



Alınış tarihi (Received): 11.06.2020
Kabul tarihi (Accepted): 30.12.2020

Toprak Sıkışması Ölçüm Sistemleri ve Teknolojik Gelişmeler

Esra Nur GÜL^{1*}, Mehmet Metin ÖZGÜVEN¹, Engin ÖZGÖZ¹

¹*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tokat*
** Sorumlu yazar: esranur.gul4219@gop.edu.tr*

ÖZET: Toprak sıkışması, kök büyümesi ve bitki çıkışı için önemli bir fiziksel sınırlayıcı faktördür ve dünya çapında ürün verimini azaltan başlıca nedenlerden biridir. Toprak sıkışma profillerinin belirlenmesi, uygulanacak toprak işleminin ve derinliğinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Toprak koni penetrometreleri bu amaç için yaygın olarak kullanılmasına rağmen gerekli olan değeri elde etmek için çok sayıda ölçüm yapmak uzun zaman almakta ve işgücü gerektirmektedir. Bu nedenle son yıllarda coğrafi koordinat temelli mekansal ölçümler yapabilen sistemler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu sistemler işlemlerin kolaylaştırıldığı mekanizma ve sistemlere sahip olmasıyla, büyük alanlardan kısa zamanda çok sayıda veri alınabilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, toprak sıkışması ölçüm sistemleri ve ölçüm sistemlerinde görülen yeni gelişmeler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler– Toprak sıkışıklığı, koni indeksi, penetrometre, hidrolik toprak penetrometresi, yatay penetrometre

Soil Compaction Measurement Systems and Technological Developments

ABSTRACT: Soil compaction is an important physical limiting factor for root growth and seed emergence, and is one of the main reasons for reducing crop yields worldwide. Identification of soil compaction profiles helps to determine the tillage management and appropriate tillage depth. Although soil cone penetrometers are widely used for this purpose, it takes a large amount of time and labour force making multiple measurements to obtain the measured value. For this reason, systems capable of making spatial measurements based on geographic coordinates have been preferred in recent years. These systems have mechanisms and systems that facilitate operations, making it possible to receive huge amounts of data from large areas in very short time. In this study, new developments in soil compaction measurement systems and measurement systems are presented.

Keywords– Soil compaction, cone index, penetrometer, hydraulic soil penetrometer, horizontal penetrometer

1. Giriş

Dünya nüfusu ve kentleşmenin hızla artması tarım alanları ve doğal kaynakların azalmasına sebep olmakta, bununla birlikte artan gıda talebinin karşılanması amacıyla da yapılan yoğun tarımsal uygulamalarda çeşitli sorunları beraberinde getirmektedir. Bu sorunlara örnek olarak kimyasal gübre ve ilaçların aşırı kullanımıyla toprakta ve yeraltı sularında çevre kirliliği yaşanması, yanlış ve aşırı sulama sonucu su kaynaklarının azalması, yoğun makine kullanımı ve toprak erozyonu gibi sebeplerden dolayı toprak bozunumunun yaşanması gösterilebilir (Özgüven ve ark., 2019).

Tarımsal üretimde zaman içerisinde önceleri ana hedef verim ve üretim artışı iken, günümüzde ürün kalitesinin artırılması, minimum girdi kullanımı, gıda güvenirliliği, doğal

kaynakların korunması ve çevre bilincinin artmasıyla ekonomik üretim ve sürdürülebilir tarım kavramları öncelikli hale gelmiştir (Özguven, 2018a). Sürdürülebilir tarımın; yeterli miktarda ve artan kalitesiyle tarımsal ürünlerden elde edilen gelirlerin arttırılmasıyla ekonomik, tarımda üreticilerin yaşam kalitesinin yükseltilmesiyle sosyal ve doğal kaynakların etkin kullanılıp çevre kirliliğinin azaltılmasıyla çevresel hedefleri bulunmaktadır (Özguven, 2019).

Teknolojinin gelişmesiyle ortaya çıkan donanım, algoritma ve yazılımların tarımda mevcut bilgi ve tecrübeler ile birlikte değerlendirilmesiyle tarımsal işlemlerin kolaylaştırılması, çözüm veya iyileştirme bekleyen sorunlara alternatif çözümler getirilmesi mümkün olmuştur. Bilginin elde edilmesi, işlenmesi, depolanması, aktarılması ve kullanılması süreçlerini yöneten teknolojik yöntem, model ve araçların, işlem ve hesaplama gücü yüksek, taşınabilir bilgisayarların ve donanımların piyasada kolay bulunabilir olmasıyla saha uygulamalarında kullanımı artmış ve kullanım sırasında elde edilen tecrübeye bağlı olarak da gelişme farklı alanlara da uygulanarak daha da hızlanmıştır (Özguven ve ark., 2020). Tarımsal üretimin gelişme dönemi boyunca mekanizasyon, otomasyon, kontrol ve bilişimden sonra bilgi teknolojilerinde hızlı bir gelişim görülmüştür. Bunun sonucunda, günümüzde akıllı makineler ve makineleri kontrol eden üretim sistemleri geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır (Ozguven, 2018b).

Hassas tarım sistemleri kontrol, elektronik, bilgisayar ve veri tabanı ile hesap bilgisini bir araya getirerek gelişmiş bir sistem yaklaşımı ortaya koymaktadır. Hassas tarım ekipman ve teknolojileri üreticilerinin geliştirdiği sensör ve yazılımlar sonucu gerçek zamanlı ürünün durumunun algılandığı ve aynı anda değişken oranlı uygulama yapan sistemler de geliştirilmiştir. Hassas tarımda, geleneksel tarıma göre işletmecilik ve karar verme işlemlerinde önemli değişimler yaşanmıştır. Geleneksel tarımda, tarladan alınan toprak örnekleri ve bu örneklerin analiz sonuçlarına göre belirlenen normda tarlanın her yerine sabit normda uygulama yapılmaktadır. Hassas tarımda ise, optimum ekim yoğunluğu, tarımsal ilaç, gübre ve su ihtiyaçları gibi girdiler GPS, uzaktan algılama, gerçek zamanlı sensörler vb. ile toplanarak değişkenlikler belirlenmekte ve alana özgü uygulamalarla değişkenliğe bağlı olarak işletme sonucunda ise, etkin girdi kullanımı, azalan üretim maliyetleri ve çevresel etkiler ile artan ürün kalitesi ve verimlilik sağlanmaktadır (Özguven ve Türker 2010; Özguven, 2018a).

Hassas tarımda; verim kayıt bilgileri, toprak analizi sonuçları, toprak pH'sı, toprak sıkışıklığı, elektriksel iletkenliği gibi hazırlanan toprak haritaları ve topoğrafya gibi tarlaya ait mevcut olan uzaysal veri kayıt bilgilerinin birlikte değerlendirilmesiyle; tarlanın geneline ait alana özgü bitki gelişimi, hastalık durumu ve gerekli girdi miktarları belirlenmeye çalışılmakta ve yapılacak uygulamaya göre haritalar oluşturulmaktadır. Önceden belirlenmiş bitkinin gelişimini kısıtlayıcı düşük toprak pH'sı, toprak sıkışıklığı gibi arazi problemleri tarımsal üretimde giderilmeye çalışılır. Ortadan kaldırılamadığı durumlarda tarımsal uygulamalar sırasında uygulanan girdilerin miktarını azaltmak değişken oranlı uygulama ile mümkün olmaktadır (Özguven, 2018a).

Bitki büyümesi ve verime etki eden toprağın bünyesi, agregat özelliği, toprak derinliği, organik madde içeriği, eğim ve arazi yapısı ile toprağa uygulanan sıkışma ve toprak işleme yöntemleri hassas tarımda özellikle göz önüne alınmaktadır. Ayrıca toprağın organik madde içeriği ve bu içeriğinin yükseltilmesi yönündeki uygulamalar da hassas tarımın konuları arasındadır. Toprak özelliklerinin ölçülmesi için hareket halinde kullanılan gerçek zamanlı sensörler ile organik madde, toprak pH düzeyi ve bitki besin elementleri, elektriksel iletkenlik, nem içeriği, toprak sıkışıklığı ölçülebilmektedir (Vatandaş ve ark., 2005).

Toprak, bitkilere mekanik desteğin yanında bitki köklerine su, oksijen ve bitki besin maddelerini sağlamak suretiyle bitki gelişimine destek olan bir ortamdır (Güneş ve ark., 2013). Bu nedenle hem toprak ve su kaynaklarını korumak hem de verimi artırmak için tohum yatağı hazırlığından hasada kadar bitkisel üretim için uygun bir toprak ortamı sağlanmalıdır. Bu amaçla ilk olarak iklim ve toprak şartlarını göz önüne alarak tohumun isteklerine göre uygun derinlikte toprak işleme yapılmalıdır. Toprak işleme herhangi bir amaç için toprağın mekanik etkilerle düzenlenmesi işidir ve genellikle toprak işleme derinliği 20-25 cm'dir.

Amerikan Toprak Bilimi Topluluğu (SSSA, 1987) toprak işlemeyi, bitkisel üretim amacıyla toprak özelliklerinin fiziksel değişimi; Boone (1988) bitkisel üretim için gerekli olan toprağı kesmek, parçalamak, devirmek, karıştırmak gibi eylemler (Gajri ve ark., 2002) ile Schafer ve Johnson (1982) ise toprağın durumunu değiştirmeye yönelik her faaliyet olarak tanımlamışlardır (Özgöz ve ark., 2015).

Toprak işleme ile oluşturulan toprak durumunun vejetasyon süresi boyunca korunması verim açısından önemlidir. Toprak işleme sırasında ve sonrasında yoğun tarla trafiğine neden olabilecek gübre dağıtma, ilaçlama, hasat gibi tarımsal amenajman uygulamaları doğru zaman ve yoğunlukta yapılmadığında toprak bozunması tiplerinden birisi olan toprak sıkışması meydana gelmektedir. Toprak sıkışması toprağın direncini ve hacim ağırlığını artırmakta, gözenekliliği, suyun toprağa giriş oranını ve su tutma kapasitesini azaltmakta, yüzey akışının artmasına ortam hazırlamasıyla bitki kök gelişimini engellemekte (Şekil 1) ve sonuçta bitki kaybı gibi olumsuzluklara sebep olmaktadır. Engelleyici sınır değer 3 MPa olarak kabul edilmektedir (Hakansson ve Lipiec, 2000; Ünver, 2014).



Şekil 1.(a)Yatay kök gelişimi (Özgöz ve ark., 2010) ve (b) sıkışmış toprak katmanı (Günel ve ark., 2015).

Figure 1. (a) Horizontal root development (Özgöz et al., 2010) and (b) compacted soil layer (Günel et al., 2015).

Küresel ölçekte, 68 milyon hektardan daha fazla tarım alanı sıkışmış toprak olarak sınıflandırılmakta ve bunun yaklaşık %4'ünün de insan kaynaklı sebeplerden meydana geldiği ifade edilmektedir (Oldeman ve ark., 1991). Sadece Avrupa'da, toplam bozunmuş tarım alanının %17'si toprak sıkışması kaynaklıdır (Khan, 2014). Türkiye'de ise, düşük organik madde ve yüksek kil içeriği sıklıkla taban taşı oluşumuna yol açmaktadır (Günel ve ark., 2015). Çarman (2002), Türkiye'de toprak sıkışmasının neden olduğu verim kaybının 1 milyar dolardan fazla olduğunu ifade etmektedir.

Yapılan yanlış uygulamalar sonucunda oluşan toprak sıkışıklığını ortadan kaldırmak için dip kazan uygulaması gibi ilave maliyet ve zaman gerektiren işlemler yapılması zorunlu olmaktadır. Sıkışmanın toprak profilindeki yeri ve şiddetinin doğru belirlenmesi, sonrasında uygulanacak işlemlerin doğru seçilmesinde önemli rol oynamaktadır. Toprak sıkışmasının değerlendirmesinde; toprak kuru hacim ağırlığı, porozite, hidrolik özellikler ve penetrasyon

direnci gibi toprak özellikleri kullanılmaktadır. Toprak sıkışması sıklıkla, ölçümünün hızlı ve kolay olması bakımından penetrasyon direnci ile ifade edilmektedir.

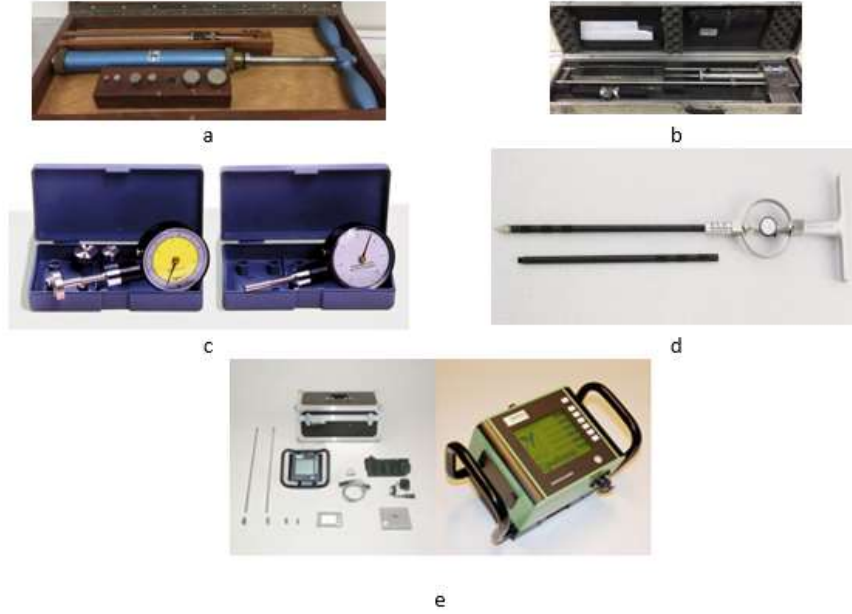
Penetrasyon direnci ölçümünde standartlaştırılmış koni penetrometre ölçümleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Koni penetrometre okumaları “dur-git” prosedürü gerektirmekte ve sadece farklı konumlarda veri sağlamaktadır. Bu yöntemle çalışılan alanda sıkışmanın tespiti için belirli noktalardan ölçüm alınmakta ve alanın penetrasyon direnci değeri ortalama olarak ifade edilmektedir. Elde edilen değer sınır değerlerin üzerinde ise sıkışmanın giderilmesi ile ilgili işlemlerin yapılmasına karar verilmektedir. Arazideki toprak özelliklerinin değişkenliği düşünüldüğünde bu yöntemde doğru sonuca varılması için doğru noktalardan ve oldukça çok sayıda ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, penetrasyon direncinin coğrafi koordinatları ile birlikte dolaylı mekansal ölçümler yapılarak belirlenmesi tercih edilen bir alternatif haline gelmiştir. Dolaylı ölçümler için tarlada gerçek zamanlı veri alınmasını sağlayacak sensör ve veri toplama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Penetrasyon direnci gerçek zamanlı olarak belirlendiğinde alana özgü haritalar oluşturulabilmekte ve diğer hassas tarım uygulamaları ile birleştirilerek alanla ilgili daha sağlıklı değerlendirmeler yapılabilmektedir (Chung ve ark., 2004).

Genel olarak toprak sıkışıklığı, konik bir ucun toprak içerisine itilmesi sırasında toprağın gösterdiği mekanik direncin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Bu amaçla geliştirilen toprak mekanik direnci ölçüm metotları; (1) Elle itmeli statik koni penetrometreler, (2) traktöre asılan koni penetrometreler ve (3) gerçek zamanlı veri alabilen yatay direnci ölçen penetrometreler olarak sınıflandırılabilir (Rahimi-Ajdadi ve Abbaspour-Gilandeh, 2017). Bu makalede, toprak sıkışıklığı ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve penetrasyon direncinin ölçülmesinde kullanılan penetrometreler ile hassas tarım teknolojilerine uygun olarak toprak sıkışmasının gerçek zamanlı olarak ölçülerek haritalanmasına imkan sağlayan ölçüm sistemleri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

2. Toprak Sıkışmasının Elle İtmeli Statik Koni Penetrometreyle Ölçümü

Toprak sıkışması, neden olan etkenlere göre toprak yüzeyinde veya toprak profilinin farklı derinliklerinde meydana gelebilmektedir. Bu nedenle oluştuğu yere göre; kaymak tabakası, yüzey toprak sıkışması, pulluk tabanı ve alt (derin) toprak sıkışması gibi farklı isimler alabilmektedir (Kirişçi, 1999).

Toprak işleme sistemlerinin (Hao ve ark., 2000), bitki gelişme yeteneğinin (Busscher ve ark., 2001), tohum çıkış oranı ve makinaların neden olduğu sıkışmanın (Mosaddeghi ve ark., 2000) belirlenmesi amacıyla toprak işleme direncini karakterize etmek için toprak penetrometreleri kullanılmaktadır (Vizitiu ve ark., 2010). Toprak direnci; bitki köklerine, toprak canlılarına ya da toprak işleme ve ekim gibi diğer mekanizasyon uygulamalarına karşı da olabilmektedir. Düşey toprak direncinin ölçülmesi, kolay oluşunun yanı sıra toprağın genel işleme direnci konusunda da yargıya varmayı kolaylaştırmaktadır. Sadece kabuk sertliği ölçümünde cep penetrometresi yeterli iken profildeki özgül ağırlıklara ilişkin direncin ölçülmesinde koni penetrometreler kullanılmaktadır (Munsuz ve Ünver, 1982). Koni penetrometre çeşitleri; proktorpenetrometresi, kağıt yazıcılı penetrometre, cep penetrometresi, kadran göstergeli koni penetrometre ve veri kaydedicili penetrometredir (Şekil 2).



Şekil 2. Bazı koni penetrometre örnekleri: a) Proktor penetrometre, b) Kâğıt yazıclı penetrometre, c) Cep penetrometresi (utest.com), d) Kadran göstergeli koni penetrometre (ele.com), e) Veri kaydedicili dijital penetrometre (eijkelkamp.com).

Figure 2. Some examples of cone penetrometers: a) Proctor penetrometer, b) Penetrograph, c) Pocket penetrometer (utest.com), d) Cone penetrometer with dial indicator (ele.com), e) Penetrologger (eijkelkamp.com).

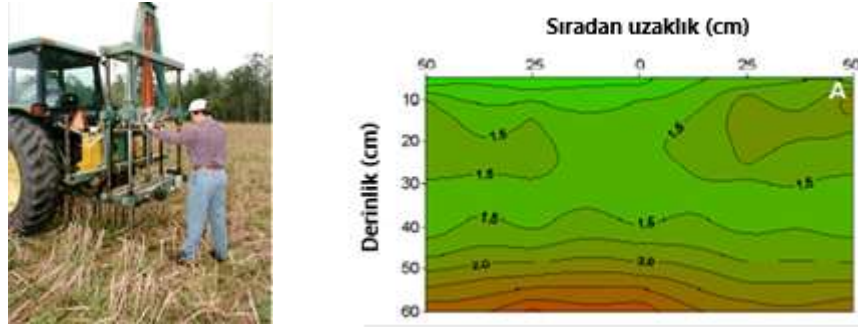
Penetrometrelerin 1846'dan beri kullanıldığı (Perumpral, 1987) raporlarda ifade edilse de, günümüzde var olan yaygın formdaki penetrometreler 1934'den beri kullanılmaktadır (Rahimi-Ajdadi ve Abbaspour-Gilandeh, 2017). Penetrometre okumalarında elde edilen penetrasyon direnci koni indeksi kavramıyla Amerikan Ziraat Mühendisleri Derneği (American Society of Agricultural Engineers, ASAE) tarafından standartlaştırılmıştır. Koni indeksi, konik bir ucu toprak içerisine itmek için ihtiyaç duyulan kuvvetin konik ucun taban alanına oranı olarak tanımlanmakta ve genellikle MPa olarak ifade edilmektedir (ASAE, 2000). ASAE (2000) tarafından; farklı toprak özelliklerinde kullanılmak üzere tepe açısı 30° ve taban alanı 1 cm^2 , 2 cm^2 , 3.33 cm^2 ve 5 cm^2 olan konik uçlar standartlaştırılmıştır. Bu standarda göre, ölçüm sırasında penetrometre toprak içerisine 30 mm/dak sabit hızla itilmeli ve bu hız ölçüm süresince değişmemelidir. Bu şekilde sabit penetrasyon hızını elde etme zorunluluğu aletin dezavantajıdır (Rahimi-Ajdadi ve Abbaspour-Gilandeh, 2017). Bu nedenle, toprak sıkışıklığının doğru olarak belirlenebilmesi için yapılan çalışmadaki ölçümlerin aynı kişi tarafından ve her bir örnek noktasından fazla sayıda ölçüm yapılması tavsiye edilmektedir. Şekil 2e'de örneği gösterilen veri kaydedicili dijital penetrometrelerde (penetrologger) ise ölçüm anında penetrasyon hızı görülebilmekte ve bu şekilde sabit penetrasyon hızı elde edilmeye çalışılmaktadır.

3. Traktöre Asılan Hidrolik Hareketli Düşey Koni Penetrometreleri

Toprak işleme araştırmalarında penetrometre ile toprak direnci ölçümleri özellikle toprak sertliğinin yüksek olduğu şartlarda hem zor hem de zaman alıcı olmaktadır. Bu ölçümlerin doğru ve kısa zamanda yapılmasının öneminden dolayı bu sorunları aşmak, insan iş gücünü azaltmak ve veri kaydının hassasiyetini artırmak amacıyla traktöre monte edilen ve koninin

toprak içerisine penetrasyonu için genellikle hidrolik gücün kullanıldığı penetrometreler geliştirilmiştir (Gülsoylu ve Çakır, 2005; Rahimi-Ajjadi ve Abbaspour-Gilandeh, 2017).

Raper ve ark. (2000), traktöre monte edilebilen ve toprak sıkışıklığı profillerini hızlı ve kolay bir şekilde belirlemek için kullanılacak, hidrolik sistemden hareket alan çok problu toprak koni penetrometresi geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, geliştirilen penetrometre (Şekil 3) ile sıra üzeri ve sıra arası 25 ile 50 cm (sol ve sağ) mesafelerden olmak üzere 5 noktadan ölçüm yaparak sıra üzeri ve sıra arası toprak penetrasyon direnci değerlerini haritalamışlardır (Şekil 3).



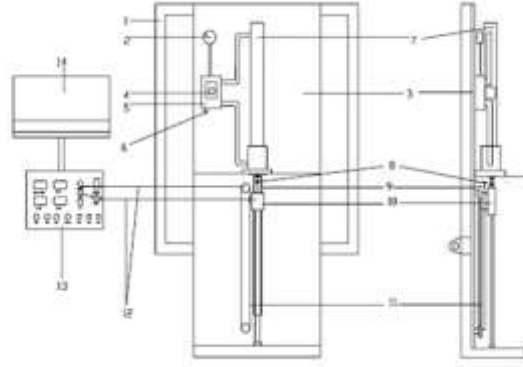
Şekil 3. Koni indeks değerlerini yan yana beş pozisyonda alan çoklu prob toprak ölçüm sistemi (Raper ve ark., 1999).

Figure 3. Multiple-probe soil measurement system that obtains cone index values in five positions across a row (Raper et al., 1999).

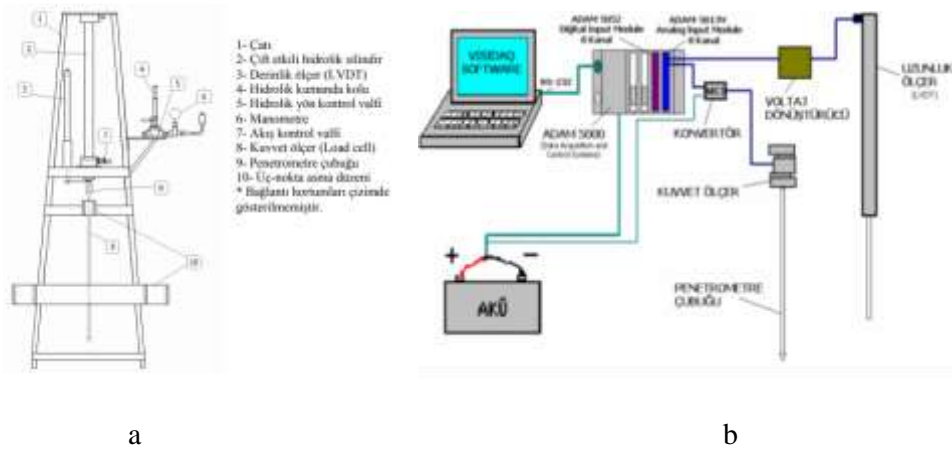
Tekin ve Okursoy (2003), toprak sıkışmasının ölçümü için Şekil 4’te görülen traktör hidrolik sisteminden tahrikli penetrometreyi geliştirmişlerdir. Geliştirilen penetrometre traktörün üç nokta askı sistemine bağlanmakta ve standart ölçülerdeki penetrometre konisini bir hidrolik piston aracılığıyla sabit hızda toprağa itilmektedir. Araştırmacılar, traktör hidrolik sisteminden yararlanılmasıyla penetrometre ile koninin penetrasyon hızının standart değerde tutulabildiğini, toprak sıkışıklığını belirleyecek olan yüke ait analog verilerin dijital formlara dönüştürülebildiğini ve kullanıcı tarafından kabin içerisindeki bilgisayardan verilere anında ulaşılabilirliğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, toprak sıkışıklığına ilişkin verilerin traktör kabininden ayrılmadan doğru bir şekilde hızlı ve zahmetsiz olarak alınabilmesi sayesinde, çalışma performansı açısından sistemin kullanıcıya önemli derecede kolaylıklar sağladığı belirtilmiştir.

Çakır ve ark. (2004) tarafından geliştirilen elektronik bir ölçüm sistemi bulunan hidrolik penetrometre, traktörün üç nokta askı sistemine bağlanmakta ve koninin toprak içerisine itilmesinde gerekli olan hidrolik gücü traktörün ana hidroliğinden almaktadır (Şekil 5). Toprak direnci hidrolik silindirde piston ile penetrometre çubuğu arasında dikey olarak yerleştirilmiş olan kuvvet ölçer ile ölçülmektedir. Araştırma sonuçlarına göre, dizayn edilen hidrolik penetrometrenin toprağın penetrasyon direncini başarıyla ölçebildiği ifade edilmiştir (Gülsoylu ve Çakır, 2005).

Boon ve ark. (2005), toprak direncinin ve kayma gerilmesinin aynı anda yerinde ölçümü amacıyla traktöre bağlanan otomatik bir toprak penetrometresi tasarlamış ve geliştirmişlerdir. Sistem; bir penetrometre, kontrol sistemi, veri toplama sistemi ve bir GPS sisteminden oluşmaktadır. Sistem, traktör üzerine yerleştirilerek gerçek zamanlı olarak ölçüm, görüntüleme ve kayıt yapabilmektedir. Araştırmacılar geliştirilen sistemle arazide yaptıkları ölçümlerle alanın penetrasyon direnci değerlerini haritalamışlar ve iş gücü gereksiniminin azaltıldığı, zamanın etkin kullanıldığı ve gerektiğinde GPS sayesinde aynı bölgeden ölçüm tekrarlarının yapılabilirliğini ifade etmişlerdir (Şekil 6).



Şekil 4. Traktör hidrolik sisteminden tahrikli penetrometre (1: Profil çatı, 2: Basıncgöstergesi, 3: Sac, 4: Akış kontrol valfi, 5: Hidrolik blok, 6: Basınc emniyet valfi, 7: Hidrolik silindir, 8: Piston bağlantı elemanı) (Tekin ve Okursoy, 2003).
Figure 4. Penetrometer driven from tractor hydraulic system (1: Profile frame, 2: Pressure gauge, 3: Sheet metal, 4: Flow control valve, 5: Hydraulic block, 6: Pressure relief valve, 7: Hydraulic cylinder, 8: Piston connector) (Tekin and Okursoy, 2003).



Şekil 5.(a) Hidrolik penetrometreyi oluşturan parçalar ve (b) elektronik ölçme sisteminin bağlantı şeması (Çakır ve ark., 2004).
Figure 5. (a) Parts forming the hydraulic penetrometer and (b) connection diagram of the electronic measuring system (Çakır et al., 2004).



Şekil 6. Veri toplama sistemi ve traktöre monte edilmiş toprak penetrometresi (Boon ve ark., 2005).

Figure 6. Data collection system and tractor mounted soil penetrometer (Boon et al., 2005).

4. Toprak Sıkışmasının Ölçümünde Kullanılan Gerçek Zamanlı Veri Alabilen Yatay Penetrometreler

Toprak sıkışıklığı haritalarının yüksek doğrulukta üretilmesi, uygulamada tüm alan boyunca yeterli sayıda coğrafi referanslı noktadan mekansal verinin toplanmasına bağlıdır. Bu işlemler uzun zaman ve fazla çaba gerektirmektedir (Carrara ve ark., 2007). Ancak, toprak sıkışıklığı için verilerin, hızlı ve konum bazlı olarak hassas olarak ölçülebilmesi ve haritalanabilmesiyle toprak sıkışıklığının derinliğine bağlı olarak alanın belirli bölgelerinde farklı derinliklerde toprak işleme yapılabilecektir (Fulton ve ark., 2000). Böylece alana özgü farklı derinliklerde toprak işleme ile yakıt, zaman ve iş gücü tasarrufu sağlanmaktadır.

Doğrudan toprak sıkışıklığı ölçümleri için önerilen yöntemlerin emek gerektiren ve büyük ölçekli alanların haritalanması için maliyetli olduğu kabul edilmektedir. Hassas tarımda görülen gelişmelerle birlikte coğrafi referanslı dolaylı toprak sıkışıklığı ölçümlerinin uygulanması üreticiler ve araştırmacılar için daha çekici bir alternatif haline gelmiştir. Hassas tarım teknolojilerinin toprak sıkışıklığının mekansal değişiminin belirlenmesinde kullanıldığı birçok çalışma araştırmacılar (Raper ve ark., 1999; Tekin ve Okursoy, 2003; Kılıç ve ark., 2004; Özgöz ve ark., 2007; Hemmat ve Adamchuk, 2008; Özgöz ve ark., 2009; Topakçı ve ark., 2010; Ozgoz ve ark., 2012; Naderi-Boldaji ve ark., 2012; Nagendra ve ark., 2018) tarafından yapılmıştır. Son yıllarda, toprak sıkışmasının belirlenmesi ve haritalanması için farklı tipte sensör sistemleri geliştirilmiştir (Şekil 7).

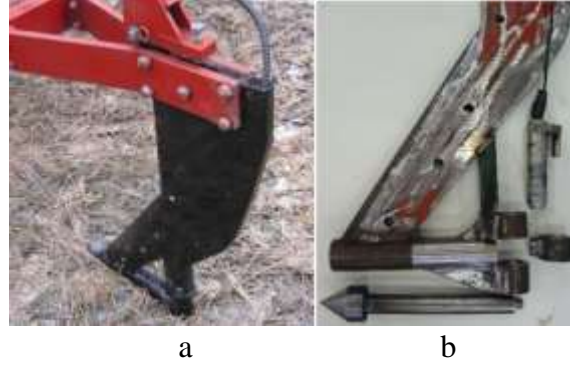


Şekil 7. Toprak sıkışıklığı ölçümü için geliştirilen sensör sistemlerinin sınıflandırılması (Nagendra ve ark., 2018).

Figure 7. Classification of soil compaction sensor systems (Nagendra et al., 2018).

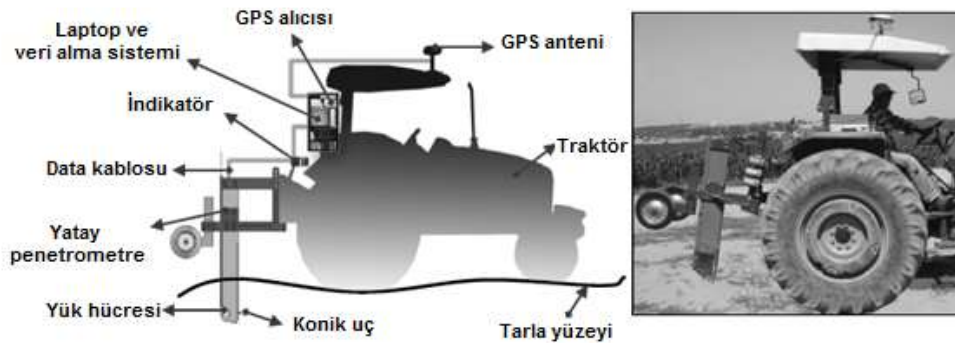
Sirjacobs ve ark. (2002) tarafından, toprak sıkışıklığı değişimlerini gerçek zamanlı olarak ölçebilen ve bir toprak işleme makinesine eklenebilme özelliğine sahip olan bir sensör geliştirilmiştir (Şekil 8). Araştırmacıların yaptıkları çalışmada bir DGPS alıcısına sahip traktör ile geliştirilen sensör 5 m aralıklarla çekilerek alanın toprak direnci haritası oluşturulmuştur. Ayrıca arazi şartlarında elde edilen sonuçların, sistemin hassas tarım için toprağın fiziksel durumunu gerçek zamanlı olarak karakterize etmeye izin veren faydalı bir inovasyon olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Bolenius ve ark. (2006) toprak sıkışması ile verim değerleri arasındaki korelasyonu incelemek için gerçek zamanlı ölçüm yapabilen yatay bir toprak penetrometresi geliştirmişlerdir. Penetrometrenin koni taban açısı 30° ve taban çapı 6.3 cm'dir. Çalışmada koniye etki eden -25 kN ile $+25$ kN arasındaki kuvvetleri kaydedebilen bir çeki sensörü kullanılmıştır. Yaklaşık 1.5 m/s hızda çalıştırılan penetrometre ile toprak penetrasyon direncinin üç farklı derinlikte (10, 30 ve 50 cm) her üç saniyede bir GPS ile konum kaydedilerek ölçülebildiği belirtilmiştir (Şekil 11).

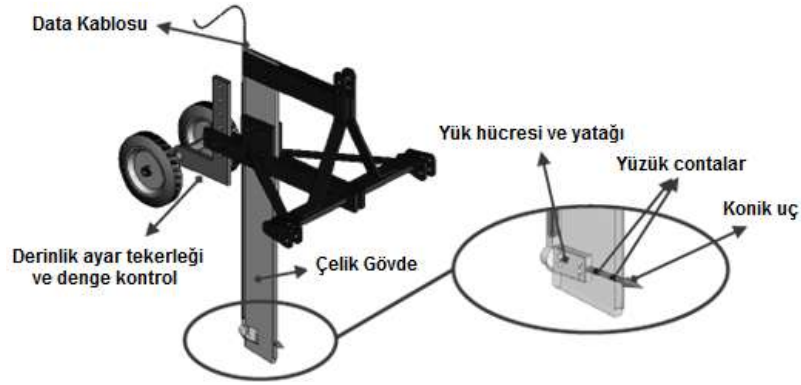


Şekil 11. Yatay penetrometre; (a) konik uç, (b) çeki sensörü (Bolenius ve ark., 2006)
Figure 11. (a) Soil-penetrating cone on horizontal penetrometer, (b) draught sensor (Bolenius et al., 2006).

Topakçı ve ark. (2010) yaptıkları bir çalışmada, 40 cm çalışma derinliğinde yatay doğrultudaki toprak penetrasyon direncinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesi ve haritalanması amacıyla traktör üç nokta askı sistemine takılabilen yatay penetrometre sistemi geliştirmişlerdir (Şekil 12 ve 13). Sistem 3 temel bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, traktör üç nokta askı sistemine takılabilen ve uç noktasında konik uç ve yük hücresi düzeneği bulunan mekanik donanımdır. İkinci bölüm, yük hücresi ve GPS alıcılarından elde edilen verileri gerçek zamanlı olarak toplayan veri alma sistemidir. Üçüncü bölüm ise elde edilen verileri analiz eden ve CBS yazılımlarına uygun dosya formatını üreten yazılım bölümüdür. Geliştirilen sistem ile 20 ha alanda penetrasyon direnci verisi toplanarak toprak sıkışıklığı haritasının üretildiği bildirilmiştir.



Şekil 12. Yatay penetrometre sisteminin yapısı (Topakçı ve ark., 2010).
Figure 12. Structure of the designed system (Topakçı et al., 2010).



Şekil 13. Mekanik sistemin tasarımı (Topakçı ve ark., 2010).
Figure 13. Design of the mechanical system (Topakçı et al., 2010).

Abbaspour-Gilandeh ve ark. (2010), toprağın mekanik direncini aynı anda üç derinlikte ölçerek haritalayabilen ve aynı zamanda sistemin sahadaki performansını değerlendirebilen bir penetrometre geliştirmişlerdir. Şekil 14' te gösterilen çoklu ayaklı ölçüm sistemi, tarlada hareket ederken 40 cm derinliğe kadar dört derinlikte toprak mekanik direncinin eşzamanlı olarak ölçülebilmektedir. Geliştirilen penetrometre aynı derinlik aralıklarında koni penetrometre ile de ölçüm yapılarak kalibre edildiğinde geliştirilen ölçüm sistemiyle elde edilen yatay toprak direnci verileri ile koni penetrasyon direnci verilerinin çok yakın değerler olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 14. Çoklu bıçaklı toprak mekanik direnç ölçüm sistemi (Abbaspour-Gilandeh ve ark., 2010).

Figure 14. Multiple blade soil mechanical resistance measurement system (Abbaspour-Gilandeh et al., 2010).

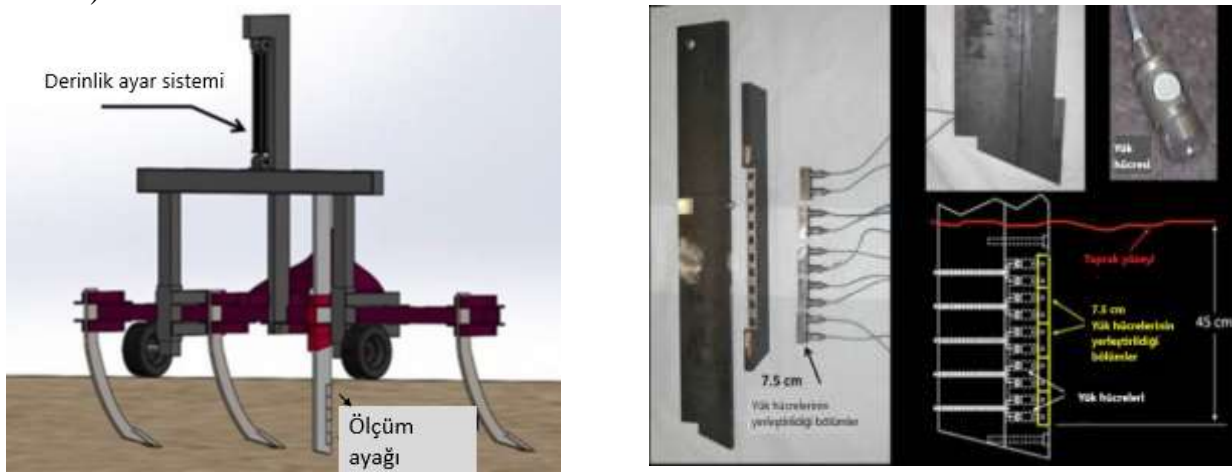
Naderi-Boldaji ve ark. (2012), traktörün üç nokta askı sistemine kolayca monte edilebilen ve ölçümler sırasında sensörün istenen çalışma derinliğini koruması için iki ayarlanabilir metal tekerlek ile desteklenen bir sistem geliştirmişlerdir (Şekil 15). Araştırmacılar yaptıkları çalışmada sensörün önceden belirlenmiş bir derinlikte (maksimum 400 mm) yatay olarak taşınması için 30 mm kalınlığında, 80 mm genişliğinde ve 750 mm uzunluğunda bir ayak kullanmışlardır.



Şekil 15. Traktöre monte edilmiş kombine yatay penetrometre (1: Ayak, 2: Kombine sensör ve 3: Yük hücresi muhafazası) (Naderi-Boldaji ve ark., 2012).

Figure 15. Tractor mounted combined horizontal penetrometer and (1: Tine, 2: Combined sensor and 3: Loadcell housing) (Naderi-Boldaji et al., 2012).

Fox (2018) 7.5 ile 45 cm aralığındaki toprak profilinin mekanik direncini belirlemek için 7.5 cm uzunluğunda, her birinde iki adet yük hücresi bulunan, 5 üniteden oluşan bir ayaklı penetrometre geliştirmiştir. Geliştirilen penetrometre bir dipkazana yerleştirilmiş ve gerçek zamanlı olarak elde edilen sıkışma değerine göre dip kazanın derinliği ayarlanmıştır (Şekil 16).



Şekil 16. Ölçüm ayağının tasarımı ve bileşenleri (Fox, 2018).

Figure 16. Design and components of the instrumented shank (Fox, 2018).

Tekin ve Yalçın (2019), sıkışmış toprak tabakasının derinliğini belirlemek için gerçek zamanlı olarak toprak direncini yatay ekseninde çoklu derinlikte ölçebilen bir sistem tasarlamışlardır. Sistem traktörün önüne bağlanmakta ve tekerlekler üzerinde taşınmaktadır. Geliştirilen sistem; ayak, traktöre bağlantı düzeni, şase ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17.(a) Traktör bağlantı sistemine sahip sensör,(b) Sensör bıçağı: sensör ayağı, algılama ucu, yük hücreleri ve kablolar.

Figure 17. (a) The sensor with a tractor attachment system, (b) Sensor blade: sensor tine, sensing tip, load cells, and cables.

5. Sonuç

Hassas tarım uygulamaları tarımda yeni bir teknolojik adım olarak hızlı bir gelişim trendi göstermektedir. Toprağın açık ve dinamik bir yapıda olmasından dolayı toprak sıkışıklığının zamanında ve doğru belirlenmesi zorlaşmaktadır. Üreticiler ve araştırmacılar tarafından potansiyel uygulamaları artırmak için çeşitli toprak koşullarında daha fazla veriye ihtiyaç vardır. Toprak sıkışıklığı çalışmalarında derinlik ile ilişkilendirilmiş sıkışıklık değerlerinin belirlenerek haritaların oluşturulması için fazla sayıda ölçüm yapılması ve verilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi gereklidir. Toprak sıkışmasının ölçümünde kullanılan statik koni penetrometrelerle çok sayıda veri almak ve haritalama yapmak zordur. Ölçümdeki zorluğu ortadan kaldırmak için traktöre bağlanan ve hidrolik olarak hareketlendirilen penetrometreler kullanılmaktadır. Statik metotların yerini ise gerçek zamanlı ölçümlerin yapıldığı sistemler almaktadır. Tarımsal arazilerde ölçümlerin; uydu teknolojileri, elektronik ölçüm ve kontrol sistemleri ve bilgisayar yazılımları gibi teknolojiler kullanılarak yapılmasıyla hassas tarım teknolojilerine uygun, doğru ve işlevsel veriler alınmaktadır. Toprak ve su kaynaklarını koruyarak sürdürülebilir tarımsal üretim için doğru toprak işlemeye karar vermede etkili olan toprak penetrasyon direncinin hızlı, kolay ve güvenilir bir şekilde elde edilmesi için geliştirilen sistemlerin hassas tarım uygulamaları ile birlikte etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir.

6. Kaynaklar

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Rahimi-Ajdadi, F., Shaygani, A., Ahani, M., Jalilnejhad, H., 2010. Soil strength sensing for quantifying within-field variability with a multiple blades system. First international conference of soil and roots engineering relationship-(LANDCON1005), 24-26 May 2010, Ardebil, Iran.
- ASAE, 2000. ASAE Standards S313.3, Soil cone penetrometer. St. Joseph, Michagen, USA.
- Bolenius, E., Rogstrand, G., Arvidsson, J., Stenberg, B., Thylen, I., 2006. On the go measurements of soil penetration resistance on a swedish Eutric Cambisol. In Proceedings of International Soil Tillage Research Organization 17th Triennial Conference, August 28–September 2, 2006; pp. 867-870, Kiel, Germany.
- Boone, F.R., 1988. Wheather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. Soil and Tillage Research, 11: 283-324.
- Boon, N.E., Yahya, A., Kheiralla, A.F., Wee, B.S., Gew, S.K., 2005. A tractor-mounted, automated soil penetrometer–shearometer unit for mapping soil mechanical properties. Biosystems Engineering, 90 (4): 381–396.
- Busscher, W.J., Frederick, J.R., Bauer, P.J., 2001. Effect of penetration resistance and timing of rain on grain yield of narrow-row corn in a coastal plain loamy sand. Soil Tillage and Research, 63: 15-24.

- Carrara, M., Castrignanò, A., Comparetti, A., Febo, P., Orlando, S., 2007. Mapping of penetrometre resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. *Geoderma*, 142: 294– 307.
- Chung, S.O., Sudduth, K.A., Plouffe, C., Kitchen, N.R., 2004. Evaluation of an on-the go soil strength profile sensor using soil bin and field data. ASAE/CSAE meeting presentation No. 041039.
- Çakır, E., Gülsoylu, E., Keçecioğlu, G., 2004. Farklı toprak koşullarında koni indeksi, nem ve hacim ağırlığı arasındaki ilişkilerin belirlenmesi üzerine bir araştırma, E.Ü. Bilimsel Araştırma Projesi (2001/ZRF/013) Kesin sonuç Raporu, 27 s. Bornova, İzmir.
- Çarman, K., 2002. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil and Tillage Research*, 65: 37–43.
- Fox, J., 2018. Real-Time, variable-depth tillage for managing soil compaction in cotton production. All Theses, Plant and Environmental Science, Clemson University, USA.
- Fulton, J.P., Wells, L.G., Shearer, S.A., Barnhisel, R.I., 2000. Spatial variation of soil physical properties. A Precursor to Precision Tillage. <http://www.bae.uky.edu/~shearer/PrecisionTillage.htm>.
- Gajri, P.R., Arora, V.K., Prihar, S.S., 2002. Tillage for sustainable cropping. Food Products Press, NY 13904-1580.
- Gülsoylu, E., Çakır, E., 2005. Traktöre bağlanabilen hidrolik toprak penetrometresi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 42(2): 87-95.
- Günel, H., Korucu, T., Birkas, M., Özgöz, E., Halbac-Cotoara-Zamfir, R., 2015. Threats to sustainability of soil functions in Central and Southeast Europe. *Sustainability*, 7(2): 2161-2188.
- Güneş, A., Alpaslan, M., İnal, A., 2013. Bitki besleme ve gübreleme. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:1581, Ders Kitabı No:533, Ankara.
- Hakansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53:71-85.
- Hao, X., Chang, C., Larney, F.J., Nitschelm, J., Regitnig, P., 2000. Effect of minimum tillage and crop sequence on physical properties of irrigated soil in southern Alberta. *Soil and Tillage Research*, 57: 53-60.
- Hemmat, A., Adamchuk, V.I., 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: review and analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63: 89-103.
- Khan, T.O., 2014. Soil degradation, Conservation and Remediation. Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp. 237.
- Kılıç, K., Özgöz, E., Akbaş, F., 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76: 1-11.
- Kirişçi, V., 1999. Pulluk tabanı ve dipkazan kullanımı. *Cine Tarım Dergisi*, 17: 18-20.
- Markinos, A., Gemtos, T., Kavalaris, C., Karamoutis, C., 2005. Soil resistance to ploughing spatial variability and their effects to cotton seed yield maps. International Congress on Information Technology in Agriculture, Food and Environment ITAFE 2005, Adana Turkey.
- Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Hemmat, A., Afyuni, M., 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 55: 87-97.
- Munsuz, N., Ünver, I., 1982. Toprak mekaniği ve teknolojisi uygulama kılavuzu, 1. Bölüm; A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Dolatsha, N., Keller, T., 2012. Improvement and field testing of a combined horizontal penetrometer for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 123: 1–10.
- Nagendra, K., Survanshi, A., Maruti, 2018. Studies on sensors for measuring soil compaction for effective crop production-A review and analysis. *International Journal of Research in Agricultural Sciences*, 5(1): 2348 – 3997.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G., 1991. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. United Nations Environment Programme and ISRIC—World Soil Information: Wageningen, The Netherlands.
- Özgöz, E., Akbaş, F., Çetin, M., Erşahin, S., Günel, H., 2007. Spatial Variability of soil physical properties as affected by different tillage systems. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 35: 1-13.
- Özgöz, E., Akbaş, F., Günel, H., Erşahin, S., Çetin, M., 2009. Long term conventional tillage effect on spatial variability of some soil physical properties. *Journal of Sustainable Agriculture*, 33:142-160.
- Özgöz, E., Önen, H., Günel, H., 2010. Geçit iklim kuşağında ikinci ürün mısır tarımında gerekli termal zamanın uzatılmasını sağlamaya yönelik olarak farklı toprak işleme yöntemlerinin karşılaştırılması. TÜBİTAK, TOVAG (107O124) Proje Sonuç Raporu. Tokat.
- Ozgoz, E., Günel, H., Önen, H., Bayram, M., Acir, N., 2012. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties. *Journal of Agricultural Sciences*, 18: 77-91.
- Özgöz, E., Günel, H., Bayram, M., 2015. Toprak işleme. Ed: S. Erşahin, T. Öztaş, A. Namlı, G. Karahan. Toprak amenajmanı, Gazi Kitabevi, s. 533-568, Ankara, ISBN:978-605-344-278-3.

- Özgülven, M.M., Türker, U., 2010. Application of precision farming in Turkey, comparative analysis of wheat, cotton and corn production. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 6 (2): 127-135.
- Özgülven, M.M., 2018a. Hassas tarım. Akfon Yayınları, Ankara. ISBN: 978-605-68762-4-0.
- Ozguven, M.M., 2018b. The newest agricultural technologies. *Current Investigations in Agriculture and Current Research*. 5(1): 573-580.
- Özgülven, M.M., 2019. Tarım robotlarının sürdürülebilir tarıma katkıları. 3. Uluslararası UNİDOKAP Karadeniz Sempozyumu. 21-23 Haziran 2019, Sempozyum Kitabı, s. 354-367, ISBN: 978-605-80568-1-7, Tokat.
- Özgülven, M.M., Altaş, Z., Uygun, T., Terzi, İ., 2019. Sürdürülebilir tarım için hassas tarım uygulamalarının önemi. 3. Uluslararası UNİDOKAP Karadeniz Sempozyumu, 21-23 Haziran 2019, Sempozyum Kitabı, S.187-203, ISBN: 978-605-80568-1-7, Tokat.
- Özgülven, M.M., Türker, U., Akdemir, B., Çolak, A., Acar, A.İ., Öztürk, R., Eminoğlu, M.B., 2020. Tarımda dijital çağ. Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi. Ocak 2020, Bildiriler Kitabı-1, s. 55-78, Ankara.
- Perumpral, J.V., 1987. Cone penetrometer applications: A review. *Transaction of The ASAE*, 30(4): 939-944.
- Rahimi-Ajdadi, F., Abbaspour-Gilandeh, Y., 2017. A review on the soil compaction measurement systems.1. International and 5. National Conference on Organic vs. Conventional Agriculture,16-17 Ağustos 2017, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- Raper, R.L., Washington, B.H., Jarrell, J.D., 1999. A tractor-mounted multiple-probe soil cone penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture*, 15(4): 287-290.
- Raper, R.L., Reeves, D.W., Schwab, E.B., Burmester, C.H., 2000. Reducing soil compaction of Tennessee Valley soils in conservation tillage systems. *The Journal of Cotton Science*, 4: 84-90.
- Schafer, R.L., Johnson, C.E., 1982. Changing soil condition. In D.M. Kral (ed), *Predicting tillage effect on soil physical properties and processes*. ASA Special Publication, No. 44, pp 13-27.
- Sirjacobs, D., Hanquet, B., Lebeau, B., Destain, M.F., 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil and Tillage Research*, 64: 231-242.
- SSSA, 1987. Glossary of soil science terms. Madison,WI: Soil Science Society of America
- Tekin, Y., Okursoy, R., 2003. Hidrolik tahrikli bir toprak penetrometresi için geliştirilen mekanik sistem tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(1): 119-126.
- Tekin, A.B., Yalçın, H., 2019. Design and development of a front mounted on-the-go soil strength profile sensor. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43: 151-163.
- Topakçı, M., Ünal, İ., Çanakçı, M., Çelik, H., K., Karayel, D., 2010. Design of a horizontal penetrometer for measuring on-the-go soil resistance. *Sensors*, 10: 9337-9348.
- Ünver, İ., 2014. Toprakta sorunların giderilmesi. Editörler: İ. Ünver ve D. Anaç, *Toprak bilgisi ve bitki besleme*. Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 2302, Eskişehir.
- Vatandaş, M., Güner, M. ve Türker, U., 2005. Hassas tarım teknolojileri. Ziraat Mühendisleri Odası. Ankara.
- Vizitiu, O., Czyz, E., Dexter, A., 2010. Soil physical quality-theory and applications for arable soils. SITECH, pp. 168, ISBN: 978-606-11-0844-2, Craiova, Poland.