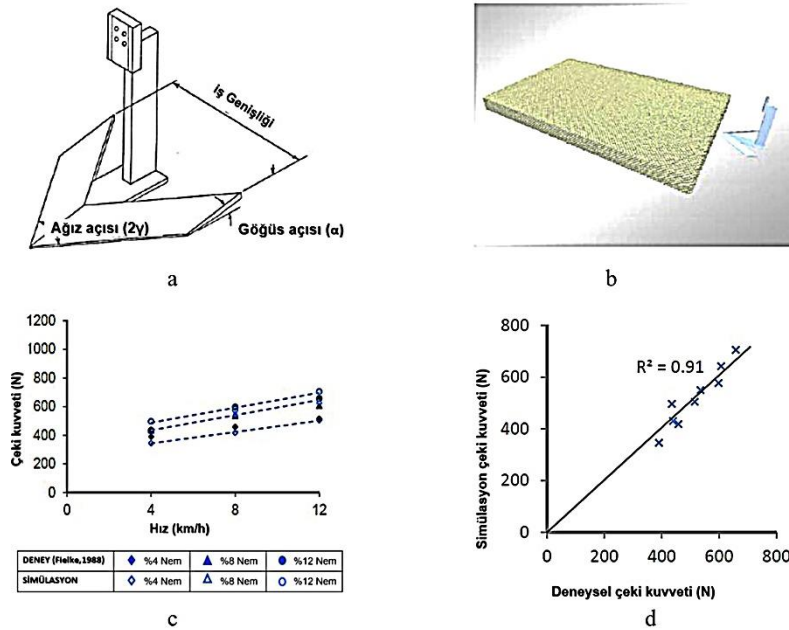
Şekil 8. Titreşimli bir dipkazanın titreşim frekanslı ile ve çeki kuvveti ilişkisi (Shahgoli ve Shahi 2011),



Şekil 9. Titreşimli bir dipkazanın çeki kuvveti deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasındaki korelasyon ilişkisi (Shahgoli ve Shahi 2011),

Fielke ve ark. (2013), “Discrete Element Modeling of Soil-Implement Interaction Considering Soil Plasticity, Cohesion and Adhesion” isimli çalışmalarında toprağın kohezyon, adezyon ve plasitesini dikkate alan bir DEM modeli sunmuşlardır. Gerekli DEM parametrelerini belirlemek için yapışmayan elastik ve plastik temaslı toprak modellemesi yapmışlar, sonrada yapışma özelliği gösteren elastik ve plastik toprağı modelleyerek 1988 yılında Fielke'nin 75 mm derinlikte ve farklı hızlarda (4, 8 ve 12

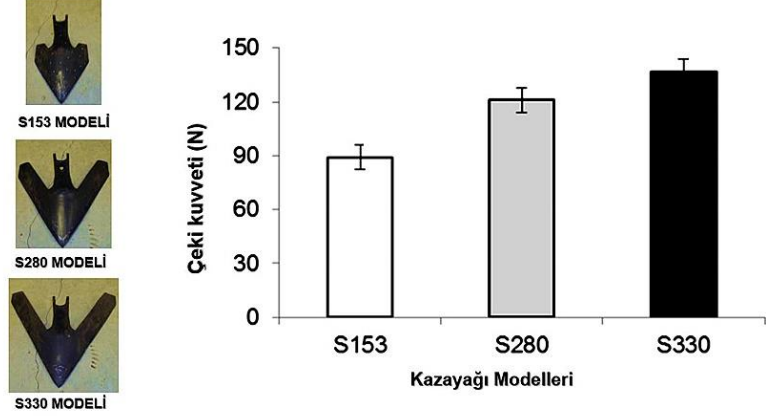
km h⁻¹), 400 mm genişliğindeki bir kazayağına ait kesme açısının ve kazayağı genişliğinin çeki kuvveti üzerindeki etkilerinin tespitine yönelik yaptığı deneyi belirledikleri şartlar altında simüle etmişlerdir. Simülasyon sonucunda farklı hızlarda elde edilen çeki kuvveti değerlerinin ilerleme hızına bağlı olarak arttığını, 1988 yılında yapılan deney ile elde edilen değerlere yakın korelasyon değerlerinin ($R^2 = 0.91$) elde edildiğinin bulmuşlardır. (Şekil 10)



Şekil 10. Deneysel çalışması ile simülasyon arasındaki çeki kuvveti - hız ilişkisi (Fielke ve ark. 2013)

Gürsoy S. ve ark. (2017), “Measurement and modeling of soil displacement from sweeps with different cutting widths” isimli çalışmalarında 50 mm iş derinliğinde ve 1.53 m s^{-1} ilerleme hızında, farklı iş genişliklerine sahip kazayaklarının (153, 280 ve 330 mm) çeki

kuvvetleri ve toprağın yer değiştirmesi üzerine etkisini tespit etmişlerdir (Şekil 11 – 12). Elde ettikleri sonuçlara göre bütün modellerde yer değiştirmelerin kazayağı merkezinde daha fazla olduğunu, S153 modelinde daha az yatay yer değiştirmeler olduğunu belirlemişlerdir.

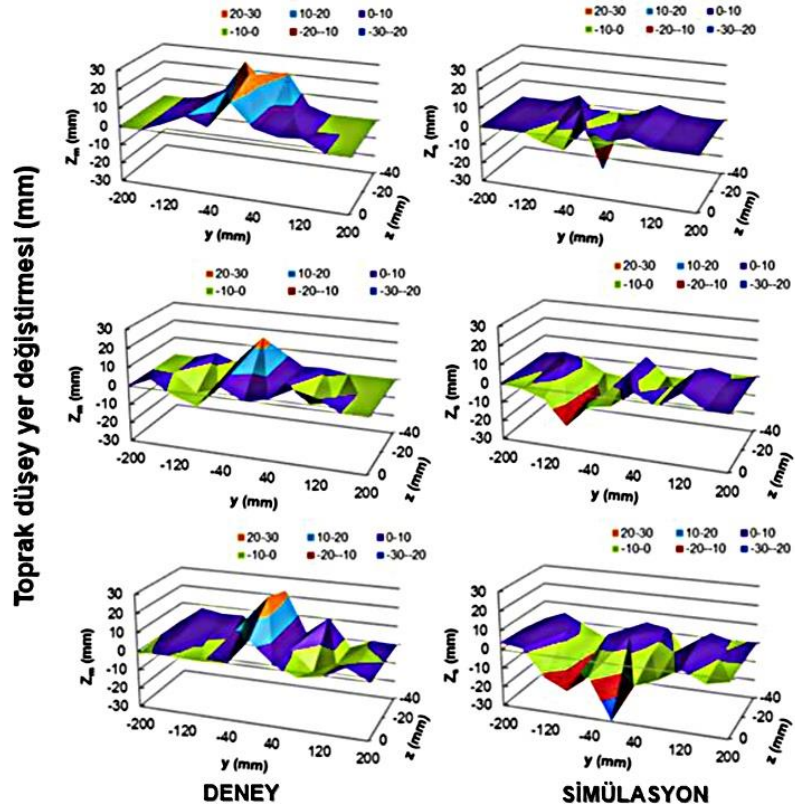


Şekil 11. Farklı geometrilere sahip kazayaklarının çeki kuvveti sonuçları (Gürsoy ve ark. 2017)

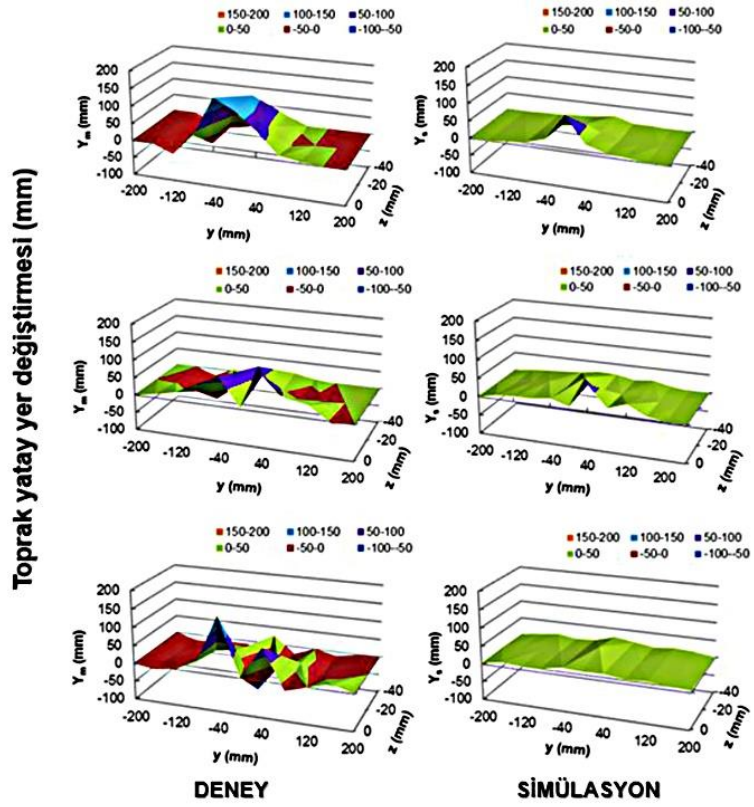
**S153
MODELİ**

**S280
MODELİ**

**S330
MODELİ**



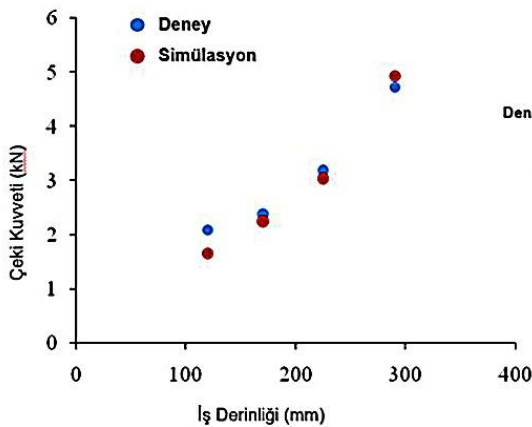
Şekil 12. Farklı geometrilere sahip kazayaklarında deney ve simülasyon araştırmalarına göre toprağın yatay yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması (Gürsoy ve ark. 2017)

**S153
MODELİ****S280
MODELİ****S330
MODELİ**

Şekil 13. Farklı geometrilere sahip kazayaklarında deney ve simülasyon araştırmalarına göre toprağın düşey yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması (Gürsoy ve ark. 2017)

Üçgül ve ark. (2018), “Ayrık Elemanlar Metodunun Tarım Makineleri Tasarımında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma” isimli çalışmalarında ayırık eleman yöntemi kullanarak kulaklı pulluk ile toprak arasındaki etkileşim sonrası ortaya çıkan çeki kuvvetinin tespiti ve toprak profili modellemesi yapmışlardır (Şekil 14). Sonrasında Saunders (2002) ’in yaptığı deneysel araştırma simülasyon

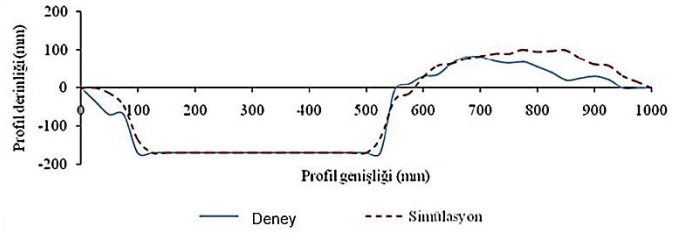
sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Şekil 15). Simülasyon sonucunda çeki kuvvetinde maksimum %20.5 ve ortalama toprak yüzey profilinde (yüzey düzgünlüğü) ise % 9.3 bağıl hata tespit etmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre parametreler iyi kalibre edildiğinde, DEM programlarının pulluk tasarımında kullanılabileceğini vurgulamışlardır.



DENEY sonuçlarına göre simülasyon sonuçlarının bağıl hata değerleri

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

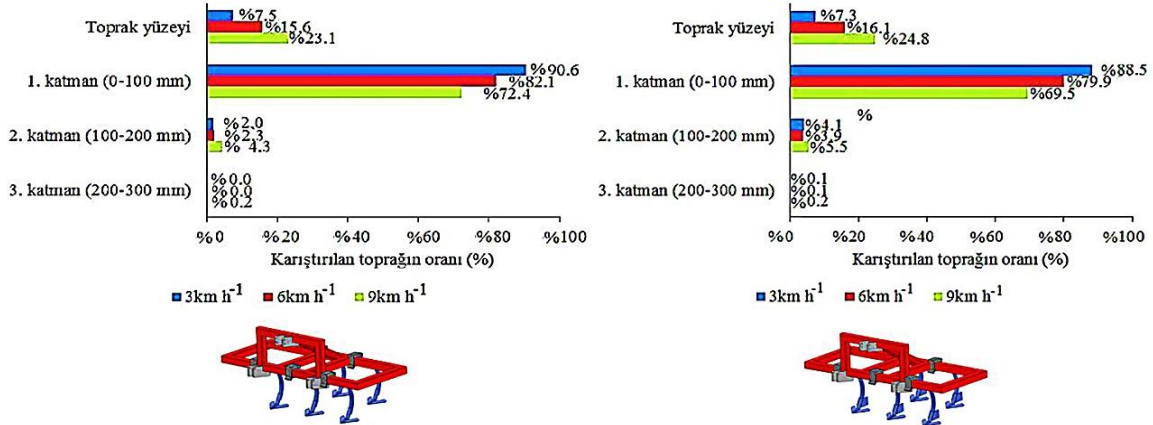
Şekil 14. Deney ve simülasyon sonucu elde edilen kulaklı pulluğun çeki kuvveti ve iş derinliği ilişkisi (Üçgül ve ark. 2018)



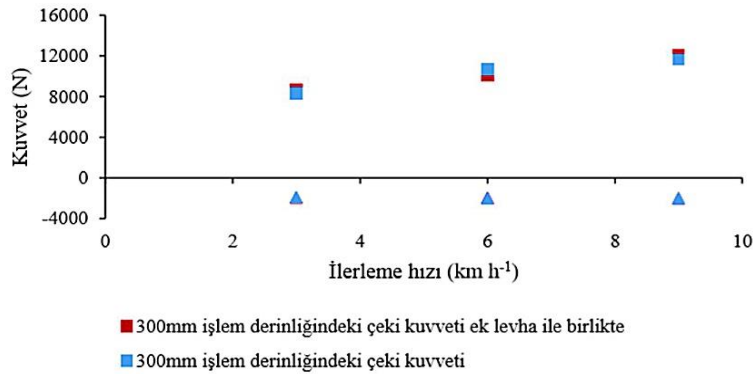
Şekil 15. Kulaklı pulluğun deneysel ve simülasyon sonucu elde edilen toprak yüzeyi pürüzlülük ölçümü ve karşılaştırması (Üçgül ve ark. 2018)

Üçgül (2018), “Kültivatörün Toprak Yüzeyindeki Maddeleri Toprağa Karıştırma Yeteneğinin Bilgisayar Simülasyonu Kullanılarak Geliştirilmesine Yönelik Bir Çalışma” isimli makalesinde kültivatör ayakları üzerine eklenen kanatçıkların ve kanatçık eklenmemiş halinin toprak üzerine serpilen organik maddeleri karıştırma oranını (Şekil 16) ve çeki kuvvetine (Şekil 17) etkisini sadece ayırık elemanlar metodu

kullanarak incelemiştir. Çalışmayı 200 ile 300 mm derinlik ve 3, 6 ile 9 km h⁻¹ ilerleme hızlarında kanatçık olmayan ve kanatçık takılan iki tip kültivatörle simüle etmiştir. Araştırma sonuçlarına göre eklenen kanatçıklarla toprağın alt katmanlarında organik madde miktarının arttığını ve bu durumda çeki kuvveti değerinin de arttığını bulmuştur.



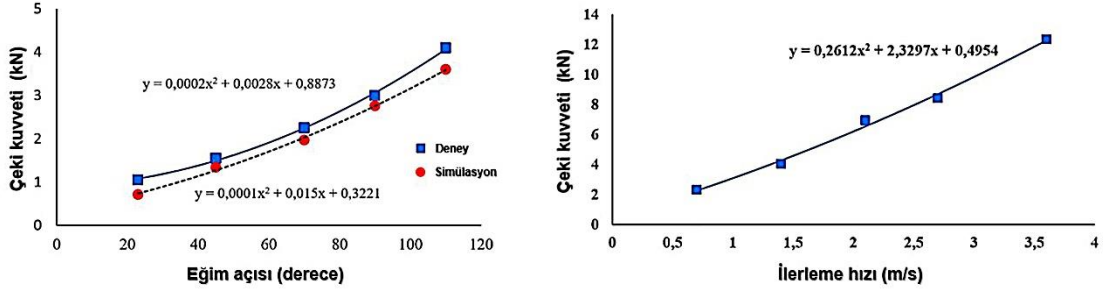
Şekil 16. Kanatçık olmayan ve kanatçık takılan kültivatörlerle yüzeyde bulunan organik maddelerin toprağa karışma oranları (%) (Üçgül, 2018)



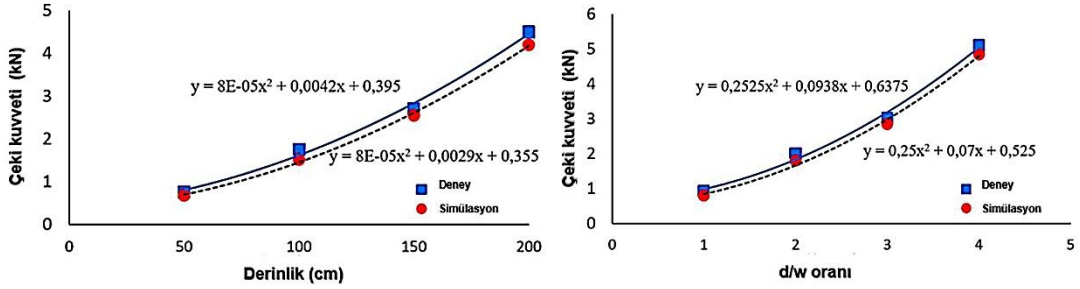
Şekil 17. Kanatçık olmayan ve kanatçık takılan kültivatörlerin 300 mm iş derinliğinde çeki kuvveti-ilerleme hızı ilişkileri (Üçgül, 2018)

Shahgoli (2019), “Modeling the Effects of Narrow Blade Geometry on Soil Failure Draught and Vertical Forces Using Discrete Element Method” isimli araştırmasında DEM kullanarak toprak-dipkazan etkileşimini modellemiş ve farklı bıçak eğim açıları, bıçak genişliği, ilerleme hızı, iş derinliği ve Slenderness (derinlik/bıçak genişliği) oranının çeki üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmada 50, 100, 150 ve 200 mm'lik dört farklı iş derinliğinde tarla denemeleri yapmıştır. Derinlik/bıçak genişlik (d/w) oranının toprak işleme kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırmak için, 1, 2, 3 ve 4 derinlik/genişlik oranlarına sahip 90°

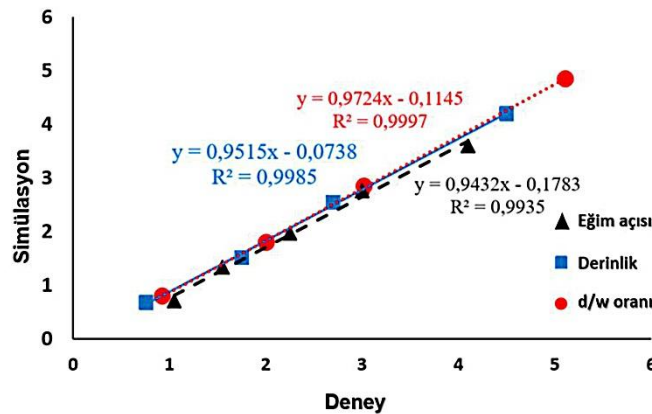
eğim açılı ve 50 mm iş derinliğinde bir bıçak modellemiştir. Eğim açısının toprak işleme kuvveti üzerindeki etkisini değerlendirmek için 150 mm'lik iş derinliğinde 22.5, 45, 67.5, 90 ve 112.5°'lik beş farklı eğim açısını incelemiştir. Araştırmanın sonucu olarak eğim açısı arttıkça, çeki kuvveti ihtiyacının arttığını bulmuştur (Şekil 18). Ayrıca, artan d/w oranının çeki kuvvetini arttırdığını da tespit etmiştir (Şekil 19). Bu çalışma da çeki kuvveti ve d/w oranları kriter alındığında deney sonuçları ile DEM simülasyonu arasında ki korelasyon katsayısını $R^2 = 0.99$ olarak hesaplamıştır (Şekil 20).



Şekil 18. Dipkazan ile toprak arasındaki eğim açısı ve ilerleme hızının çeki kuvveti ile ilişkileri (Shahgoli, 2019)



Şekil 19. Dipkazan ile toprak arasındaki derinlik ve d/w oranının çeki kuvveti ile ilişkileri (Shahgoli, 2019)

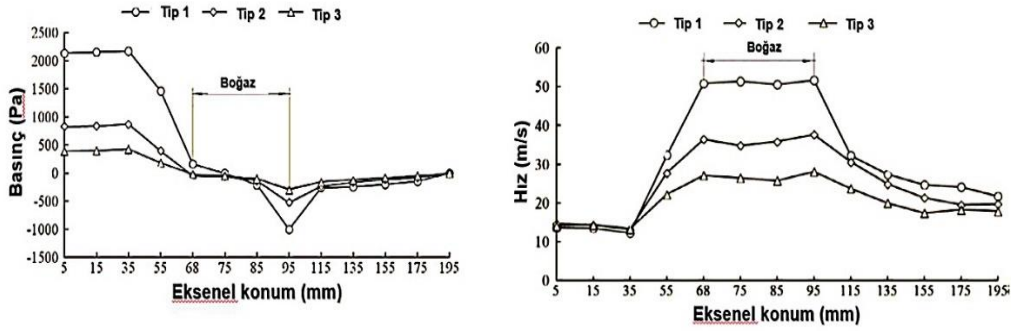


Şekil 20. Dipkazan ile toprak arasındaki eğim açısı, derinlik ve d/w oranının simülasyon ve deney arasındaki korelasyon katsayısı ilişkisi (Shahgoli, 2019)

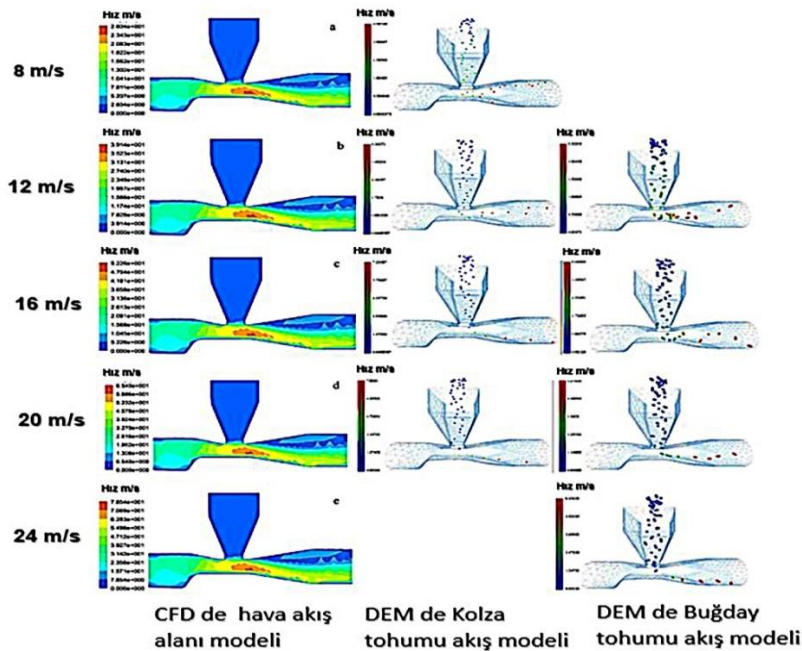
4.2. Ekim işleminde DEM uygulamaları

Xiaolong ve ark. (2016), “Simulation Of Seed Motion In Seed Feeding Device With DEM-CFD Coupling Approach For Rapeseed And Wheat” isimli bu çalışmada pnömatik hububat ekim makinelerinin ekici ünite boğaz bölümü yapısının, boğaz uzunluğunun, hava akışı giriş hızının ve tohum besleme hızının tohum hareket özellikleri üzerindeki etkilerini DEM-CFD yazılımlarının birlikte kullanımı ile incelemişlerdir. Araştırmada kolza ve buğday tohumlarını kullanmışlardır. Hava akış hızını kolza tohumu için 8-12-16 ve 20 m s⁻¹ ve buğday için 12-16-20 ve 24 m s⁻¹ olarak seçmişlerdir. Simülasyonlarda farklı tipte

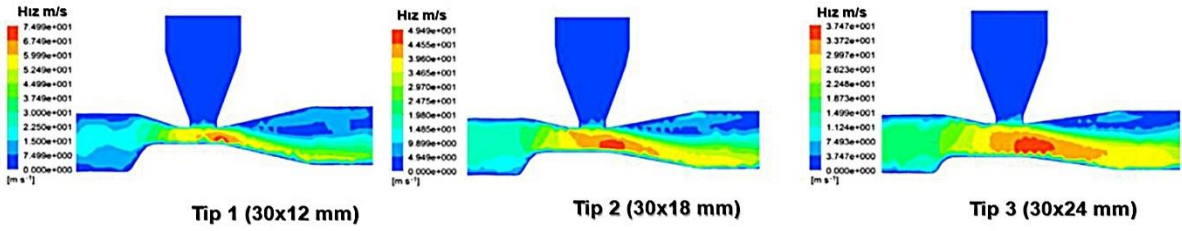
üç ekici ünite boğaz ölçüleri 30x12, 30x18 ve 30x24 mm olarak alınmış ve CFD - DEM simülasyonları yapılmıştır. Araştırma sonucunda boğaz bölümü kesit alanının, tohumların hareketini ve hava akışı alanını önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır (Şekil 22). Boğaz alanındaki kesit alanı artışının, basınç kaybına ve tohum akış hızının azalmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Kolza ve buğday tohumu için uygun hava akışı giriş hızının kolza için 16-20 m s⁻¹, buğday için ise 20-24 m s⁻¹ olarak saptamışlardır (Şekil 22). Tip 2 modeli (30x18 mm) boğaz yapısının, bu basınç kaybının en az olduğu ve üstün hava akış hızı ile iyi bir performans sergileyen model olduğunu ortaya koymuşlardır (Şekil 23).



Şekil 21. Pnömatik hububat ekim makinelerinin ekici ünitesindeki boğaz bölümünün hava akış hızı ve hava akış basıncı üzerindeki etkileri (Xiaolong ve ark. 2016)



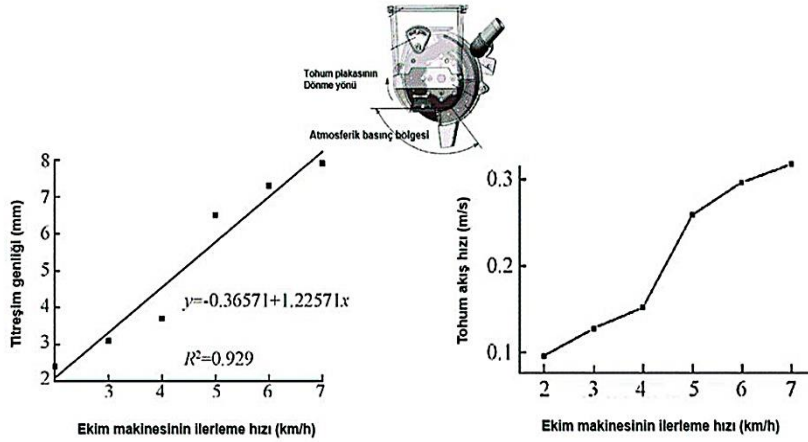
Şekil 22. Pnömatik hububat ekim makinelerinin ekici ünitesinde hava akış hızı ve tohum besleme hızının tohumların hareketleri üzerindeki etkileri (Xiaolong ve ark. 2016)



Şekil 23. Pnömatik hububat ekim makinelerinin ekici ünitesinde farklı boğaz tiplerinin hava akış hızı grafikleri (Xiaolong ve ark. 2016)

Tao ve ark. (2016), “Movement Law Of Maize Population In Seed Room Of Seed Metering Device Based On Discrete Element Method” isimli çalışmalarında doğrudan ekim işlemi sırasında pnömatik bir mısır ekim makinesinde oluşan titreşimlerin ve ekici üniteye mısır tohumlarının akışını uygulamada ve bilgisayar ortamında MATLAB+DEM uygulamasında incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre tarlada ekim makinesi çalışma hızı 2 km h⁻¹’den 7 km h⁻¹’e

çıkıldığında, ekici düzende titreşim genliğinin 2.4 ila 7.9 mm arasında doğrusal bir artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Tarla denemeleri ve simülasyon sonuçları, pnömatik hassas ekim makinesinin 3-5 km h⁻¹ hızda, titreşim genliğinin 6 mm olduğunu; tohumların maksimum hız aralığının ise 0.1203-0.2243 m s⁻¹, vakum bölgesindeki tohumun maksimum hız aralığının ise 0.127-0.26 m s⁻¹ olduğunu belirlemiştir (Şekil 24).



Şekil 24. Doğrudan ekim işlemi sırasında pnömatik mısır ekim makinesi ilerleme hızının, titreşim genliği ve mısır tohumu akışı hızı üzerindeki etkisi (Tao ve ark. 2016).

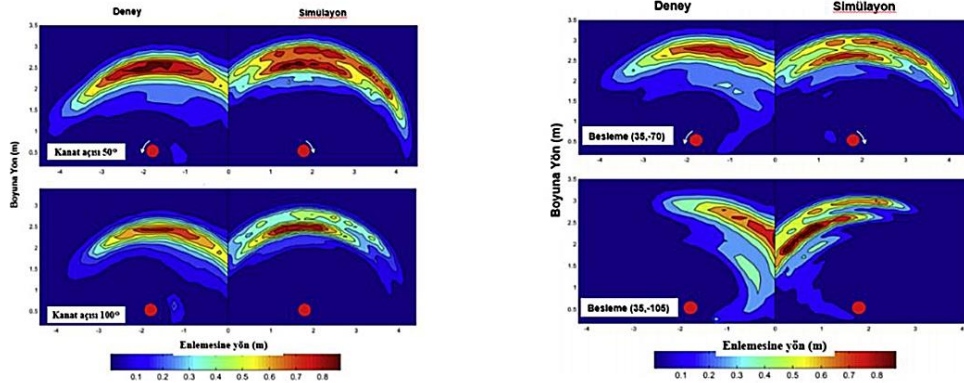
4.3. Gübre serpmeye işleminde DEM uygulamaları

Coetzee ve Lombard (2011), “Discrete Element Method Modelling Of A Centrifugal Fertiliser Spreader” isimli çalışmalarında tek diskli santrifüj gübre serpmeye makinesinin arazi yüzeyinde oluşturduğu dağılımı DEM ile incelemiştir. Bu çalışma için 300 mm çapında bir disk 300, 400 ile 500 c dönüş hızlarında ve 30 mm yüksekliğinde, 25

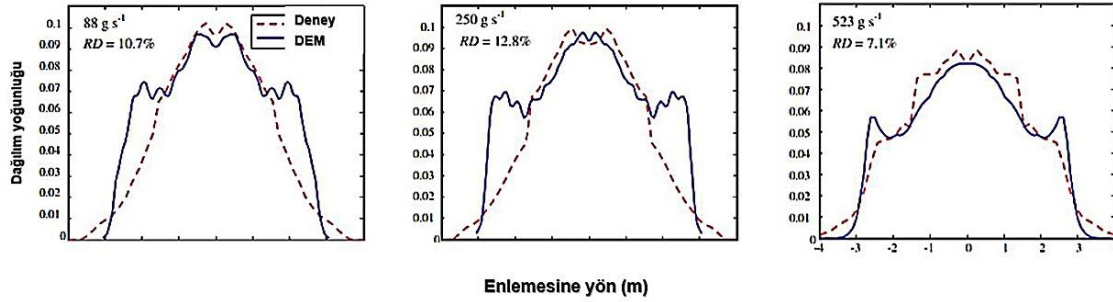
mm'lik yatay kapaklı iki kanat kullanmışlardır. Gübre besleme kapağı konumunu ayarlanabilir ve kanat açısını geriye doğru ayarlanabilir olarak tasarlamışlardır. Deney sonuçları için farklı disk dönüş hızları, gübre serpmeye makinesi ilerleme hızı, gübre besleme kapağı konumu ve kanat açıları simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. (Şekil 25). Disk dönüş hızlarındaki artışla, dağılımın diskten uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Besleme

hızındaki artışla dağılım modelinin genişlediği tespit edilmiştir. Deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında

DEM modelinin deneysel dağılımla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 26).



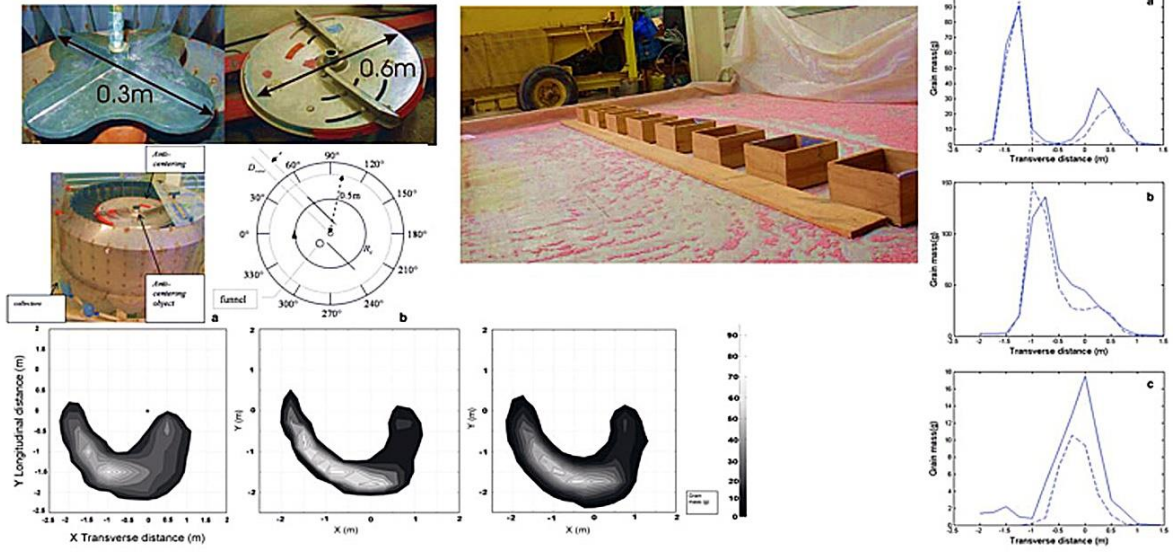
Şekil 25. Santrifüjlü bir gübre serpmek makinesinin farklı gübre besleme kapağı konumlarına ve farklı kanat açılarına göre kütle dağılım karşılaştırması (Coetzee ve Lombard 2011)



Şekil 26. Santrifüjlü bir gübre serpmek makinesinde 400 d/d disk dönme hızında, besleme konumu [(35, -50) mm], kanat açısı 0° de farklı besleme hızları için deney ve DEM grafikleri karşılaştırması (Coetzee ve Lombard 2011)

Liedekerke P. V. ve ark. (2009). “DEM Simulations Of The Particle Flow On A Centrifugal Fertilizer Spreader” isimli çalışmalarında bir santrifüjlü gübre serpmek makinesi üzerinde düz ve eğimli diskler kullanılarak 300 min^{-1} ve 650 min^{-1} da parçacık akışını hem test düzeneği kullanarak hem de DEM yazılımı kullanarak simülasyonunu yapmışlardır. Kütle dağılımı deneyi için iki farklı yöntem uygulanmıştır. İlk yöntem, gübre

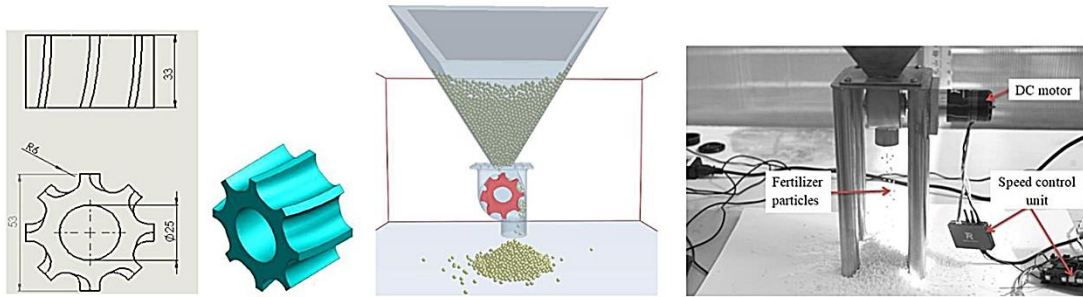
parçacıklarını disk etrafındaki tepsi de toplayan bir cihazla disk kenarındaki silindirik kütle dağılımının ölçülmesidir. İkinci bir yöntem ise, parçacıkların havada balistik uçuşlarından sonra zeminde sandıklarda toplanmasından oluşmaktadır. Sonuç olarak, parçacık çıkış hızları 10 m s^{-1} den düşük olduğunda kütle dağılım modelinin tahmininde %5 in altında sapma belirlemişlerdir.



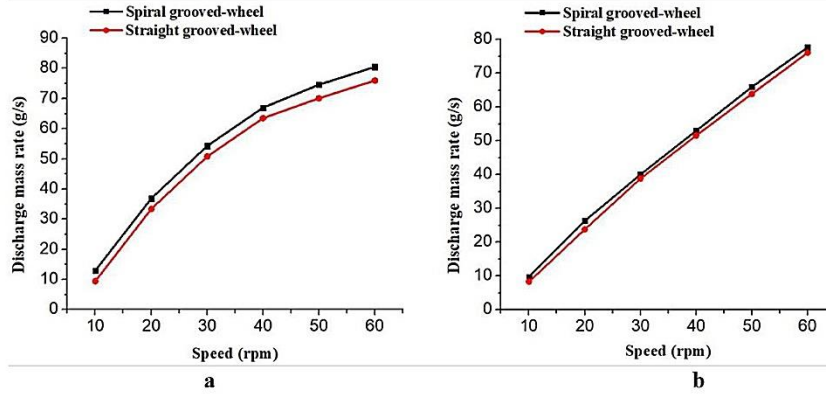
Şekil 27. Düz ve eğimli disklerin iki farklı devirde parçacık akışının oluşturduğu kütle dağılım modeli (Liedekerke P. V. ve ark. 2009).

Bangura ve ark. (2020), “Simulation analysis of fertilizer discharge process using the Discrete Element Method (DEM)” isimli çalışmada, geleneksel düz yivli çarkın yerini almak üzere spiral yivli çarklı bir gübre boşaltma makarası tasarlanmıştır. İki yivli çark tipinin gübre boşaltma performansı, ayırık elemanlar yöntemi (DEM) kullanılarak testler ve simülasyonlar yardımıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 28). İki boşaltma çark tipinin boşaltma performansı, boşaltma kütle oranı, boşaltma homojenliği ve gübre partiküllerinin düşme hızı ölçülerek değerlendirilmiştir. Elde ettikleri

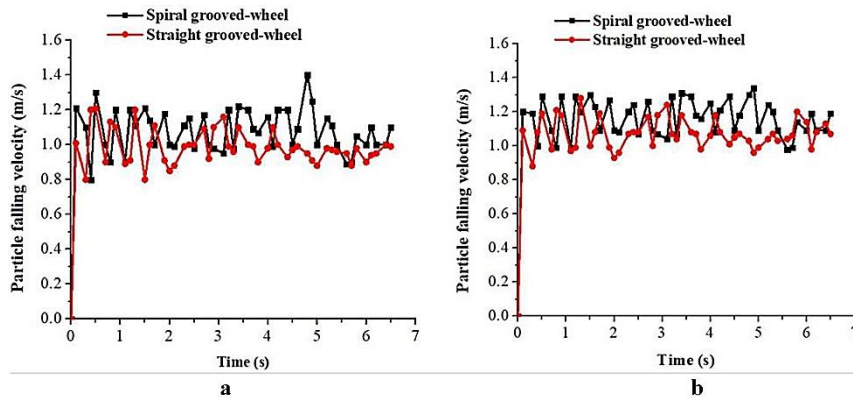
sonuçlar ise, aynı koşullar altında, spiral yivli çarkın gübre boşaltma kütle oranının düz yivli çarka göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Spiral yivli çarkın gübre boşaltma homojenliği düz yivli çarka göre çok daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Gübre partiküllerinin boşaltma açısından ortalama düşme hızı spiral yivli çark altında daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Spiral yivli çarkın boşaltma kütle oranları, boşaltma homojenliği ve partikül düşme hızları için test ve simülasyon sonuçları arasındaki bağıl hataların tümünü %10'dan az bulmuşlardır.



Şekil 28. Spiral yivli çarkın ana yapısal modelinin deneysel ve DEM simülasyon çalışmasının karşılaştırılması



Şekil 29. (a) Kompoze ve (b) üre gübresi için iki deşarj cihazının simüle edilmiş boşalma kütle oranları

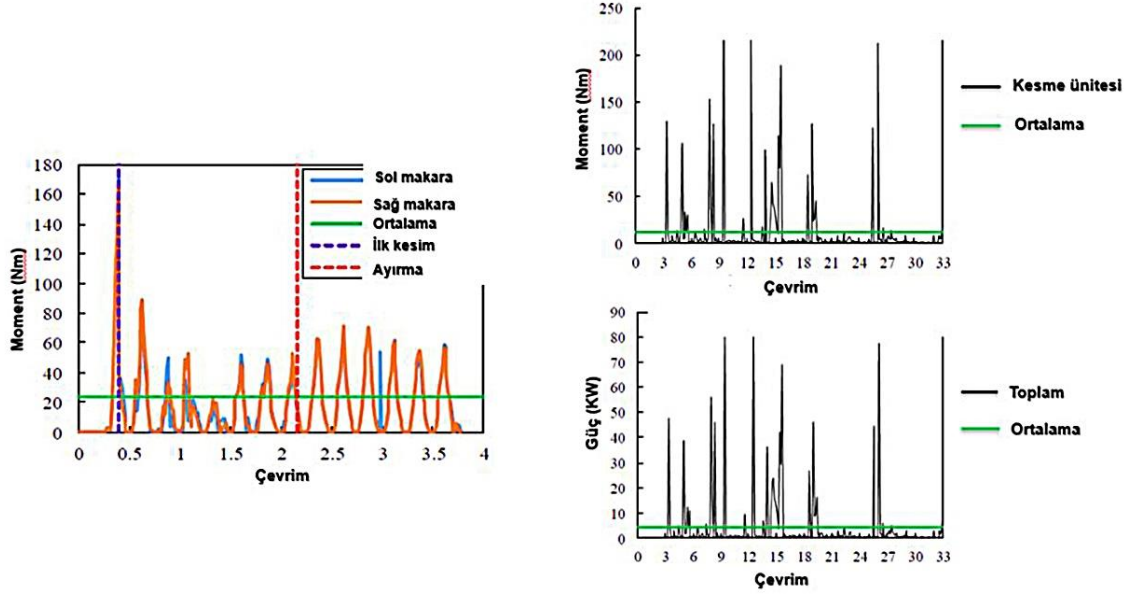


Şekil 30. (a) kompoze ve (b) üre gübresi için iki boşaltma cihazının simüle edilmiş gübre partikül düşme hızları

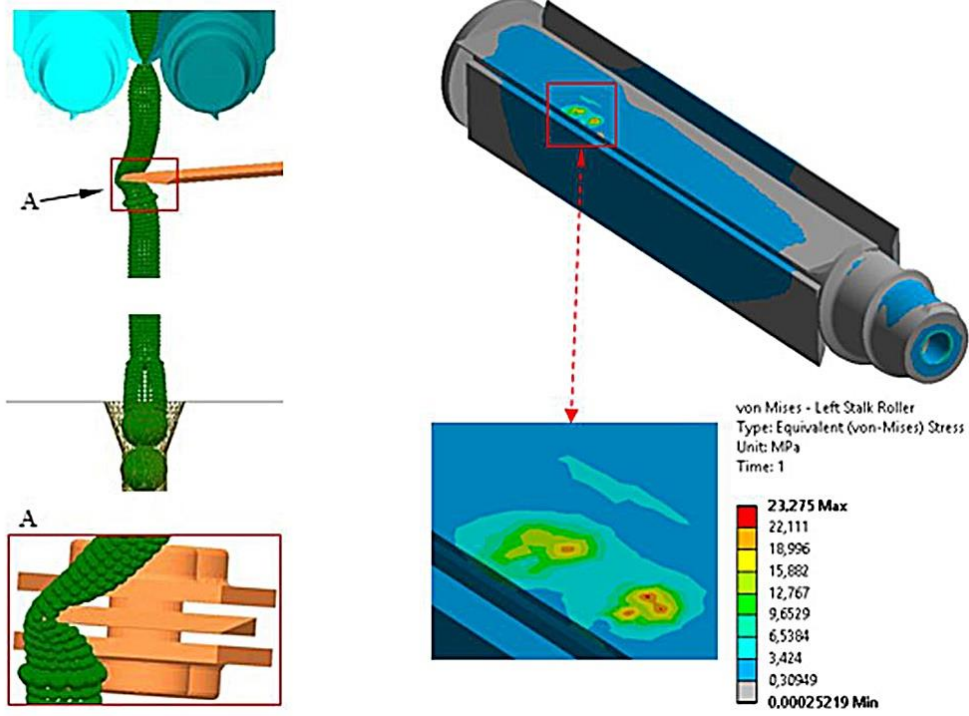
4.4. Hasat ve harman işlemlerinde DEM uygulamaları

Kovács ve Zwierczyk (2018), “Coupled DEM-FEM Simulation On Maize Harvesting” isimli araştırmalarında bir mısır hasat makinesinin sap makaralarının ve kesme ünitelerinin çalışma kalitesini, başlık ile sap ve kulak ayırma arasındaki dış yükleri ve kesme ünitesinin güç tüketimini DEM+FEM yazılımları kullanarak analiz

etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre sap makaralarının toplam güç gereksinimi 2.5-5.5 KW aralığında olup, ortalama gerekli güç 1.9 KW olarak hesaplanmıştır. Biçme ünitesinde ortalama tork 11.8 Nm, güç gereksinimi ise 4.3 KW olarak bulunmuştur (Şekil 31). FEM yazılımı ile elde edilen Von Mises eşdeğer gerilim değeri 23.275 MPa hesaplanmıştır (Şekil 32).



Şekil 31. Mısır hasat makinesinin sap makaralarının ve kesme ünitesinin moment ve güç ihtiyacı grafikleri (Kovács ve Zwierczyk 2018).



Şekil 32. Sap makaraların da oluşan Von-Misses eş değer gerilmesi (Kovács ve Zwierczyk 2018).

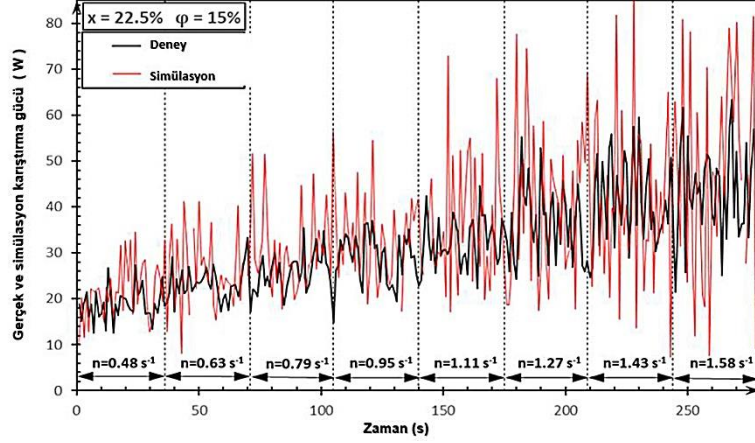
4.5. Taşıma ve iletim işlemlerinde DEM uygulamaları

Horváth ve ark. (2019), "Modeling The Movement Of Hulled Millet In Agitated Drum Dryer With Discrete Element Method" isimli araştırmalarında farklı nem içeriğine sahip granül

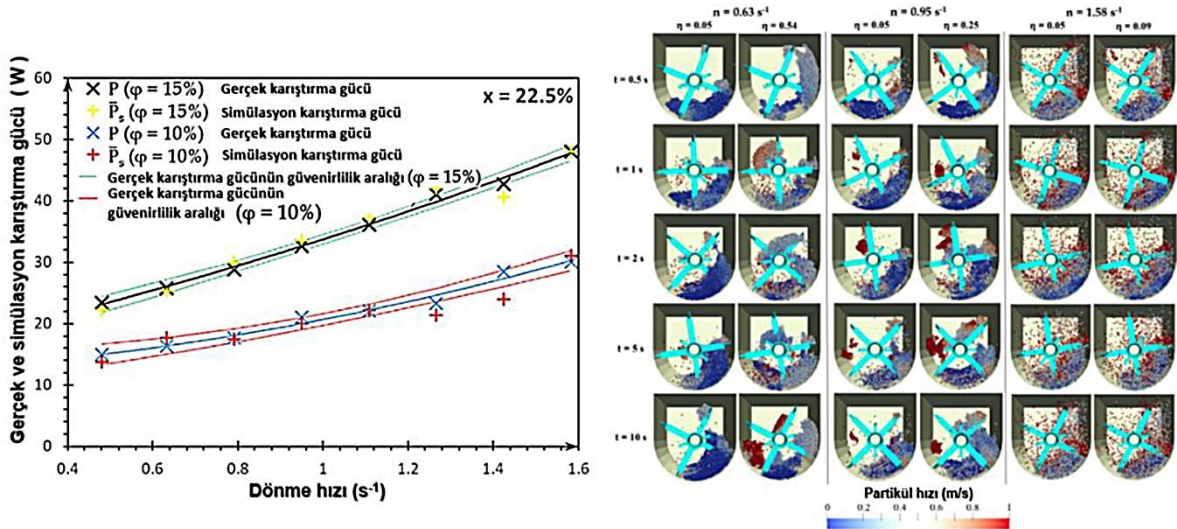
malzemelerin (darı) karıştırılmasının DEM ile modellenmesini yapmışlar ve çalkalamalı kurutucunun karıştırma güç ihtiyacını tespit etmişlerdir. Laboratuvar testlerinde, çalkalamalı kurutucunun karıştırma gücü ihtiyacı (Şekil 33), kabuğu soyulmuş darının, farklı nem (% 9.6-29.5),

farklı dönme hızları (0.32-1.58) ve farklı silindir yüklenme faktörlerinde (% 10-25) ayrı ayrı hesaplanmış ve ~50 W olarak belirlenmiştir (Şekil 34). Laboratuvar ve

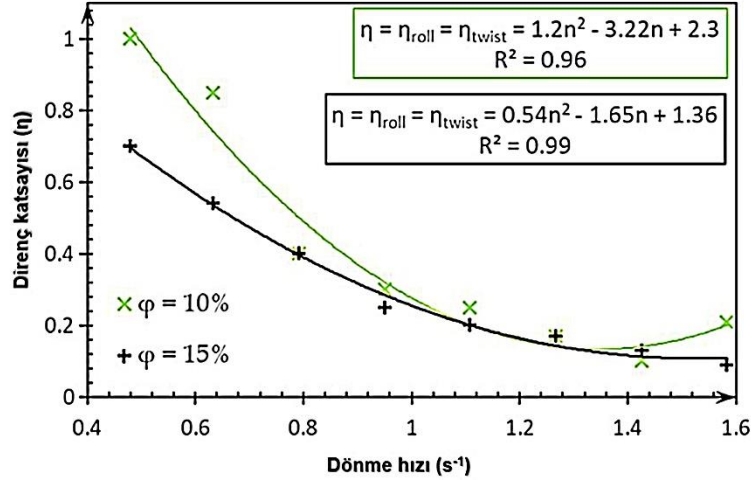
simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, bu sonuçları tanımlayan polinom fonksiyonlarının güven aralığını %99 olarak belirlemişlerdir (Şekil 35).



Şekil 33. %22.5 Nem içeriğine sahip darının %15 yüklenme oranındaki çalkalamalı bir kurutucunun zamana bağlı deney ve simülasyon karıştırma gücü grafiği (Horváth ve ark. 2019).



Şekil 34. %22.5 Nem içeriğine sahip darının %15 yüklenme oranındaki çalkalamalı bir kurutucunun güç ihtiyacı ve karıştırma performans grafiği (Horváth ve ark. 2019).

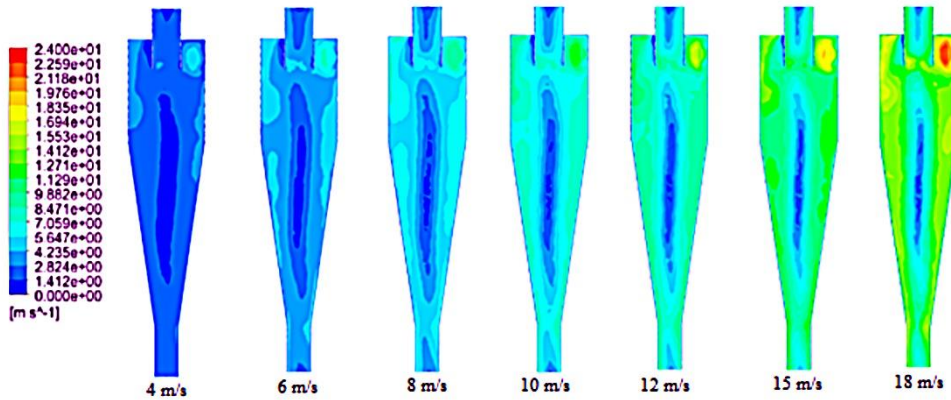


Şekil 35. %22.5 Nem içeriğine sahip darının %15 yüklenme oranındaki çalkalamalı bir kurutucunun direnç katsayısı ve dönme hızı arasındaki korelasyon katsayısı ilişkisi (Horváth ve ark. 2019).

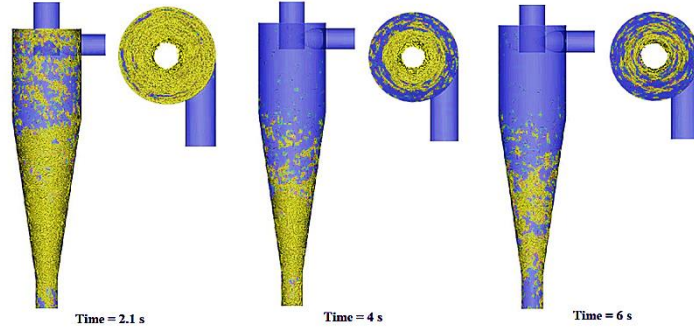
4.6. Ürün temizleme ve sınıflandırma işlemlerinde DEM uygulamaları

Orhan ve ark. (2022), “Determination of separation performance in CFD-DEM simulation using straw particles in a standard cyclone” isimli çalışmalarında aerodinamik sistemlerde biyolojik materyalin CFD-DEM ilişkisini analiz etmişlerdir. 18-15-12-10-8-6-4 m s⁻¹ hava ve saman giriş hızlarının her bir değerinde 100 g s⁻¹ ve 200 g s⁻¹ saman besleme değerlerinde simülasyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 36). Siklon duvarlarına yakın akışın, saman

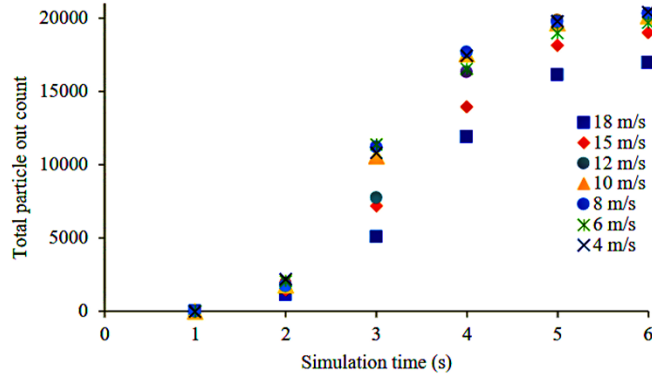
partiküllerini siklonun alt çıkış ucuna doğru yönlendirilmesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 37). En az partikül çıkışının 100 g s⁻¹ ve 200 g s⁻¹ besleme yoğunluklarında 18 m s⁻¹ hızda elde etmişlerdir (Şekil 38). En yüksek siklon çıkış verimini 100 g s⁻¹ ve 200 g s⁻¹ besleme yoğunluklarında 12 m s⁻¹ hızda elde etmişlerdir (Şekil 39). Deneme simülasyon sonuçlarının literatürle uyumluluğu, CFD-DEM uygulamasının akışkanlar içindeki partikül madde davranışını incelemek için önemli bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir.



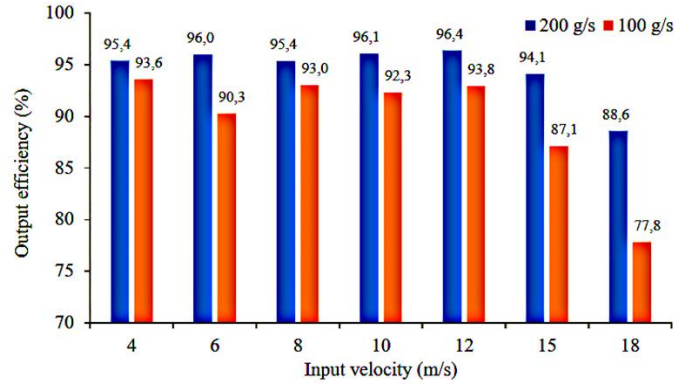
Şekil 36. Farklı giriş hızlarında siklondaki hız profilleri



Şekil 37. Samanın siklon içindeki 18 m s^{-1} giriş hızında zamana bağlı hareketi.



Şekil 38. 100 g s^{-1} besleme yoğunluğunda farklı hızlarda toplam partikül çıkış miktarı



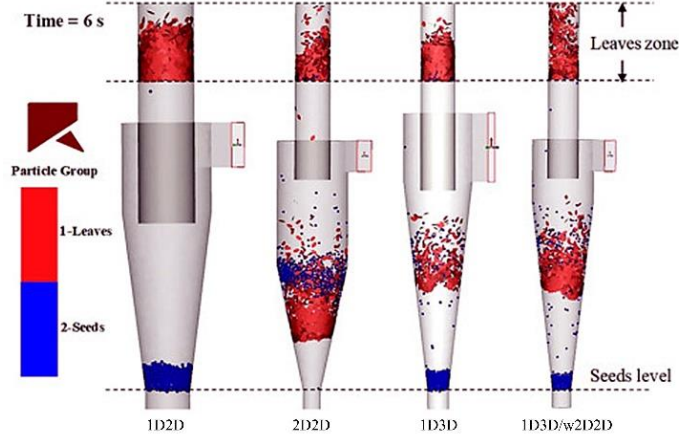
Şekil 39. Farklı giriş hızları ve besleme yoğunluklarında siklon çıkış verimliliği

El-Emam ve ark. (2021), “Performance evaluation of standard cyclone separators by using CFD–DEM simulation with realistic bio-particulate matter” isimli çalışmaları, üç standart geometideki ayırıcının birde yeni tasarım siklon ayırıcının jojoba tohumları ve yapraklarının ayrıştırılmasındaki performanslarının tahmini üzerinedir. Tohum ve yaprak partiküllerin etkileşimleri ve çarpışmaları dikkate alınarak her bir

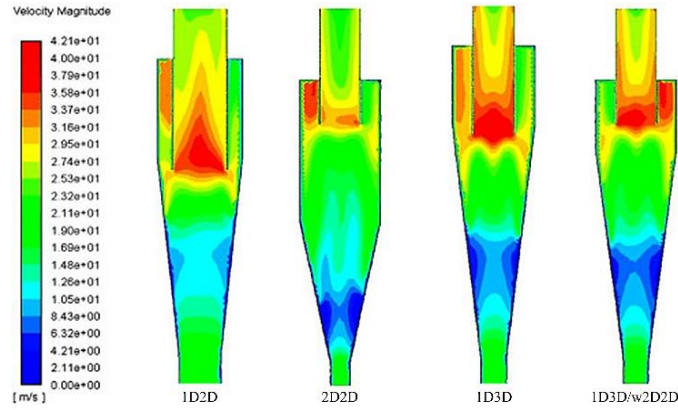
parçacığın yörüngesini simüle etmek için Ayrık Elemanlar Yöntemini (DEM) (Şekil 40), yüksek kavisli akım çizgilerini ve sürekli hava akışının kaotik türbülansını simüle etmek için ise CFD kullanmışlardır (Şekil 41). Ayrılan tohum ve yaprak partikülleri dikkate alındığında tüm ayırıcı siklonlar içinde 1D2D siklonu en yüksek ayırma veya sınıflandırma performansı gösterdiği görülmüştür (Şekil 42). CFD-DEM analizleri neticesinde siklon çapına

eşit bir silindirik uzunluğa ve siklon çapının iki katı bir konik uzunluğa sahip düşük basınçlı siklonun (1D2D) diğer siklonlara göre daha iyi bir performansa sahip olduğu sonucuna varmışlardır(Şekil 43). Bu çalışmada siklon ayırıcı içinde meydana

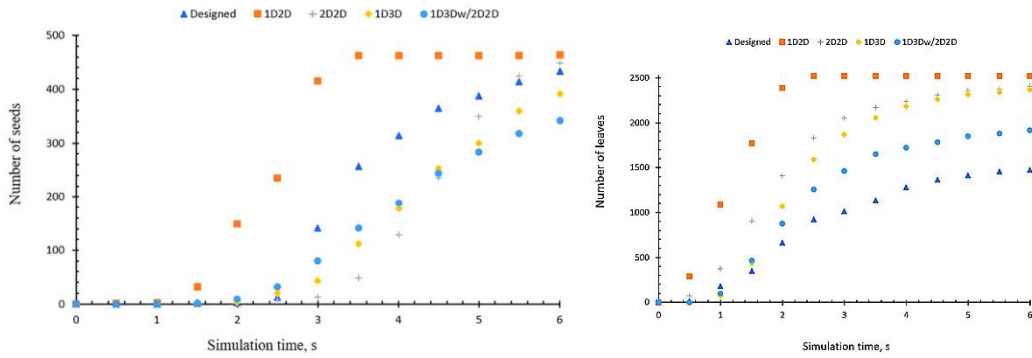
gelen olayları analiz etmek için kullanılan yöntemler, siklon performansının sadece siklon tipine değil, aynı zamanda çalışma koşullarına göre de önemli ölçüde değiştiği sonucuna varılmasını sağlamaktadır.



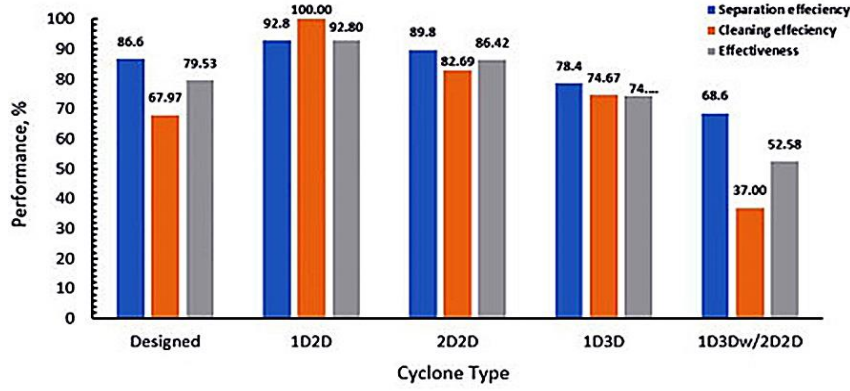
Şekil 40. Dört farklı tip ayırıcıda, partiküllerin 6 sn sonundaki yörünge simülasyonu



Şekil 41. Dört farklı tip ayırıcıda, partiküllerin 6 sn sonundaki sürekli hava akış çizgileri



Şekil 42. Simülasyon süresi boyunca ayrılan Jojoba tohumları ve yaprak partikülleri



Şekil 43. Araştırılan siklonların performans karşılaştırması

5. Sonuç

Ayrık elemanlar metodu son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere bağlı olarak mühendislik problemlerinin çözümünde oldukça önem kazanmış önemli bir sayısal yöntemdir. Ayrık elemanlar metodu (DEM) kullanılarak partikül davranışlarının tespiti ile tarım makinelerinin yapı ve çalışma parametrelerinin tasarımı ve optimizasyonu son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Bunun yanında, toprağın strüktürü, tekstürü, porozitesi, nem durumu ve tarımsal ürünlerin yapısı (tohum, sap, saman, yaprak veya meyveler) genellikle karmaşık ve oldukça farklıdır. Bu sebeple toprağın veya tarımsal ürünlerin doğru modellenmesi sonuçların güvenilirliğinin artıracaktır.

Yazarların Katkı Beyanı

Yazarların katkı beyanları yazılır. Örneğin; Yazarlar makaleye eşit katkıda bulduklarını, makalenin yayına hazır son halini gördüklerini/okuduklarını ve onayladıklarını beyan ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar, bu çalışma için herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Anonim, 2011. EDEM theory reference guide. Edinburgh, UK, DEM Solutions. https://altair.com/docs/default-source/resource-library/ebook_what_is_dem_theoretical_background_behind_the_discrete_element_method.pdf?sfvrsn=975cfcf1_3 (Erişim Tarihi: 02.05.2023).

Bangura K., Gong H., Deng R., Tao M, Liu C., Cai Y., Kaifeng L., Jinwei L., Long Q., 2020. Simulation analysis of fertilizer discharge process using the discrete element method (DEM). *PLoS ONE*, 15(7): e0235872.

Coetzee, C.J., Lombard S.G., 2011. Discrete element method modeling of a centrifugal fertilizer spreader. *Biosystems Engineering* 109 (2011): 308-325

El-Emam, M.A., Zhou, L., Shi, W., Han, C., 2021. Performance evaluation of standard cyclone separators by using CFD–DEM simulation with realistic bio-particulate matter. *Powder Technology*, 385:357-374.

Fielke, J., Ucgul, M., Saunders, C., 2013. Discrete element modeling of soil-plant interaction considering soil plasticity, cohesion and adhesion. *ASABE Annual International Meeting Conference, Conference Proceeding Books*, 21-24 July, Missouri, USA, s:450-468.

Gürsoy, S., Chen, Y., Li, B., 2017. Measurement and modeling of soil displacement from sweeps with different cutting widths. *Biosystems Engineering*, 161: 1-13.

Hazzard, J.F., Young, R.P., Maxwell, S.C., 2000. Micromechanical modeling of cracking and failure in brittle rocks, *Journal of Geophysical Research*, 105(B7): 16683-16697.

- Horváth, D., Poós, T., Tamás, K., 2019. Modeling the movement of hulled millet in agitated drum dryer with discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 162: 254-268.
- Kovács, A., Zwierczyk, P.T., 2018. Coupled DEM-FEM simulation on maize harvesting. *European Council for Modeling and Simulation*.
- Li, X., Liu, G., Zhao, J., Yin, X., Lu, H., 2022. IBM-LBM-DEM study of two-particle sedimentation: drafting-kissing-tumbling and effects of particle reynolds number and initial positions of particles. *Energies*, 15: 3297.
- Liedekerke, P.V., Tijskens, E., Dintwa, E., Rioual, F., Vangeyte, J., Ramon, H., 2009. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. *Powder Technology*, 190:348-360.
- Loth, E., 2000. Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles. *Progress in Energy and Combustion Science* 26: 173.
- Orhan, N., Şahin, S., Bahadır, M., 2022. Determination of Separation Performance in CFD-DEM Simulation Using Straw Particles in A Standard Cyclone. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 32(3): 609-622.
- Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004. A bonded particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(8): 1329–1364.
- Shahgoli, G., Shahi, N., 2011. Modeling of soil and oscillatory tine interaction using discrete element method. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 7(3): 271-275.
- Shahgoli, G., Kanyawi, N., Kalantari, D., 2019. Modeling the effects of narrow blade geometry on soil failure draught and vertical forces using discrete element method. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 29(1): 24-33.
- Tao, Z., Fei, L., Manquan, Z., Yueqin, L., Fengli, L., Chen, C., Yong, Z., 2016. Movement law of maize population in seed room of seed metering device based on discrete element method *Transactions Of The Chinese Society Of Agricultural Engineering*, 32(22): 15-25.
- Üçgül, M., Saunders, C., Aybek, A., 2018. Ayrik elemanlar metodunun tarım makineleri tasarımında kullanımı üzerine bir araştırma. *Kahramanmaraş Sütçü İman Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 21(3): 304-311.
- Üçgül, M., 2019. Kültivatörün toprak yüzeyindeki maddeleri toprağa karıştırma yeteneğinin bilgisayar simülasyonu kullanılarak geliştirilmesine yönelik bir çalışma. *Kahramanmaraş Sütçü İman Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(1): 97-105.
- Xiaolong L., Yitao L., Qingxi L. 2016. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat. *Computers And Electronics in Agriculture*, 131: 29–39.

Atf Şekli: Bahadır, M., Acar, M., Yıldırım, M., Vural, F.Ö., Doğan, İ.B., Özbek, O., 2023. Ayrik Elemanlar Metodu ve Tarım Makinelerindeki Bazı Uygulamaları. *MAS Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 8(4): 630–653.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8395677>.

To Cite: Bahadır, M., Acar, M., Yıldırım, M., Vural, F.Ö., Doğan, İ.B., Özbek, O., 2023. Discrete Element Method and Some Applications in Agricultural Machinery. *MAS Journal of Applied Sciences*, 8(4): 630–653.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.8395677>.
