

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**TABANTAŞI DERİNLİĞİNİ BELİRLEMEK ÜZERE  
HAREKETLİ (ON-THE-GO) SENSÖR TASARIMI**

**Nasim SEDAGHAT HERFEH**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Harun YALÇIN**

**Tarım Makinaları Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu: 501.08.00**

**Sunuş Tarihi: 10.10.2012**

**Bornova-İZMİR**

**2012**



Nasim SEDAGHAT HERFEH tarafından Yüksek lisans tezi olarak sunulan “Tabantaşı Derinliğini Belirlemek Üzere Hareketli (on-the-go) Sensör Tasarımı” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 10.10.2012 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

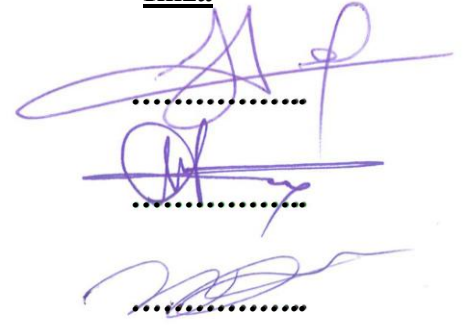
**Jüri Üyeleri:**

**Jüri Başkanı : Doç. Dr. Harun YALÇIN**

**Raportör Üye : Prof.Dr. Erdem AYKAS**

**Üye : Prof. Dr. Hakan BOYACI**

**İmza**





**ÖZET****TABANTAŞI DERİNLİĞİNİ BELİRLEMEK ÜZERE  
HAREKETLİ (ON-THE-GO) SENSÖR TASARIMI**

SEDAGHAT HERFEH, Nasim

Yüksek Lisans Tezi, Tarım Makinaları Bölümü

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Harun YALÇIN

Ekim 2012, 55 sayfa

Toprak sıkışması bitki köklerinin toprak işleme derinliğinden daha derine nüfuzunu engelleyip verimin düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca su infiltrasyonunun düşmesi ile, bitkiler daha duyarlı hale gelmektedir. Toprağın sıkışmasını önlemek amacıyla toprak işleme derinliğinin ayarlanması çok masraflı bir işlem olduğu tahmin edilebilir. Değişken derinlikte ve ya alana özel toprak işleme derinliği teknolojisi sadece gerekli derinlikte toprağın işlenmesi ihtiyacı duyulduğunda, toprağın fiziksel özelliklerinin optimize edilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, farklı toprak derinliklerinde, toprağın direncine bağlı olarak sıkışık tabakanın derinliğini tesbit edip, işleme derinliğinin belirlenmesi için bir teknolojinin geliştirilmesine gerek duyulur. El penetrometresi ve kesikli (stop-and-go) ölçüm sistemleri, masraflı ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, bazı araştırmacılar tarafından sürekli (on-the-go) ölçüm yöntemi incelenmiştir. Bu çalışmada, toprağın mekanik direncini toprağın 15-45 cm derinlik aralığında, toprakta hareket ederek sürekli ölçüm yapan, 8 tane yük hücresi taşıyan bir ana gövde tasarlanmıştır. Bu sistem, problemler arası boşluk bırakılmadan 4'er cm aralıklarla ölçüm yapmaktadır. Tasarım parametrelerini optimize etmek amacıyla, simülasyonda kullanılan modelde boyutlar ve algılama elemanlarının koordinatı ve aralarındaki boşluğun minimize edilmesi göz önüne alınmıştır. Bu optimizasyon esas alınarak 11.94 cm<sup>2</sup> kesit alanı ve 60° kesim açısı özelliklerini taşıyan bir prizmatik prob tipi seçilmiştir. Ayrıca, topraktan gelen maksimum direnç 10 kN olarak ön görülmektedir.

**Anahtar sözcükler:** Penetrometre, sensör, toprak direnci, toprak sıkışması.



**ABSTRACT****DESIGNING AN (ON-THE-GO) SOIL STRENGTH SENSOR TO  
DETERMINE THE HARD PAN DEPTH**

SEDAGHAT HERFEH, Nasim

MSc in Agricultural Machinery

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Harun YALÇIN

October 2012, 55 pages

Soil compaction limits root penetration below the plowing depth, reduces yields and makes plants more susceptible to drought stress. Applying uniform depth tillage over the entire field to manage the soil compaction may be either too shallow or too deep and it can be costly. Variable-depth or site-specific tillage technology optimizes soil physical properties only where the tillage is needed by applying tillage at the required depth.

Therefore, there is a need for a technology to determine the tillage depth based on soil mechanical strength at different depths of soil. Since soil cone penetrometers require a stop-and-go operation that can be time-consuming and costly, on-the-go measurement methods of soil mechanical strength have been investigated by some researchers. A measuring system with simple instrumented shanks was designed and built to measure mechanical resistance of soil at different depths over the entire top 45 cm of the soil profile while moving through the soil. This system allows probes for the simultaneous measurement of soil mechanical resistance at six depths.

The models were used in simulation to optimize design parameters of the sensor, including component dimensions and the location and spacing of sensing elements. Based on this optimization, a prismatic sensing tip with a 11.94 cm<sup>2</sup> base area and a 60° cutting angle was selected, and the corresponding simulated maximum force and strength measurements were 10 kN.

**Keywords:** Cone penetrometer, sensor, soil strength, soil compaction.





## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının belirlenmesi, yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında değerli katkılarıyla bana yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Harun YALÇIN'a, farklı görüş ve katkılarıyla çalışmamı yönlendiren sayın Dr. Arif Behiç TEKİN'e, verdikleri maddi destek nedeniyle Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Şube Müdürlüğü'ne, isimlerini yazamadığım, her zaman destek ve katkılarını yanımda hissettiğim arkadaşlarıma ve çok sevdiğim aileme, bana gösterdikleri sabır, anlayış ve hoşgörü için teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
TEŞEKKÜR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xix
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Hassas Tarım .....	1
1.2 Toprak Sıkışıklığı .....	2
1.2.1 Toprak sıkışıklığı nedenleri, göstergeler ve etkileri .....	2
1.2.2 Toprak sıkışıklığı ile mücadele.....	8
1.3 Sıkışıklık İle İlgili Toprak Özellikleri .....	8
1.3.1 Toprak nem içeriği.....	9
1.3.2 Toprak porozitesi .....	10
1.3.3 Toprak hacim ağırlığı .....	11
1.3.4 Toprak tekstürü.....	13
1.3.5 Toprak direnci.....	14

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
1.4 Toprak Sıkışıklığı Ölçüm Sistemler.....	15
1.4.1 Temassız yöntemler .....	15
1.4.2 Temaslı yöntemler.....	17
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	29
3.1 Materyal .....	29
3.1.1 Yük hücresi (loadcell).....	29
3.1.2 Yük hücresi seçimi.....	32
3.1.3 Solid Works paket programı .....	33
3.1.4 PLC sistemi.....	38
3.2 Yöntem.....	39
3.2.1 İmalat .....	39
3.2.2 Montaj.....	39
3.2.3 Kalibrasyon .....	40
4. SONUÇ .....	46
5. TARTIŞMA .....	47

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	55
EKLER .....	
EK 1. Ana gövdenin, Solid Works paket programında, gerilim, uzama ve deformasyon analizi sonuçları.....	



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Tarıma uygun alanda hassas tarım döngüsü (Anonim, 2003) .....	2
1.2.a. Traktör tekerleklerinin sebep olduğu toprak sıkışıklığı ve sıkışık katmanlar .....	3
1.2.b. Toprak sıkışıklığı sonucunda zayıf su infiltrasyonuna sahip düz bir arazi üzerindeki su birikintileri .....	3
1.3. Toprak sıkışıklığı sonucunda bitkinin düzgün olmayan gelişimi.....	4
1.4.a. Kısa-uzun boylu bitki desenleri toprak sıkışıklığını göstermektedir.....	4
1.4.b. Toprak sıkışıklığı nedeniyle ortaya çıkan nitrojen ve su eksiklikleri sonucunda bitki renginin değişimi.....	4
1.5. Toprak sıkışıklığının olduğu seviyenin üstünde kök gelişimi.....	5
1.6. Kazık köklü pamuklarda toprak penetrasyon direncinin etkisi (Taylor et al., 1966) .....	7
1.7. Bitki tepkisi ve toprak sıkışıklığı arasındaki ilişkinin göstermiş olduğu toprak, bitki ve iklim etkileşimi (Soane1985) .....	7
1.8. Üç yıllık bir dönemde üç farklı iklim koşulunda sıkışıklık, ürün verimi ve iklimin kavramsal temsilleri .....	7
1.9. Kuru yoğunlukta yapılan traktör geçişleri için toprak nem içeriğinin etkisi (Raghavan et al., 1977) .....	9
1.10. Gözenekler üzerinde toprak sıkışıklığının etkisi .....	10

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.11.a. Kaba yem mısır üretiminde toprak yoğunluğunun verime etkisi, a. killi toprak (McKyes et al., 1979) .....	12
1.11.b. Kaba yem mısır üretiminde verime toprak yoğunluğunun etkisi, b. kumlu balçık toprakta, (Negi et al., 1981) .....	12
1.12. Penetrasyon direncine toprak hacim ağırlığı ve nem içeriğinin etkisi (Taylor et al., 1981) .....	13
1.13. Sıkışabilirliğe toprak yapısının etkisi .....	14
1.14. Toprak kuvvetini oluşturan toprak partikülleri, Kohezyon (a) ve sürtünme (b) (Godwin 2003b).....	15
1.15. Elektromanyetik indüksiyon (EMI) çalışması-EMI 38 (Waine 1999 ve Godwin 2003a).....	16
1.16. Tarla girişleri arasında meydana gelen tarla trafiğinin oluşturduğu toprak sıkışıklığının elektromanyetik indüksiyon (EMI) çalışması ile belirlenmesi çalışması (a) ve dipkazan uygulaması sonrası sıkışıklığın giderilmesi (b) (Smith 2001 in Godwin ve Miller 2003) ....	17
1.17. El ile çalıştırılan toprak konik penetrometresi (ASAE 2003).....	18
1.18. Ölçüm ekipmanı ve ekipmanın monte edildiği ayak (Vorschoore et al., 2003) .....	20
1.19. Toprak mekanik direnci ölçüm sistemi (Sirjacobs et al., 2002) .....	20



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.20. Uzatılmış sekizgen halka dönüştürücüleri ve üstte algılayıcı sensör (Richards 2000) .....	21
1.21. Traktörün geçtiği sıralar üzerinde dipkazan güç ölçümlerindeki toprak sıkışmasından dolayı meydana gelen artış (yüksek güç alanları) (Richards 2000) .....	21
1.22. Bir toprak kabının içinde taban taşının üstünde ve altında, farklı derinliklerdeki konik ekipman (Tekeste et al., 2002).....	22
1.23. Toprak mekanik empedansı ölçüm sistemi, dikey bir bıçağın arkasına yerleştirilmiş 4 adet yük telleri (hücreleri) (Adamchuck et al., 2001) ...	24
2.1. EC, nem, penetrasyon haritaları (Zeng ve ark., 2008).....	28
3.1. Strain gauge (Uzama Telleri) .....	30
3.2. Wheatstone köprüsü .....	30
3.3. Yük hücresi (Load Cell) .....	31
3.4 (a). Seçilen yük hücresi .....	33
3.4 (b). Seçilen yük hücresi .....	33
3.5. Ana gövde (bıçak) .....	34
3.6 (a). Gerilme nalizi .....	35
3.6 (b). Uzama analizi .....	36

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.6 (c). Deformasyon analizi .....	3
3.7. Algılayıcı uç.....	37
3.8.a. PLC sistemi veri ekranı.....	38
3.8.b. PLC sistemi.....	38
3.9. Ana gövde imalattan sonra .....	39
3.10. Sensör, proplar, yük hücreleri sırası ve veri aktarım telleri.....	40
3.11. Kalibrasyon için sensörün yüklenmesi .....	41
3.12. Birinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	42
3.13. İkinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	42
3.14. Üçüncü yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	43
3.15. Dördüncü yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	43
3.16. Beşinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	44
3.17. Altıncı yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	44
3.18. Yedinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi.....	45
3.19. Sekizinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi .....	45
4.1. Değişken derinlikte toprak işleme sisteminin simülasyonu.....	46
4.2. Değişken derinlikte toprak işleme sisteminin şeması .....	46

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Değişik toprak sıkışıklığına ait toprak ve ürün göstergeleri.....	5
3.1. Yük hücresi teknik bilgileri .....	33
3.2. Kalibrasyon verileri .....	41



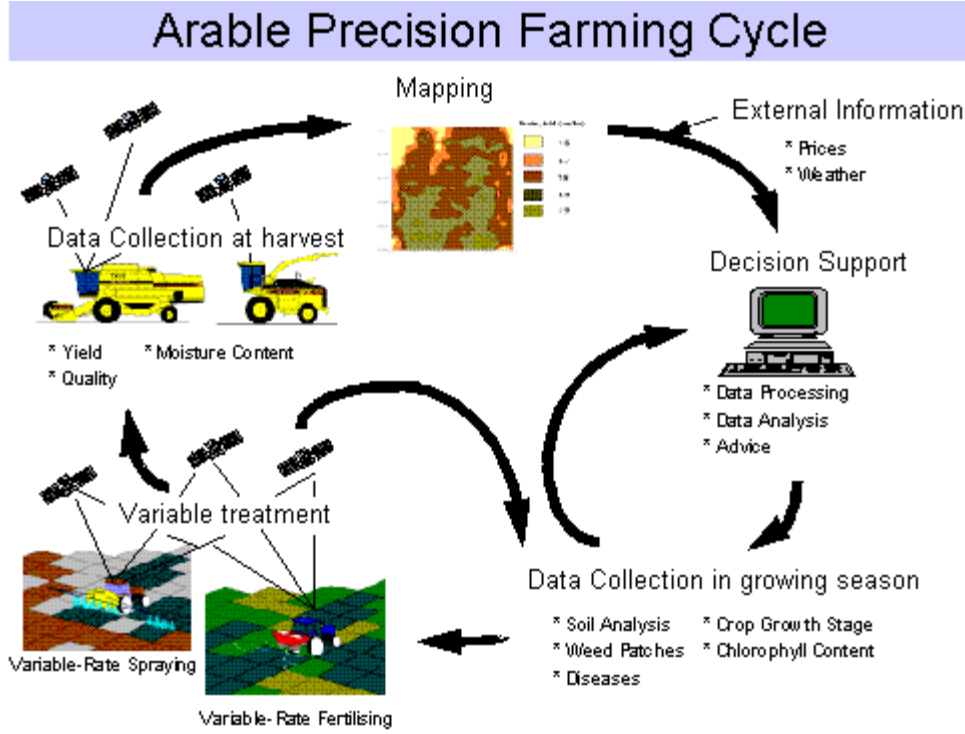
## 1. GİRİŞ

Bitki gelişimini özellikle kök gelişimini etkileyen toprak parametrelerinden biri toprak sıklığıdır. Bu nedenle sıklığın bulunduğu katmanları tespit eden basit fakat etkili metodların araştırılması gerekmektedir. Ürüne özgü yapılan toprak yönetimi uygulamalarında toprak sıklığının araştırılması günümüzde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu projenin amacı traktör alet ve makineye bağlanabilir penetasyon direncine bağlı olarak taban derinliğini tespit eden özgün bir cihazın araştırılmasına yöneliktir. Hassas tarım uygulamalarından Alana özgü uygulamalı tarım enerji kaynaklarının daha doğru kullanımı amacıyla günümüzde gündemde olan ve üzerinde önemli çalışmalar yapılan konulardandır. Buna yönelik yeni gelişen toprak işleme sistemi, değişik derinlikte toprak işleme “variable depth tillage” aslında gereken derinlikte toprağı işleme, gereksiz güç ve enerji tüketimini önleyerek bu araştırmanın bir sonraki adımında amaçladığı konudur.

### 1.1 Hassas Tarım

Earl et al. (1996) tarım işlemlerinin daha verimli hale gelmesinde hassas tarımda yeni teknolojilerin kullanılması etkili bir factor olarak ortaya koymuştur. Ürün verimini etkileyen bu değişkenler toprak tekstürü ve yapısı, mevcut su durumu, topografya ve mikro-klima, topraktaki besinler, pH, yabancı otlar, haşereler ve hastalıklar olarak örnek verilebilir. Verimin artırılması işletme için hem ekonomik anlamda hem de çevresel faktörler anlamında yararlı olmaktadır. Hassas tarım olarak bilinen alana özgü uygulamalar, tarımsal ürünlerin yetiştirildikleri alana ait değişkenlerin dikkate alındığı ve ilgili girdilerin optimize edilmeleri ile yetiştirilmelerini sağlayan metodlardır. Bu metodlar herhangi bir ülkedeki herhangi bir ürüne uygulanabilmektedir (Blackmore, 2003). Şekil 1.1’de hassas tarımın bir döngü şeklinde ifade edildiği farklı değişken aralıklarına sahip bir alana adapte edilişi görülmektedir. Şekildeki döngüde görüldüğü gibi hassas tarımın uygulamasında beş temel evre bulunmaktadır. Bu temel evreler içinde topraktan veri toplanması, ürünün yetiştirilmesi, yabancı otlar, ürün gelişme periyodunda meydana gelen hastalıklar, ürün gelişme periyodunda yapılan farklı uygulamalar (ilaçlama ve gübreleme), üründen veri alınması, hasat sırasında ürün

nemi, toplanan tüm verilerden bir harita oluşturmak, elde edilen verilerin işlenmesi ve analizi sonucunda bir karar verme mekanizmasını ortaya çıkarmak gibi işlemler bulunmaktadır.



Şekil 1.1. Tarıma uygun alanda hassas tarım döngüsü (Anonim, 2003).

## 1.2 Toprak Sıkışıklığı

### 1.2.1 Toprak sıkışıklığı nedenleri, göstergeleri ve etkileri

Tarım makinalarının toprak üstünde yapmış oldukları baskı nedeniyle toprak partikülleri birbirlerine doğru hareket ettiklerinde toprak sıkışması meydana gelmektedir. Toprak katmanlarının sıkışmasına sebep olan temel uygulamaların başında alanda traktör kullanımı gelmektedir. Toprak sıkışıklığı neredeyse her katmanda görülebilmektedir (Şekil 1.2, a) ve ürün verimini belirgin şekilde azaltabilmektedir (Taylor et al., 1966, McKyes et al., 1979, Negi et al., 1981, Soane and Van Ouwerkerk 1994). Jones et al. (2001), toprak ve bitkinin veya yukarıda bahsedilen toprak özelliklerinin incelenmesi ile toprak sıkışıklığının tanımlanmasının mümkün olduğunu açıklamıştır.

Şekil 1.2.b'de toprağın incelenmesinden anlaşılacağı gibi daha önce yapılmış olan tarımsal çalışma sırasında toprak üstünde kalmış olan traktöre ait lastik izlerinin bahar aylarının başında siyah bir yapıya dönüştüğü görülebilmektedir. Bunun nedeni sıkışan katmanların üzerinde uzun süre kalan nem olabilmektedir. Özellikle tesviyenin düzgün olduğu arazilerin üzerinde kalan su birikintileri su infiltrasyonunun azalmasına sebep olan toprak sıkışıklığını gösteren bir diğer işarettir.



**Şekil 1.2 a:** Traktör tekerleklerinin sebep olduğu toprak sıkışıklığı ve sıkışık katmanlar,  
**b:** Toprak sıkışıklığı sonucunda zayıf su infiltrasyonuna sahip düz bir arazi üzerindeki su birikintileri.

Bitkinin filizlendiği (çimlendiği) dönemde toprak sıkışıklığına ait ilk belirtiler görülebilmektedir. Gelişen kök sıkışmış olan katmanın içinden geçemediği durumlarda yataya doğru katman üzerinde bir çatlak bulana kadar ilerlemektedir, bunun sonucunda bitkide duruş bozukluğu görülebilmektedir (Şekil 1.3).



**Şekil 1.3.** Toprak sıkışıklığı sonucunda düzgün olmayan bitki gelişimi.

Daha önceki hasat döneminden kalan sıkışıklık (hasat makinaları sonucu ortaya çıkan) bitki boylarını etkilemektedir. Bu durumdan sıra bitkileri ve küçük tahıllar etkilenirken, aynı zamanda kısa-uzun bitki desenleri görülebilmektedir.



**Şekil 1.4 a:** Kısa-uzun boylu bitki desenleri toprak sıkışıklığını göstermektedir,  
**b:** Toprak sıkışıklığı nedeniyle ortaya çıkan nitrojen ve su eksiklikleri sonucunda bitki renginin değişimi.

**Bitki rengi:** Toprak sıkışıklığı olan bir alanda gelişen bitkilerde yetiştirme periyodunda sararmalar görülmektedir. Bu sararmaların nedeni toprak sıkışıklığı sonucunda ortaya çıkan nitrojen ve su eksikliğidir (Şekil 1.4,b).

**Kök gelişimi:** Kök gelişiminin incelenmesi ile de toprak sıkışıklığı tespit edilebilir. Toprak sıkışıklığının özellikle yüzeyden 150-200 mm aşağıda olduğu durumlarda kök gelişimi engellenebilmektedir. Kökler sıkışmanın olduğu yüzeye paralel gelişim gösterebilmektedirler (Şekil 1.5). Raghavan et al. (1990) toprak sıkışıklığının kök gelişimine gösterdiği mekanik direncin artması kök



penetrasyonunun derinliğini sınırlarken ortalama kök yoğunluğunda azaltarak kök gelişimini yavaşlattığını ortaya koymuşlardır. Kök gelişiminin sınırlanması sonucunda ortaya çıkan en temel etkinin bitkinin yeterli su ve besini alamaması olduğunu belirlemişlerdir.



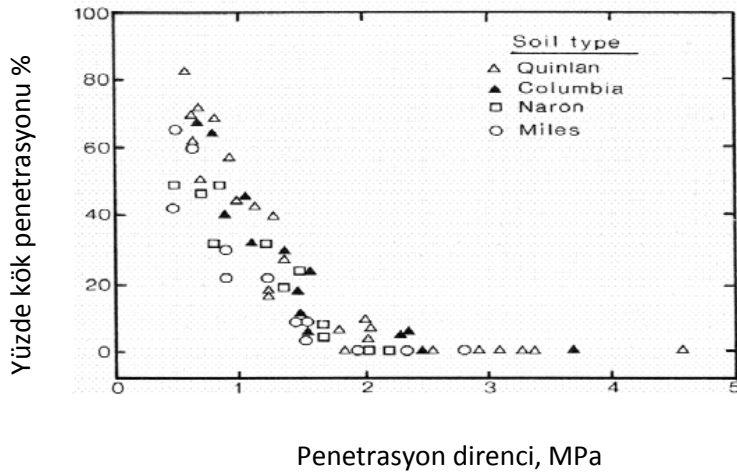
**Şekil 1.5.** Toprak sıkışıklığının olduğu seviyenin üstünde kök gelişimi.

McBride et al. (2003) toprak işleme ve tarla trafiği sonucunda ortaya çıkabilecek sıkışıklığa ait semptomları açıklamıştır. Bu durum tablo 1.1’de sınıflandırılmış olarak açıklanmıştır.

**Çizelge 1.1** Değişik toprak sıkışıklığına ait toprak ve ürün göstergeleri.

Sıkışma tipi	Toprak Göstergeleri	Ürün Göstergeleri
Tarla trafiği ile		
Toprak yüzeyi agregatlarının bozulması	Yüzey su birikintisi erteleme veya azalma	Tohumun çimlenmesi Ekmek kırıntısı formunun oluşması
Porozitenin azalması	Daha düşük toprak sıcaklığı	Bitki duruş bozukluğu
Tava formasyonu	Yüzey akışı artması Toprakta depolanan suyun azalması	Besin yoksunluğu Bitki su stresi
Toprak işleme ile		
Toprak porozitesinin azalması	Çeki ve yakıt sarfiyatında artış Kök penetrasyonunda direnç artışı Zayıf toprak havalanması ve zayıf infiltrasyon	Sığ kök sistemi Kuraklık stresi Besin yoksunluğu Düşük ürün verimi

**Ürün verimi:** Ürün verimine toprak sıkışıklığının etkisini belirlemek üzere bir çok araştırmacı deneme yapmıştır. Taylor et al. (1966) farklı topraklarda yetişen kazık köklü pamukların 25 mm derinliğe penetre etmeleri sonucunda yüzde gelişimleri ve toprak kuvveti arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Toprak sıkışıklığını toprak direnci ve kök direnci arasındaki ilişki ile karakterize etmişlerdir, eğrisel bir ters ilişki ortaya koymuşlardır. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere, toprak direnci 0,5 Mpa olduğu koşulda kazık köklerinin %6'sı penetre edebilmiştir fakat bu değer 1 MPa olduğunda penetrasyon ortalaması %35 değerinde azalmıştır, değer 2,5 Mpa olduğunda ise tamamen sonlanmıştır. Bunun sonucunda penetrasyon direnci 2,5 Mpa değerine geldiğinde toprak içine penetre eden köklerin sayısında büyük oranda bir azalma meydana gelmektedir. Bu değer üzerinde toprak penetrasyon direncinde hiç bir kök gelişmemektedir.

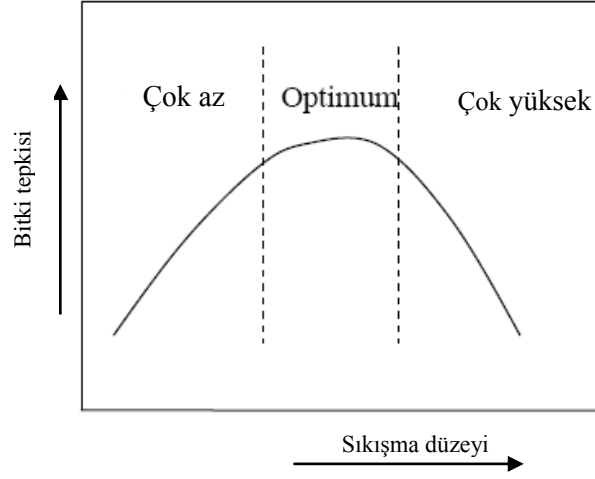


**Şekil 1.6.** Kazık köklü pamuklarda toprak penetrasyon direncinin etkisi (Taylor et al., 1966).

Soane et al. (1982) ve Soane (1985) araştırması sonucunda şekil 1.7'de görüldüğü gibi ürün gelişiminin ve veriminin belirli bir seviyedeki toprak sıkışıklığına optimum bir tepki verdiklerini ortaya koymuştur. Bu optimum alanın yerinin ise toprak tipi, ürün gelişim aşamaları ve iklimsel değerlerin birbirleri arasındaki karışık etkileşime bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

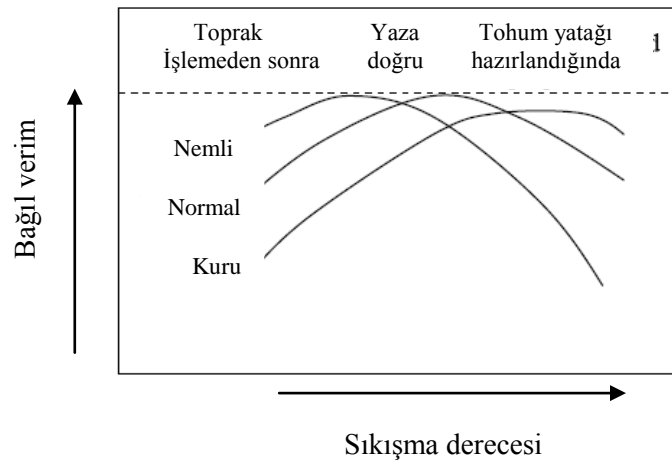
Nemli ← İklim → Kuru

İnce ← Toprak → İri



**Şekil 1.7.** Bitki tepkisi ve toprak sıkışıklığı arasındaki ilişkinin göstermiş olduğu toprak, bitki ve iklim etkileşimi (Soane, 1985).

Erikson et al. (1974)'da toprak sıkışıklığı ve ürün verimi arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Araştırmalarının sonunda sıkışıklık, verim ve iklim ilişkileri arasındaki etkileri şekil 1.8'de görmekteyiz. Belirli bir sıkışıklık aralığında en yüksek verime ulaşmanın iklim koşullarına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Raghavan et al. (1979) yaptıkları iki yıllık araştırmada farklı toprak sıkışıklığı değerlerinde mısır yetiştirmişler ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır.



**Şekil 1.8.** Üç yıllık bir dönemde üç farklı iklim koşulunda sıkışıklık, ürün verimi ve iklimin kavramsal temsilleri.

### **1.2.2 Toprak sıkışıklığı ile mücadele**

Toprak sıkışıklığı ile yapılabilecek en iyi mücadele, oluşmasını engellemektir. Toprak sıkışıklığının ortaya çıkmasını engellemede dikkat edilebilecek önemli noktalar şunlardır;

i. Tarla çalışmalarının toprağın nemli olduğu dönemde yapılmasını engellemek üzere çalışma takvimleri oluşturulabilmektedir. Toprak pulluğun geçtiği en derin noktada bile kolaylıkla kırılmalı ve kırıntı formuna gelmelidir.

ii. Her yapılan ek toprak işleme agregat yapısını bozduğunda dolayı ikincil toprak işleme minimize edilmelidir (hacim ağırlığı).

iii. Tarla trafiğini iyi planlanmalı ve tarla üstü ekipman geçiş sayıları minimize edilmelidir (Godwin, 2003b).

iv. Ek ağırlıklar kaldırılmalı ve sadece patinajı önlemek amacıyla konan ağırlıklar kullanılmalıdır.

v. Lastik hava basıncının düşürülmesi ile veya hafif aks yüklerinin kullanılmasıyla toprak üstündeki baskı azaltılmalıdır.

vi. Islak toprak koşullarında çalışma riskini azaltmak amacıyla drenaj artırılabilir.

vii. Toprak agregatlarının stabilize edilebilmesi ve düzeltilmesi için derin köklü ve kök yapısı lifli olan bitkilerin tercih edildiği, planlanması iyi ve doğru yapılmış rotasyonlar gereklidir.

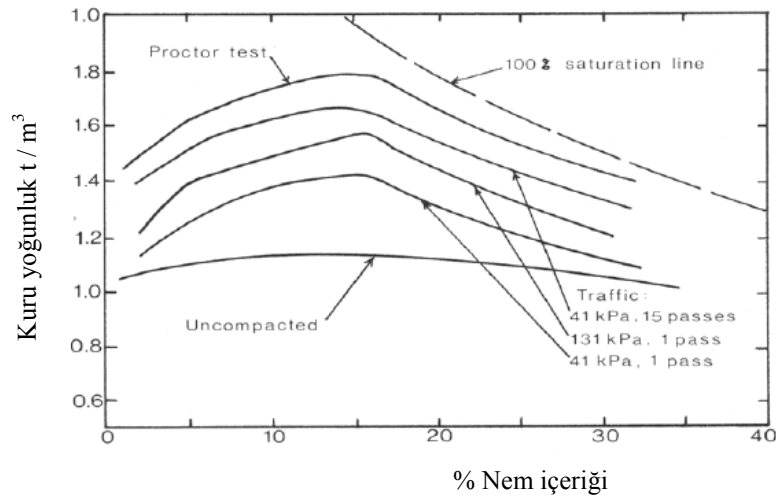
### **1.3 Sıkışıklık İle İlgili Toprak Özellikleri**

Toprak sıkışıklığı bir toprak kütesinin daha küçük bir hacime sıkıştırılması olarak tanımlanabilmektedir. Toprak özelliklerinin değişimlerine toprağın yapısal özelliklerinin değişimi eşlik etmektedir. Sıkışıklığa toprağın tepkisi kuru yığın yoğunluğundaki değişiklik, porozite ve/veya uygulanan baskının bir fonksiyonu

olarak penetrasyon direnci ve toprak nem içeriği olarak tanımlanmaktadır (Raghavan et al., 1990). Bu bölümde sıkışıklığa etki eden toprak özellikleri açıklanmaktadır.

### 1.3.1 Toprak nem içeriği

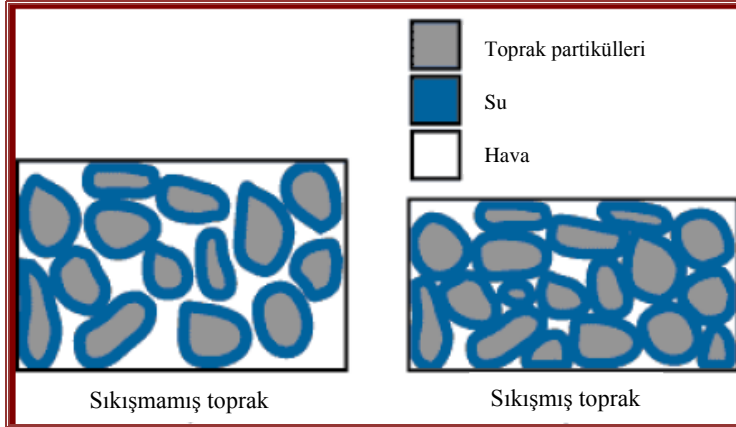
Toprak nem içeriği toprak sıkışıklığı üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Kuru koşullara göre nemli koşullarda yapılan baskılarda partiküller daha yüksek oranda sıkışmaktadır. Nem içeriği alan kapasitesi seviyesine geldiğinde toprak sıkışıklığı başlayabilmektedir. Farklı toprak nemlerinde ve farklı sayıdaki traktör geçiş sayılarında yapılan bir çalışmada, kumlu balçık bir toprakta maksimum kuru toprak yoğunluğu şekil 1.9'da görülmektedir (Raghavan et al., 1977). McKyes (1985)'in şekil 1.9'dan bildirdiğine göre, 41 kPa temas basıncında 15 geçiş sayısı yapan bir traktörün tek geçiş yaptığı duruma göre orjinal toprak yoğunluğunu iki kat arttırmıştır. Şekil 1.9'da görüldüğü üzere, tüm %15 nem içeriğindeki, traktör geçişleri %5'ten daha düşük toprak nem içeriğinde, kuru koşullardaki duruma göre yaş koşullarda belirgin şekilde toprak yoğunluğunun arttırmışlardır.



Şekil 1.9. Kuru yoğunlukta yapılan traktör geçişleri için toprak nem içeriğinin etkisi (Raghavan et al., 1977).

### 1.3.2 Toprak porozitesi

Toprak sıkışıklığı toprak partiküllerinin sıkışarak birbirlerine yaklaşması ile toprak hacim ağırlığının arttığı bir süreçtir ve bundan dolayı su hacmi değişmezken hava hacminde azalma meydana gelmektedir. Ancak doyma noktasına yaklaşıldığında, yük toprak gücü ve taşıma kapasitesini aşmakta, yüksek oranda patinaja sebep olmaktadır. Soane et al. (1980/1981) yaptığı araştırmada dokunulmayan toprağa göre yük uygulanan toprakta 10 $\mu$ m boyutundan büyük gözeneklerin kaybının söz konusu olduğunu bulmuştur. Ayrıca 0,2 $\mu$ m boyutuna sahip gözeneklerin hacminde hem yük uygulanan hemde uygulanmayan topraklarda 400 kPa basınca maruz bırakıldıklarında ya çok az yada herhangi bir değişikliğe uğramadıklarını belirlemişlerdir. McBride et al. (2003) yaptığı çalışmada toplam toprak hacminin yaklaşık %50'sinin gözeneklerinin eşit oranda hava ve su hacimlerine sahip olması gerektiğini açıklamıştır (Şekil 2.10). Temel toprak partiküllerinin (kum, alüvyon ve kil) ve toprak agregatlarının sıkıştırılmasından sonra katı partiküller ile gözenekler (hava ve su ile dolu olan) arasındaki dengenin belirgin şekilde değiştiği ortaya konmuştur.



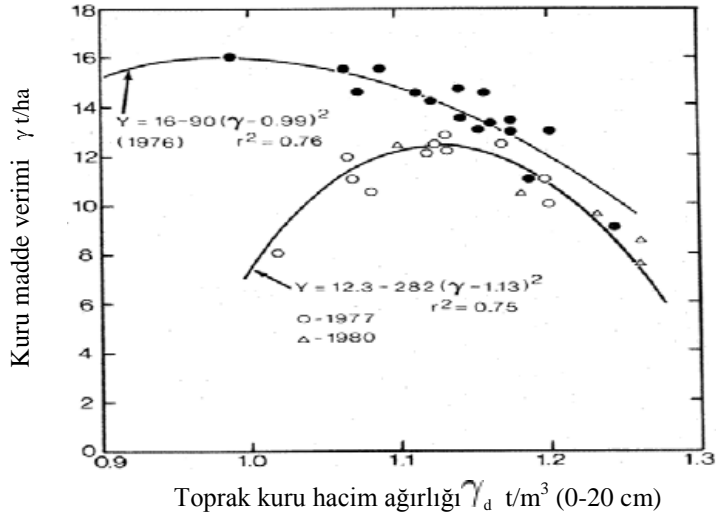
Şekil 1.10. Gözenekler üzerinde toprak sıkışıklığının etkisi.

Toprak içindeki büyük gözenekler toprağın sıkışması ile en başta ortadan kalkmaktadırlar. Bu gözenekler içinde bulunan hava bitki üst kök bölgesinden dışarıya taliye olurken geniş kanallar açarak hava hareketi direncini, su hareketini ve kök penetrasyonunu bozmaktadır. Toprak sıkışıklığı porozitenin yanında ürün

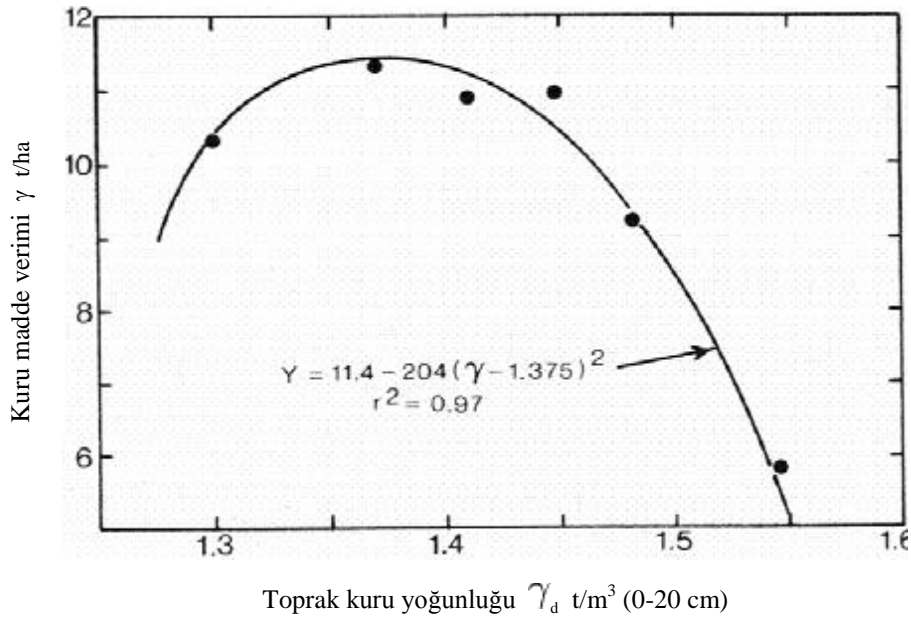
verimini de etkilemektedir. Boone and Veen (1994) poroziteyi göreceli ürün verimi ile ilişkilendirmiştir. Ürün gelişimini engelleyen çeşitli toprak faktörlerinin kombinasyonu ile toprak porozitesi ve verim arasındaki ilişkinin optimum bir eğri izleyeceğini vurgulamışlardır. Yoğun bir toprak havalanması uygulanabilir ve nispeten kuru koşullarda mekanik direnç çok yüksektir, öte yandan çok gevşek bir toprakta kök-toprak teması ve hidrolik geçirgenlik bitki ihtiyacının çok altında olmaktadır, hızlı kök gelişimi söz konusu olsa bile ürün verimi üzerinde bu durum olumsuz bir etken olabilmektedir.

### 1.3.3 Toprak hacim ağırlığı

Bu özellik bir toprak hacminde bulunan toprak partiküllerinin kütesine ek olarak toprak su kütesidir. (Campbell 1994 in Soane ve Van Ouwerkerk 1994) Genellikle  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{g/m}^3$ ,  $\text{Mg/m}^3$  (Soane et al., 1980/1981),  $\text{g/ml}$ ,  $\text{t/m}^3$  olarak tanımlanmaktadır. Hacim ağırlığı güç birimlerinin kullanılması durumunda gerekmektedir ve  $\text{kN/m}^3$  olarak tanımlanmaktadır (Godwin 2003b). McKyes et al (1979) tarafından kaba yemde kullanılmak üzere yetiştirilen mısırdaki toprak yoğunluğunun verime etkisi killi toprakta araştırılmıştır. Negi et al. (1981) aynı çalışmayı kumlu balçıklı bir toprakta tekrarlamıştır. Araştırmalarına ait sonuçlar Şekil 1.11'de görülmektedir. Şekil 1.11'de görülen sonuçlar (üstte) üç yıllık bir dönemde killi bir toprakta kaba yemlik mısır üretiminden elde edilmiştir. İkinci ve üçüncü yıllardaki verimler birbirlerine yakın iken birinci yıldaki verim yaklaşık 16 t/ha ( $1 \text{ t/m}^3$  kuru yoğunlukta) ile yüksek olmuştur. Yoğunluk değişimlerine karşı killi topraktaki ürün verimi hassasiyeti daha düşük olmaktadır. McKyes (1985) killi toprağın bu özelliğini toprak yapısına ve makro-mikro gözeneklerin boyutuna ve ufak yoğunluk değişikliklerinin makro gözenekleri kapatmak için yeterli olması ile açıklamaktadır. Diğer yandan kumlu balçıklı topraklarda makro ve mikro gözeneklerdeki boyut dağılımı daha büyük olmakta, toprak yapısının dengelenmesi için daha büyük yoğunluk değişikliklerine gereksinim duyulmaktadır. McKyes yapılan tüm araştırmalar sonucunda ürün gelişimine sıklıkla etkisini açıklamakta ve optimum toprak kuru yoğunluğunun üzerindeki bir sıklıkta ürün verimi düşmektedir.



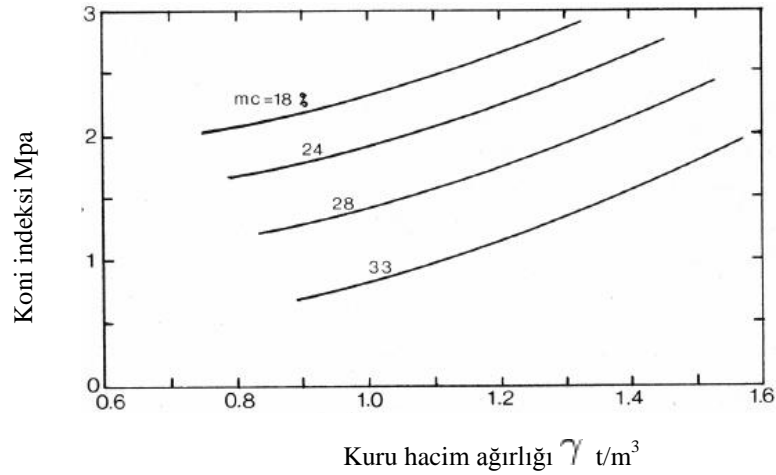
**Şekil 1.11.a** Kaba yem mısır üretiminde verime toprak yoğunluğunun etkisi, a. killi toprak (McKyes et al., 1979) ve b. kumlu balçık toprakta, (Negi et al., 1981).



**Şekil 1.11.b** Kaba yem mısır üretiminde verime toprak yoğunluğunun etkisi, a. killi toprak (McKyes et al., 1979) ve b. kumlu balçık toprakta, (Negi et al., 1981).



McKyes (1985)'a göre, düşük plastik sınırın altında genel olarak kohezyonu azaltarak, topraktaki nem miktarı toprak kuvvetini etkilemektedir. Sabit nem içeriğinde ve daha büyük kuru yoğunluklarda toprak daha büyük bir kuvvete sahip olacaktır. Şekil 1.12'de killi balçıklı bir toprakta toprak penetrasyon direncine hem nem içeriğinin hemde kuru yoğunluğun değişiminin etkileri görülmektedir. Şekil 1.12 görüldüğü gibi konik penetrometre ile ölçülen penetrasyon direnci sadece sıkışan kütle ile değil nem içeriği ile de değerlendirilmelidir.

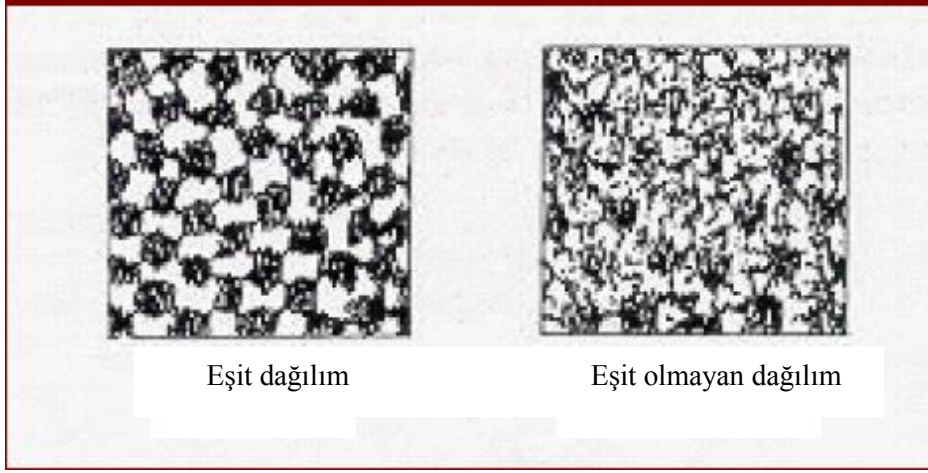


Şekil 1.12. Penetrasyon direncine toprak hacim ağırlığı ve nem içeriğinin etkisi (Taylor et al., 1981).

### 1.3.4 Toprak tekstürü

Kuru hacim ağırlığı ve herhangi bir nem içeriğinde uygulanan stress arasındaki ilişki, ilgili toprak tipine göre değişmektedir. İyi tekstüre sahip toprak yapıları (killi topraklar) özellikle kısmen kuruduktan sonra herhangi bir nem içeriğinde kohezyon artışı sıkışmada artışa neden olmaktadır, aynı şekilde iri granüllü topraklarda (kumlu) genel olarak bu durum meydana gelmemektedir. Eğer sıkışıklık artarsa, içsel sürtünmenin katsayısı iri granüllü topraklarda herhangi bir nem içeriğinde artacaktır. Daha ince taneli yapıdaki topraklar benzer tepkiye sahip olurken, sıkışmanın artmasıyla içsel sürtünme karakteristiklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir (Chancellor, 1971). Karşılaştırılabilir koşullarda, değişken aralıklara sahip toprak partikülleri (örneğin ince balçık kumlu toprak) eşit dağılıma sahip toprak partiküllerine göre (örneğin kumlu toprak) daha sıkıştırılabilir yapıdadırlar. İnce taneli partiküller kalın yapıdaki partiküllerin

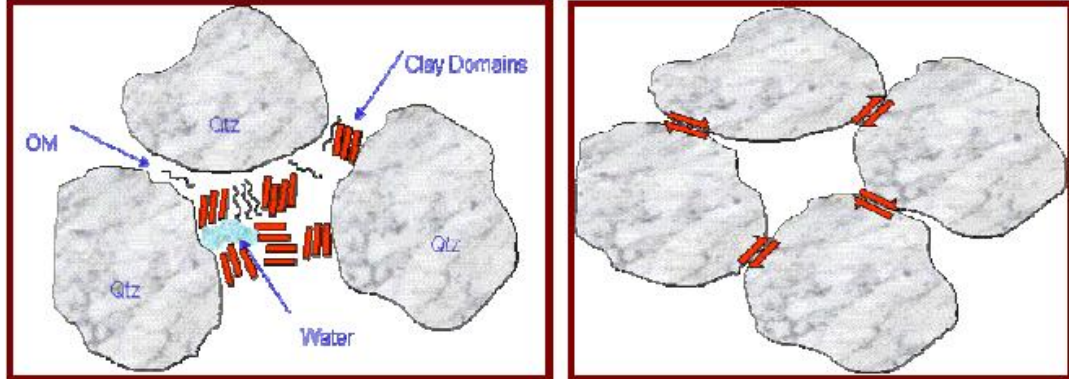
oluşturduğu sürtünmeden dolayı oluşan düzgün yapılı olmayan topraktaki gözenekleri doldurarak daha yoğun yapılı bir toprağı oluşturmaktadır. Bu durum şekil 1.13’de görülmektedir.



Şekil 1.13. Sıkışabilirliğe toprak yapısının etkisi.

### 1.3.5 Toprak Direnci

Toprak direnci toprak sıkışıklığından etkilenebilen topraktaki en önemli fiziksel özelliklerden biridir. Toprakta belirli bir deformasyonun meydana gelmesi için aşılması gereken direnç olarak tanımlanmaktadır (Chancellor 1971 ve Guerif 1994). Toprak kuvveti parametreleri tekerlek-toprak, toprak makinası, toprak kliması ve toprak-ürün etkileşimi gibi işlemler ile ilişkilidir (Guerif 1994). Godwin (2003b) toprak kuvvetinin toprak partikülleri arasındaki kohezyon ve sürtünmelerden geldiğini söylemektedir (Şekil 1.14) ve belirlenen topraklarda artan hacim ağırlığı ile azalan toprak nemi sonucunda arttığını belirtmektedir (Şekil 1.12). Toprak kuvveti laboratuvar testleri (direk kesme kutusu, translasyonel kayma plakası ve üç eksen testi) ve tarla testleri (açısal kayma plakası, kesme pervanesi ve konik penetrometre) gibi farklı yöntemler ile ölçülmektedir.



**Şekil 1.14.** Toprak kuvvetini oluşturan toprak partikülleri, Kohezyon (a) ve sürtünme (b) (Godwin 2003b).

## 1.4 Toprak Sıkışıklığı Ölçüm Sistemleri

Toprak sıkışıklığının belirlenmesinde bir çok yöntem bulunmaktadır. Toprak sıkışıklığının belirlenmesinde önceki araştırmacıların kullandığı yöntemler temas etmeyen (temassız) ve temas eden (temaslı) yöntemler olarak ayrılmaktadır.

### 1.4.1 Temassız yöntemler

Toprak özelliklerinin belirlenmesinde toprak ile fiziksel herhangi bir teması olmayan her yönetime temassız yöntem denilebilmektedir. Bu sistemler şu şekilde kategorize edilebilir:

- **Zemin penetrasyon radarı (GPR)**

Zemin penetrasyon radarı (GPR) toprak yüzeyi üzerinden dielektrik özellikleri içeren yüksek çözünürlükte görüntüler sağlayan yakın yüzey jeofiziksel tekniğidir. Sıkışan katmanın varlığını ve derinliğini tespit etmekte kullanılabilir. Raper et al. (1990) balçık kumlu toprakta sert tabakayı tespit etmede bu yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntemi konik penetrasyon ölçümleri ile karşılaştırmışlar ve aralarında 1:1 korelasyonu tespit etmişlerdir. Buna rağmen olası hata kaynakları da belirlenmiştir.

- **Uzaktan algılama**

Toprak özelliklerinin tayininde uzaktan algılama hassas tarım içinde de kullanılan teknolojik bir yöntemdir. Wells et al. (2000) orta Kentaki'de toprak sıkışıklığının tespit edilmesi için uzaktan algılama yöntemini uygulamışlardır. Elde ettikleri kızıötesi yansımaları ortalama konik penetrasyon verileri ile karşılaştırmışlar ve doğrusal bir korelasyon elde etmişlerdir. Fakat korelasyon derecesi tatmin edici olmamıştır.

- **Elektromanyetik indüksiyon (EMI)**

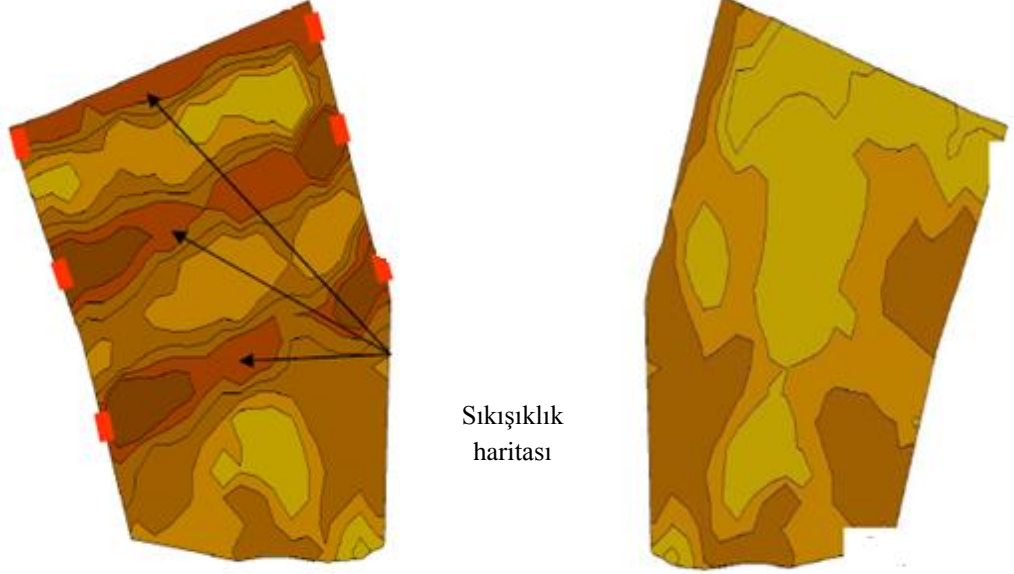
Godwin ve Miller (2003) EMI yönteminin belirli alan üzerindeki kapılar arasındaki tarla trafiğinin oluşturduğu toprak sıkışıklığını ölçebildiğini belirlemişlerdir (Şekil 1.16).



**Şekil 1.15.** Elektromanyetik indüksiyon (EMI) çalışması-EMI 38 (Waine 1999 ve Godwin 2003a).

Dipkazan uygulaması öncesi

Dipkazan uygulaması sonrası



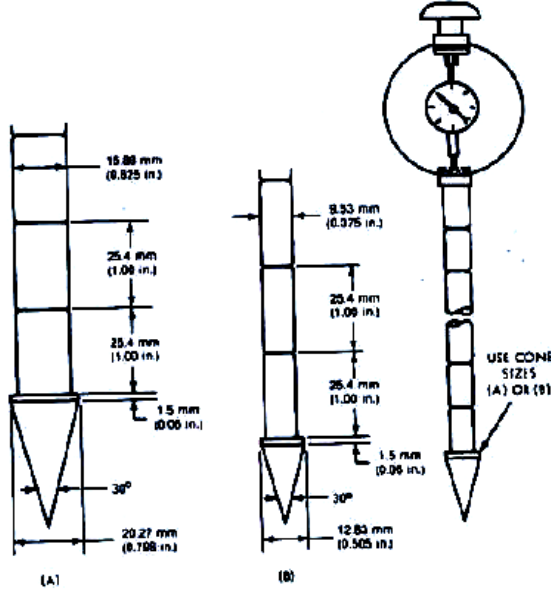
**Şekil 1.16.** Tarla girişleri arasında meydana gelen tarla trafiğinin oluşturduğu toprak sıkışıklığının elektromanyetik indüksiyon (EMI) çalışması ile belirlenmesi çalışması (sol) ve dipkazan uygulaması sonrası sıkışıklığın giderilmesi (sağ) (Smith 2001 in Godwin ve Miller 2003).

### 1.4.2 Temaslı yöntemler

Toprak özelliklerinin belirlenmesinde toprak ile fiziksel temas eden her yöntem temaslı yöntem olarak adlandırılmaktadır. Temaslı yöntemler olarak kategorize edilen yöntemler şunlardır:

- **Dikey penetrometre**

Toprak mekanik kuvvetinin ölçülmesinde en basit yöntem konik penetrometre yöntemidir, fakat zaman tüketen, zahmetli ve sıkıcı bir yöntemdir. ASAE (2003) iki farklı konik boyutunda aynı paslanmaz uç açısına sahip 30° dikey penetrometrelerin kullanımında 30 mm/s penetrasyon hızını belirlemiştir. İki konik tabanın boyutları: 323 mm<sup>2</sup>, yumuşak topraklar için 15.88 mm mil çaplı 20.27 mm çapında (Şekil 1.17, A) 130 mm<sup>2</sup>, sert topraklar için 9.53 mm mil çaplı 12.83 mm çapında (Şekil 1.17, B).



Şekil 1.17. El ile çalıştırılan toprak konik penetrometresi (ASAE 2003).

Sudduth et al. (2002) toprak kuvvetinin toprak ve coğrafi yapıya bağlı olduğunu iki farklı alanda (Illinois ve Missouri) dikey konik penetrometre ölçümleri ile belirlemiştir. Koni indeksi ve toprak fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlar ve sadece koni indeksi ile ölçülen derinlik arasında bir korelasyon belirlemişlerdir. Ancak toprak yüzeyine yakın derinlikteki (0-150 mm) toprak özellikleri belirlenememiştir. Daha derinlerde koni indeksi toprak yapısı ve toprak su içeriği ile ilişkilendirilmiştir. Yaptıkları çalışmada koni indeksi ile hacim ağırlığı arasında korelasyon ilişkisi kurulamamıştır fakat Missouri alanında toprak elektriksel geçirgenliği ile kuvvetli bir korelasyon ilişkisi saptamışlardır.

Vaz ve Hoppmans (2001) TDR sarmal tip koni penetrometre geliştirmişler ve toprak penetrasyon direnci ile su içeriğini birlikte ölçmüşlerdir. Geliştirdikleri sistem ile doğru toprak penetrasyon direnci ve su içeriği ölçümleri yapabilmişlerdir ve tarım alanlarında toprak direncine bağlı olarak su içeriğinin belirlenmesinde iyi bir araç olduğunu belirlemişlerdir.

Gorucu et al. (2003) traktöre bağlanmış bir konik toprak penetrometresi ile farklı derinliklerde ölçüm yaparak bir algoritma oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışma ile konik toprak penetrometresi kullanarak taban taşının yeri ve kalınlığının belirlenebileceğini açıklamışlardır. Bu metodun kısıtı ise dikey

penetrometre kullanılmıştır ve taban taşlarının sürekli ölçümü mümkün olmamaktadır.

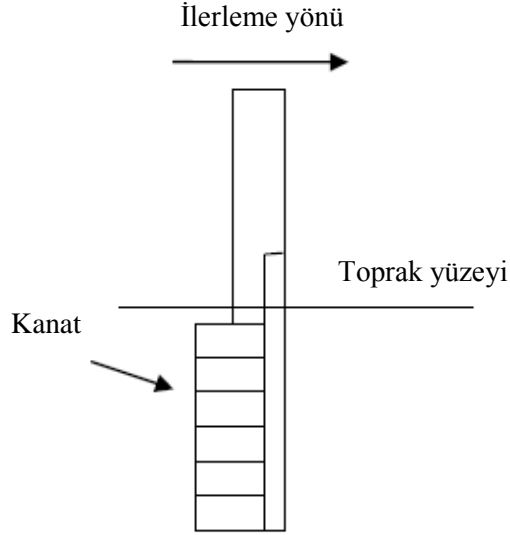
### • Yatay penetrometre

Alihamsiyah et al. (1990) toprak mekanik empedansının ölçülmesi için yatay bir ölçüm tekniğini geliştirmişlerdir. Yatay çalışan iki farklı toprak penetrometresi tasarlamışlardır. Bunlardan biri prizmatik diğeri ise konik tiptedir. Bu iki penetrometre ile toprak kabında yaptıkları ölçümleri dikey penetrometre ile karşılaştırmışlardır. Yatay ve dikey penetrometreler arasında penetrasyon dirençleri yönünden benzer ilişkiler bulunmuştur.

Randy (2002) dinamik konik bir penetrometre geliştirmiştir. Yaptığı çalışmada toprak sıkışıklıklarının belirlenmesinde dikey standard ve yatay çekme tip penetrometreleri kullanmıştır. Dikey ölçümler toprakta bir sıkışmanın olduğunu belirtirken yatay ölçümler yapan çekme tip penetrometre ise derinlik artıkça değerlerde artış gösterirken taban taşını belirleyememiştir.

Chung et al. (2003 and 2004) tarafından toprak kuvvetini algılayan bir sensör geliştirilmiştir. Bu sensör toprak kuvvetini ön kısmında bulunan bir gövdenin üzerine bağlanmış yük hücresi serisi yardımıyla ölçebilmektedir. Çalışmalarında prizmatik uzantılı uçları iki farklı hızda ve iki farklı derinlikte denemişlerdir. Ölçüm uçlarının aralarını ve uzantılarını 102 mm ve 51 mm olarak ayarlamışlardır ve bunu konik penetrometreden aldıkları veriler ile ilişkilendirmişlerdir. Bu yöntemdeki problem toprak sıkışıklığını 2 farklı derinlikte 102 mm çözünürlükte ölçmüşlerdir fakat toprak kuvvetinin derinlemesine ölçümünde çözünürlük yeterli olmamaktadır.

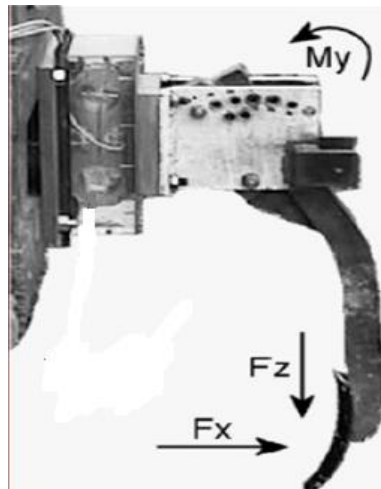
Verschoore et al. (2003) toprak direncini sürekli ölçebilen bir sensör geliştirmişlerdir. Bir ayağın her iki tarafına monte ettikleri ekipman ile burulma momentini ölçmüşlerdir ve bu ölçümleri 300 mm derinlikteki toprak mekanik kuvveti ile ilişkilendirmişlerdir. Geliştirdikleri sistemin hareketli olarak toprak direncini ölçebilme potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir. Buna rağmen dikey ve yatay kuvvetler arasında zayıf bir korelasyona rastlamışlardır.



Şekil 1.18. Ölçüm ekipmanı ve ekipmanın monte edildiği bacak (Vorschoore et al., 2003).

### • Çeki kuvveti ölçümü

Toprak mekanik direnci önce haritalanmış daha sonra uzatılmış sekizgen halka dönüştürücü (EORT) ile anlık ölçüm yapılarak (Şekil 1.19) elde edilen toprak özelliklerine korelasyon yapılmıştır (Sirjacobs et al., 2002). Yaptıkları çalışma sonunda lokal toprak kuvveti varyasyonlarının ölçülmesinde dinamometrenin hassasiyetinin yeterli olduğunu ve toprak fiziksel özelliklerinin anlık ölçüm teknolojisinin umut verici olduğunu vurgulamışlardır. Bu yöntem farklı derinliklerdeki topraklarda sıkışıklık seviyelerini ölçmemektedir.



Şekil 1.19. Toprak mekanik direnci ölçüm sistemi (Sirjacobs et al., 2002).

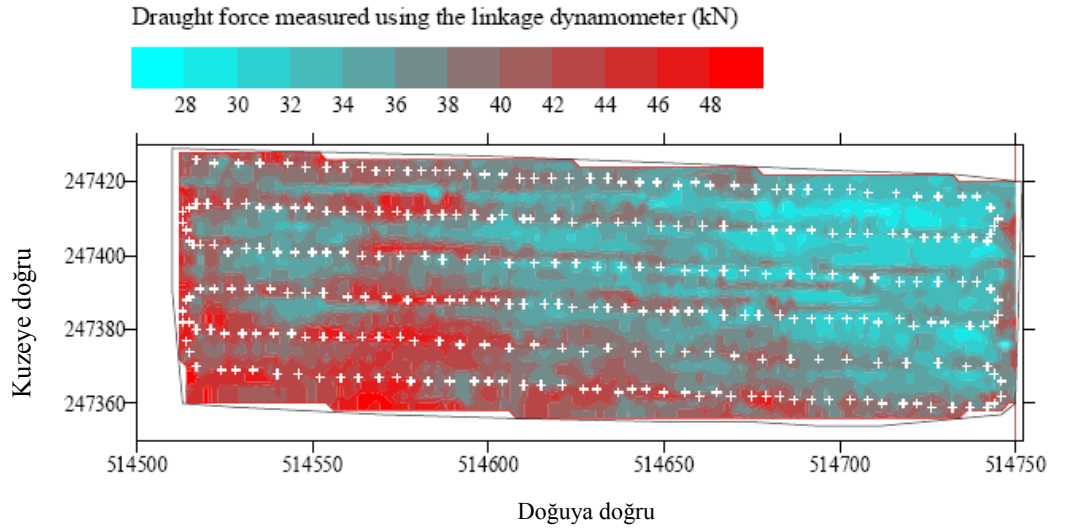


Richards (2000) traktörün performans parametrelerini ölçebilen bir algılama sistemi geliştirmiştir. Çalışmada iki adet uzatılmış sekizgen halka dönüştürücü kullanmıştır.

(Godwin 1975) traktör üç nokta askı düzeni alt kollarına bağladığı ekipman ile traktöre bağlanmış olan dipkazan ile üst kısma monte edilen sensör ile bağlantı kurmuştur. Dipkazanın 0,35 m derinlikteki çeki kuvvetini ölçerek bunu daha önceki ölçümler ile karşılaştırmıştır (Şekil 1.20 ve 1.21).



Şekil 1.20. Uzatılmış sekizgen halka dönüştürücüleri ve üstte algılayıcı sensör (Richards 2000).

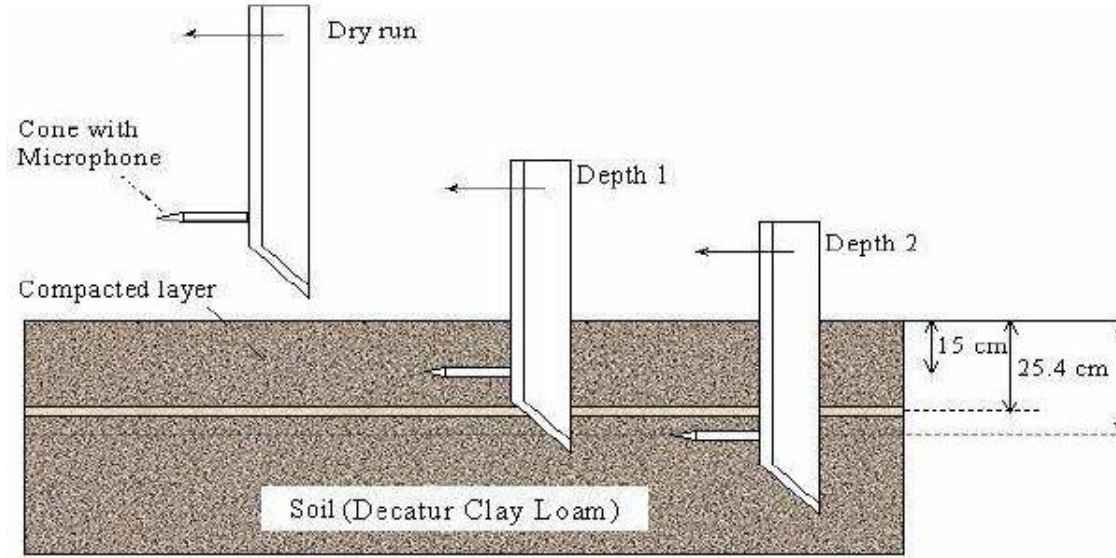


Şekil 1.21. Traktörün geçtiği sıralar üzerinde dipkazan güç ölçümlerindeki toprak sıkışmasından dolayı meydana gelen artış (yüksek güç alanları) (Richards 2000).

Mouazen (2003) toprak sıkışmasını kuru hacim ağırlığı şeklinde ifade eden anlık ölçüm yapabilen bir ölçüm düzeni geliştirmiştir. Çalışmalarında ölçüm düzeni sıkışıklık ölçüm sensörü, dipkazan, radar, GPS ve derinlik ölçüm tekerleğinden meydana gelmiştir. İlgili derinlikteki çeki kuvveti sekizge bir halka yük hücresi ile ölçülmüştür. Bu çalışmadaki eksiklik toprak sıkışıklığının farklı derinliklerde ölçümünün denenmemesidir.

### • Akustik sistem

Tekeste et al. (2002) taban taşını hareketli bir şekilde ölçebilen bir akustik sistem geliştirmiştir. Uçu konik yapıdaki bir mikrofonu bir ayağın ucuna bağlamışlardır. (Şekil 1.22). Bu metod ile toprak içinde çekilen bacak üzerindeki konik uç üzerinden alınan sesin ölçülmesi ile sıkışma seviyesinin bulunması çalışılmıştır. Toprak sıkışıklığının derecesine göre elde edilen ses değişmektedir. Konik yapının geometrisi, toprak parametreleri ve diğer çevresel faktörlerin akustik veriler ile olan ilişkisini açıklamak üzere bir girişim olmamıştır. Bu sistem toprak içinde hareket ederken farklı katmanlardaki toprak mekanik direçlerini ölçmemektedir.



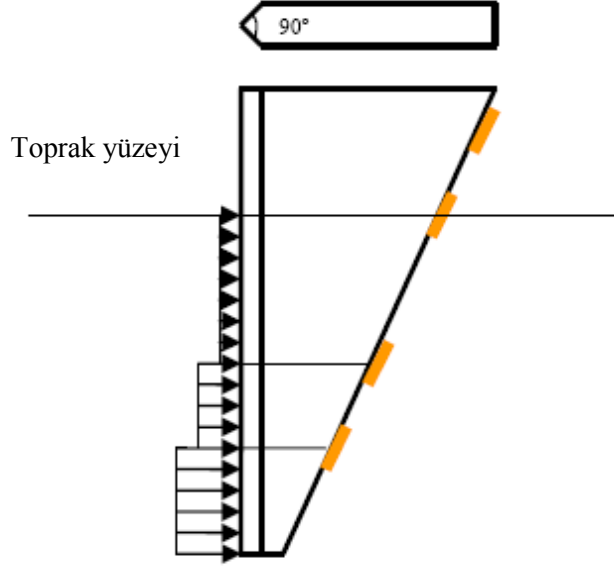
**Şekil 1.22.** Bir toprak kabının içinde taban taşının üstünde ve altında, farklı derinliklerdeki konik ekipman (Tekeste et al., 2002).

• **Ölçüm düzeni haline getirilmiş torpak işleme ayağı  
(dipkazan ayağı)**

Lui et al. (1996) tekstür/toprak sıkışıklığı sensörü geliştirmiş ve eğer sabit hızda ve derinlikte kullanılırsa bununla beraber çeki kuvveti değerleri nem içeriği değerlerine ayarlı ise bu tip cihazın toprak tekstür/sıkışıklık indekslerinin oluşturulması için kullanılabileceğini belirtmiştir. Bir dizi yük algılama hücrelerinin bacak üzerine dizilmesi oluşturulan ekipman yardımı ile farklı derinliklerdeki yük dağılımları ölçülmüştür. Çalışmada ayağın toprağı işlediği derinliklerdeki toprak kesme kuvveti dağılımları başarılı bir şekilde ortaya konulduğu belirlenmiştir. Çalışma sırasında ayrıca işlenmiş veya işlenmemiş topraklarda kuvvet dağılımının sığ derinliklerde doğrusal olduğu bulunmuştur. Bunun yanında işlenmemiş topraklarda kuvvet dağılımı derinlik arttıkça doğrusal olmayan bir yapıda olduğu görülmektedir. Yine çalışmada sabit derinlikte ve ilerleme hızında aletin çeki ihtiyarcının toprak tekstürü, hacim ağırlığı, nem içeriği ve sıkışma düzeyine bağlı olduğu belirlenmiştir (Glancey et al., 1989). Bir dipkazanın ayağına monte edilen sensör ile toprak kuvveti profillerini izleyerek taban taşı derinliğinin bulunmasında kullanılmak üzere bir ölçüm düzeni geliştirilmiştir (Stafford and Hendrick, 1985 ve 1988). Toprak kuvveti üzerindeki varyasyonların incelenmesi ile taban taşının algılanması sağlanmıştır. Bir dipkazan ayağının arkasına monte edilen kesici bıçak üzerindeki kuvvetlerin işlenmemiş bir toprak içindeki toprak kuvvetlerini temsil ettiğini belirlemiştir. Toprak işleme derinliğinin sürekli olarak ölçümü yapılarak, yükün maksimum olduğu bölgede taban taşının olabileceği derinlik olarak kabul edilebileceği önerilmiştir.

Dikey bir bıçağın arkasına yerleştirilen 4 adet yük algılama hücresi yardımıyla toprak mekanik direncinin ölçülmesi denenmiştir (Adamchuk et al., 2001). (Şekil 1.23). Bu bıçak üç farklı derinlikte toprak direncinin tespit edilmesi amacıyla dizayn edilmiştir. Standart konik penetrometreye ait ölçüm değerleri dikey bıçak düzenli ölçümle elde edilen değerlere göre standart hatası iki kat fazla olmuştur. Çalışmada derin çözünürlükte toprak direncinin ölçülmesi denenmemiştir. Bu sistem ile bıçak üzerindeki yük ve burulma momentlerinin ölçülmesi mümkün iken toprak kuvvetinin ölçümünün zor olduğu görülmüştür.

Bir toprak işleme ayağının en alt kısmına yerleştirilen yük algılama hücresi ile hareket halinde farklı derinliklerdeki toprak mekanik direnci ölçülmeye çalışılmıştır (Adamchuk et al., 2003). Sistem alt noktasında ve bacak üzerinde ayrı bir doğrusal toprak direnci basınç dağılımı belirlemiştir. İstenilen belli derinliklerde çalışarak taban taşlarının derinliklerini belirleyememiştir.



**Şekil 1.23.** Toprak mekanik empedansı ölçüm sistemi, dikey bir bıçağın arkasına yerleştirilmiş 4 adet yük telleri (hücreleri) (Adamchuk et al., 2001).

(Manor et al., 2001) bir ölçüm düzeni haline getirilmiş dip kazan yardımı ile toprak sıkışmasını ölçen ve haritalayan bir sistem geliştirmiştir. Ölçüm düzeni üzerindeki 3 adet yük hücresi ile oluşan yükü ve bacak üzerindeki toprağın reaksiyonun yönünün algılanması, 2 adet yük hücresi ile bacağa dikey gelen yükleri ve bir diğer yük hücresi ile shaft boyunca gelen yüklerin ölçülmesi sağlanmıştır.

Andrade et al. (2001, 2002, and 2004) toprak kesme kuvvetini belirleyen farklı topraklarda, hızlarda ve nemlerde çalışabilen bir toprak sıkışma profili algılama sensörünü geliştirmişlerdir. Toprak kesme kuvvetine sensörün toprak içindeki hızının etki etmediğini tespit etmişlerdir. Sensörün ürettiği verilerin standart bir konik penetrometreden elde edilen konik penetrasyon verileri ile iyi bir korelasyonu yapılarak çalışması sağlanmıştır.

Sharifi (2004) toprak sıkışıklığının tayininde kama profilli bir parçanın arkasına 34 derecelik açı ile yerleştirilen yük hücrelerinin oluşturduğu kanat tipi ölçüm düzeni kullanmıştır. Penetrometre değerleri ile kanat şekilli bacak üzerindeki değerler arasında ilişki olsada iki veri seti arasında düzgün bir korelasyon bulunamamıştır.

Hall and Raper (2005) hareketli ölçüm yapabilen bir toprak kuvveti sensörü prototipini dizayn etmişlerdir. Bacak uç kısmında prizmatik bir algılayıcı düzen ve uç kısmına gelen yüklerin ölçülmesi için bir yük dönüştürücüsü kullanılmıştır. Geliştirilen sensör konik penetrometrenin toprak profillerini tayin ettiği şekilde ölçüm yapabilmektedir. Hareketli toprak kuvveti ölçüm değerleri konik penetrometre ölçümlerinden çok hacim ağırlığı ile korelasyona sahip olmuştur ve konik penetrometre ölçümlerinden daha az varyasyon belirlemiştir.

Bir başka hareketli toprak kuvveti ölçüm düzeni (Chung et al., 2006) tarafından dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Ölçüm düzeni üzerinde yük hücreleri serisi bulduran ve her birinin toprak prizmatik kesici uç ile arabirim oluşturmasından meydana gelmektedir. Uçların arasını ve uzunluğunu 100 mm ve 51 mm olarak seçmişlerdir. Prizmatik toprak kuvveti indeksi ile konik penetrometre indeksi arasında 30 cm derinlikte belirgin bir doğrusal ilişki bulunmuştur. Bir çok çalışmada geliştirilen ekipmanlar toprak işleme sırasında çalışmamaktadır.

#### • Hava geçirgenliği

Koostra et al. (2003) geliştirdiği sensör ile topraktaki hava geçirgenliğini ölçerek alanda sürekli ölçüm yapabilmeyi ve lokal sıkışıklığı tespit etmeyi amaçlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sensör ölçümlerinin, toprak sıkışıklığı ölçümünde kullanılan kabul edilmiş yöntemler ile karşılaştırılması gerektiğine karar verilmiştir. Geliştirilen sensör hareketli olarak çalışarak farklı derinliklerdeki toprak sıkışıklıklarını tespit edememiştir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tarımsal faaliyetlerde kullanılan traktör, biçerdöver ve bu araçlara takılan donanımlar tarla üzerinde aşırı bir trafik oluşturmaktadır. Tarla trafiği, özellikle giderek artan traktör ve biçerdöver ağırlıkları nedeniyle tüm dünyada toprağı sıkıştıran en önemli etken haline gelmiştir (Porterfield ve Carpenter, 1986). Toprak sıkışmasını etkileyen bir başka faktör de doğal kuvvetlerdir. Aşırı yağış veya kuraklık toprakta sıkışıklığa neden olmaktadır. Ayrıca toprağın, uygun olmayan dönemlerde işlenmesi (aşırı nemli) de yine sıkışma problemlerini oluşturmaktadır (Anonim, 1996 ve 2002).

Toprak sıkışması, toprağın hacim ağırlığı ve nem oranının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Tekin vd., 2008). Sıkışma, toprak içerisindeki boşluklardan havanın uzaklaşması ve topraktaki hava hacminin azalmasıdır. Bunun sonucu olarak toplam porozite (gözeneklilik) ve ortalama por boyutu yani toprak hacmi azalmakta, toprak parçacıklarının birbirine yaklaşması ile toprağın dayanımı ve hacimsel yoğunluğu artmaktadır.

Topakci vd., (2010) toprak sıkışıklığının haritasını oluşturmak amacıyla, toprak direncini 40 cm'lik derinlikte ölçebilir tek proba sahip olan bir sensör tasarladılar. Bu yatay penetrometre traktör arkasına bağlanıp sabit bir hızla hareket ederek toprak direncini anlık şekilde ölçmüştür. Dolayısıyla, elde edilen toprak direnci değerleri 0.2 MPa ve 3 MPa aralığında değişmekte olduğu kanıtlanmıştır.

Toprak sıkışmaları, alt toprak sıkışması ve üst toprak sıkışması olarak iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Alt toprak sıkışması, toprak işleme derinliğinin altında kalan bölgede oluşan sıkışma türüdür ve giderek artan traktör ve biçerdöver aks yüklerinin artması sonucu ortaya çıkmaktadır (Bal, 1985). Her bir aks üzerinde 5 ton'dan fazla ağırlık bulunması durumunda meydana gelen tekerlek trafiği sıkışması olan üst toprak sıkışması, genellikle toprağın üst 10 cm' lik kısmında etkisini gösterir (Korucu ve ark., 2003).

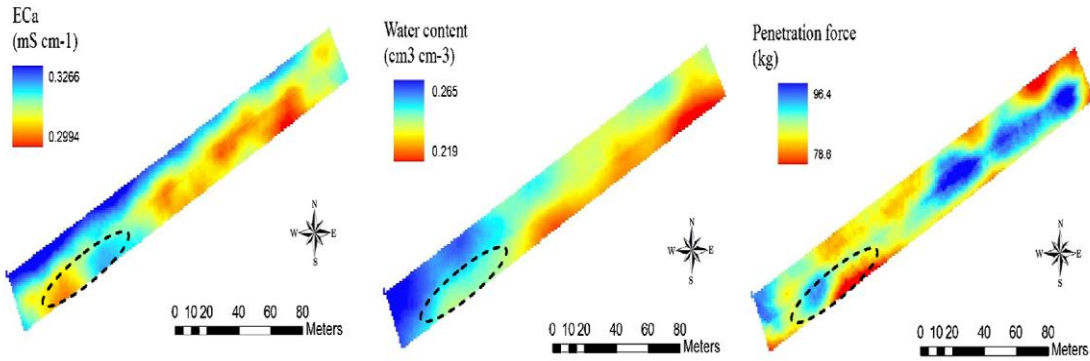
Toprak sıkışıklığı, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini etkilemektedir (Anonim, 2002). Özellikleri değişen toprak doğaldır ki üzerinde yetişecek olan bitkiyi de olumsuz yönde etkilemektedir. Bitki kökleri toprak içerisinde gelişirken toprak sertliğinden kaynaklanan bir dirençle karşılaşır. Toprak penetrasyon direncinin fazla olması, bitkilerin gelişimi ve köklerin toprağa yayılımını azaltır, topraktaki su ve hava hareketlerini sınırlandırır ve tohumun çimlenmesini yavaşlatır. Aşırı sıkışıklılık, bitki köklerinin gelişimini sınırlandırdığından kökler su ve besin elementlerine ulaşmakta güçlük çeker. Toprak sertliği, ister yüzeyde ister tabanda, su iletkenliğini artırdığı için toprak erozyonuna da neden olmaktadır. Tüm bu olumsuz etkiler, verimi ve ürün kalitesini azaltmaktadır (McBride ve ark., 1997). Ayrıca sıkışmış bir toprak üzerinde çalışan toprak işleme alet ve makinaları, karşılaştıkları toprak direncinden dolayı daha fazla enerji kullanırlar. Bu durum da, üretici açısından ekonomik zarar olarak ortaya çıkar (Adamchuk ve ark., 2003).

Toprak sıkışıklığının oluşturduğu penetrasyon direncinin, tarlayı kullanmadan önce tespit edilmesi hem ürün verimi hem de tarım arazilerinin korunumu açısından önemlidir. Toprak penetrasyon direnci ölçümünde iki farklı yöntem kullanılır. Birincisinde tarla üzerinden toprak örnekleri alınır. Toprak örneği, toprağın belli derinliklerinden ucu açık bir boru yardımıyla toprağın çıkartılması ile elde edilir. Bu yöntemde topraktan alınan örnekler laboratuvar ortamında analiz edilerek penetrasyon direnci tespit edilir. Diğer yöntem de ise, taban alanı belirli konik uçlu bir çubuk toprağa dikey olarak batırılır. Standart ölçülere sahip bir koninin toprak yüzeyinden başlayarak toprağa standart bir hızda batması sağlanır (Drummond ve ark., 2000).

Sun ve ark. (2006), yatay yönde hareket eden, hem penetrasyon direnci hem de toprak nem miktarını ölçebilen bir penetrometre tasarlamışlardır. Penetrasyon direnci bir yük hücre sensörü, nem miktarı ise elektromanyetik iletkenlik tekniği yardımı ile tespit edilmiştir. Sonuçta dikey toprak penetrometresi ile geliştirdikleri penetrometre arasında ölçülen değerler bakımından fark olmadığını fakat bu sistemin farklı noktalarda anlık ölçüm yaparak hızlı veri elde edilmesinde avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Sun ve ark. (2006), dikey yönde çalışan bir penetrometre tasarlamışlardır. Oluşturulan penetrometre hareketini bir DC motordan almaktadır. Sistemde hem kuvvet hemde akım sensörü kullanılmıştır. Kuvvet sensörü bir yük hücresi olup toprak penetrasyon direncini ölçmektedir. Akım sensörü ile de konik çubuğun DC motor yardımı ile toprağa batırılırken şebekeden çektiği akım miktarı tespit edilmiştir. Elektrik motorları çalışmalarını esnasında bir zorlukla karşılaştıklarında şebekeden daha fazla akım çekerler. Bu teoriyle penetrasyon direnci ve DC motorun çektiği akım arasında bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir.

Zeng ve ark. (2008), çalışmalarında iki farklı sensör kullanarak hem nem miktarı hem de yatay yönde toprak penetrasyon direncini ölçen bir sistem oluşturmuşlardır. Traktörün üç nokta askı ünitesine monte edilen dikey bir demirin ucuna yatay olarak konik çubuk monte edilmiştir. Çalışmada konik ucun toprak içerisinde ilerlemesi esnasında dikey çubuğa aktardığı kuvvet bir yük hücresi ile tespit edilmiştir. Nem miktarı ise konik uca takılmış olan EC (Elektromagnetic Conductivity) probu yardımı ile tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ile araştırma yapılan arazinin Penetrasyon, nem ve elektriksel iletkenlik haritaları çıkarılmış ve aralarında doğrusal bir ilişkinin varlığı söz konusudur (Şekil 4).



Şekil 2.1. EC, nem, penetrasyon haritaları (Zeng ve ark., 2008).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, hassas tarım uygulamalarında kullanılmak üzere toprak penetrasyon direncini ölçebilmek ve taban taşı derinliğini belirlemek için yatay penetrometre (hareketli sensör) tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan yatay penetrometre traktör, önüne monte edilecektir.

#### TASARIM VE İMALAT

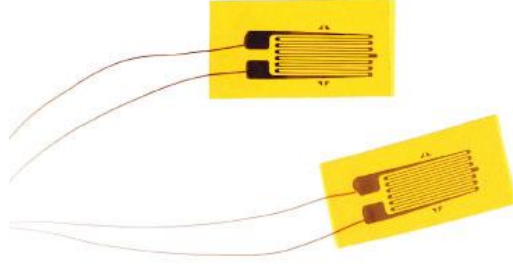
Başlıca Tasarım Parametreleri:

- Toprağın penetrasyon direncinin ölçülmesini sağlamak,
- Ana gövde malzeme seçimi,
- Yük hücresi seçimi,
- Kalibrasyon

#### 3.1 Materyal

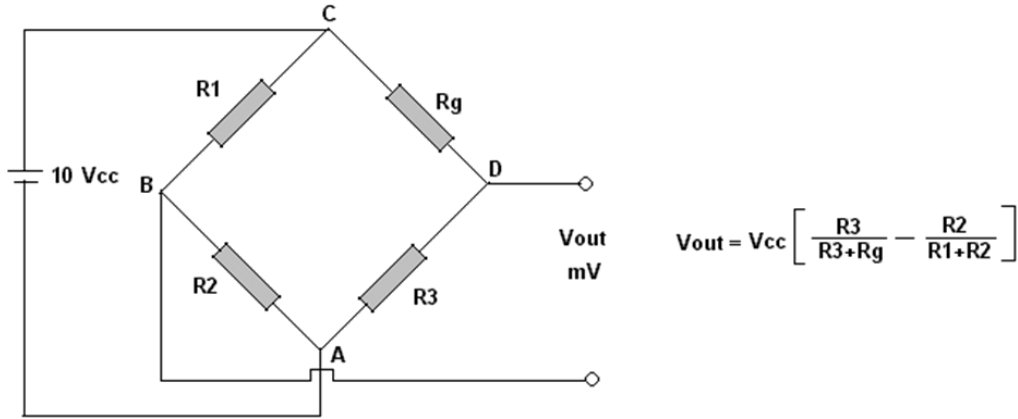
##### 3.1.1 Yük hücresi (loadcell)

Sabit bir cisim/malzemeye dışarıdan bir kuvvet uygulandığı zaman cisim bünyesinde şekil değiştirmeler meydana gelir ve bu şekil değişimlerine bağlı olarak gerilme dağılımları ortaya çıkar. Birim uzunlukta meydana gelen şekil değişimi **Gerinim (Strain)** olarak tanımlanır. Belirli bir yük altında çalışan bir cisim üzerinde oluşan gerilmeler direk olarak ölçülemez fakat gerilim ve gerinim arasındaki ilişki bilinirse gerilmeler hesaplanabilir. Gerinimlerin ölçülmesi ise deneysel olarak mümkündür. Mekanik bir iletken mekanik bir zorlama altında uzarsa (şekil değiştirirse) elektriksel direncide değişir. Bu fiziksel olay gerinim ölçme tekniğinin temelini oluşturmaktadır. Gerinim değerleri ise **Uzama Telleri (Strain-Gauge)** yardımıyla ölçülebilir. Şekil 3.1'de örnek bir strain-gauge gösterilmiştir. Ölçüm bu strain-gauge'lerin malzeme üzerine yapıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Uygulama türüne göre farklı tipler kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Strain gauge (Uzama Telleri).

Strain-gauge'lerde meydana gelen çok küçük direnç değişimlerinin, kullanılabilir elektriksel büyüklüklere çevrilmesi için en uygun yöntem wheatstone köprüsü devresini oluşturmaktır. Wheatstone köprüsü endüstride pek çok parametrenin ölçümünde bir referans seviyesi esas alınarak, karşılaştırmalı sinyal üretiminde kullanılan bir devredir (Şekil 3.2).

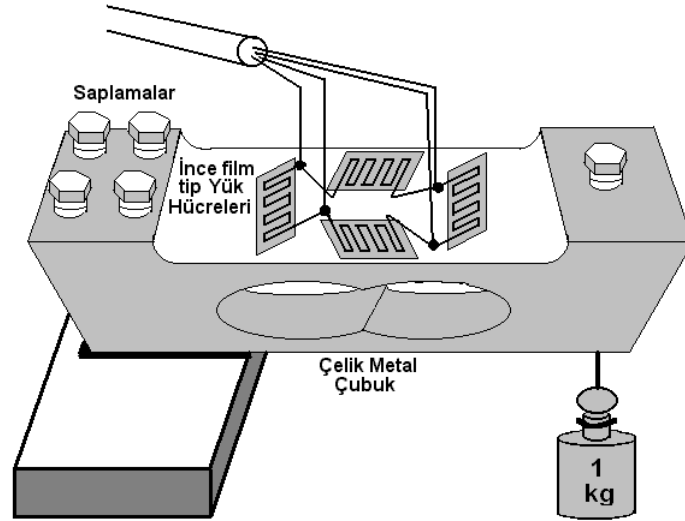


Şekil 3.2. Wheatstone köprüsü.

Yukarıda resmi görülen Wheatstone köprüsü çalışma prensibi olarak eğer R1, R2, R3 ve Rg dirençleri birbirine eşitse Vcc beslemesi köprü girişine uygulandığında B ve D çıkışında herhangi bir voltaj okunmaz. Yani çıkış sıfırdır. Eğer yük hücresinin Rg'ye bağlı olduğu bacakta uygulanan yükten dolayı strain-gauge' in direnci değişirse çıkış terminalinde voltaj artmaya başlar. G köprü dizaynı da denilen bu yöntemde Rg direnci, uygulanan kuvvetle direnci değişir. Strain gauge'ler Wheatstone köprüsüne 1 tane bağlanabileceği gibi 2, 3 ve 4 bacağına da sabit dirençler yerine strain-gauge bağlanabilir. 4 köprülü uygulamalarda 2 strain-gauge gerilme kuvvetini pozitif yönde ölçerken diğer iki

strain-gauge sıkıştırma kuvvetini negatif etkisini ölçer. Bu durumda çıkış sinyali dört adet strain-gauge, uygulanan kuvvetlerin yarattığı gerilim kuvvetleriyle orantılı bir çıkış olur. Dört strain-gauge'li uygulamada ana test çubuğuna her yönden gelen kuvvetlerle, gerilme, kesilme ve eksensel etkili kuvvetler beraber ölçülmüş olur.

Strain gauge'ler imal edildikten sonra kuvvet, yüklenme, basınç, tork ve ağırlık ölçümünde kullanılmak üzere uygun metal çubuk ve diyaframlara monte edilir. Bu elemanlar **Yük Hücresi (Load Cell)** olarak adlandırılır. Aşağıda ağırlık ölçümünde kullanılan Yük Hücresi montajı görülmektedir. Wheatstone köprüsü bağlantısına özellikle dikkat edilmelidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Yük hücresi (Load Cell).

Strain-gaugeler 4 adet olmak üzere çelik karkas üzerine monte edilmiştir. Dizayn olarak aşağı yukarı, ileri ve geri bölgelerden gelen tüm hareket ve kuvvetleri ölçebilecek kabiliyettedir. Çünkü bu bölgelerden gelen herhangi bir gerilmeye karşı dört strain-gauge' den biri mutlaka cevap verecektir. Ayrıca bu dört strain-gauge Wheatstone köprüsünün her bir bacağına monte edildiğinden çevre sıcaklığındaki bir artış hepsini aynı oranda etkileyeceğinden farklı direnç uyumsuzluğu da ortadan kalkacaktır. Strain-gauge'ler Epoxy reçine üzerine moleküler olarak sıcak erimiş püskürtme ile kalıplandığından atomlar arasında moleküler bağlantı güçlü olup üzerindeki iletken kanalları aynı anda çalışacaktır. Bu ince film imalatı strain gauge'ler kuvvetli bir yapıştırıcı ile metal çubuk

üzerine yapıştırılmış ve bağlandığı yüzey ile beraber hareket etmektedir. Dolayısıyla uygulanan kuvvet nedeniyle metal yüzeyindeki esneme strain-gauge iletkenlerini de uzatıp kısaltacağından iç direnç değişimi nedeniyle bir sinyal üretilmesine neden olacaktır. Bu sinyal sonra yükseltip, doğrusal hale getirilir ve bir elektronik indikatörde belirlenen “Ölçüm Aralığı”nda ağırlık bilgisi olarak gösterilir.

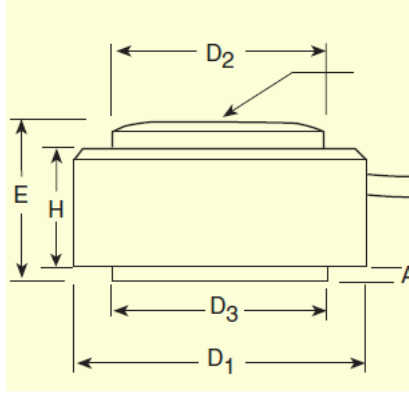
Taban taşı derinliğini belirlemek üzere tasarlanan sensorun üzerine monte edildikten sonra, yük hücrelerinin kalibrasyonu, bir kalibrasyon seti üzerinde konik uç üzerine ağırlık koyularak elde edilen veriler mV cinsinden okunarak yapılmaktadır.

Dolayısıyla uygulanan kuvvet nedeniyle metal yüzeyindeki esneme strain\_gauge iletkenlerini de uzatıp kısaltacağından iç direnç değişimi nedeniyle bir sinyale iletilmesine neden olmakta ve mV cinsinden bir çıktı vermektedir.

### **3.1.2 Yük hücresi seçimi**

Bıçağın toprakta ilerlemesi sonucu meydana gelebilecek toprak direncini minimuma indirebilmek için bıçak kesitinin olabildiğince küçük alana sahip olması oldukça büyük önem taşımaktadır. Bıçak kesitine yerleştirilecek olan yük hücrelerinin seçimi bu nedenden dolayı olabildiğince küçük çapta seçilmiştir. Seçilen minyatür yük hücresi 12.7 mm çapındadır.

Yük hücresinin ölçüm aralığının belirlenmesinde daha önce yapılmış benzer çalışmalar dikkate alınmış ve bu çalışmalarda kullanılan ölçüm aralığı olan 1-10 kN seçilmiştir (Chung S. O. et al., 2006). Yük hücresine ait teknik özellikler aşağıdaki tablo (3.1) da verilmektedir.



Şekil 3.4 (a) Seçilen yük hücresi.



Şekil 3.4 (b) Seçilen yük hücresi.

Çizelge 3.1 Yük hücresi teknik bilgileri.

Ölçüm Aralığı (kN)	D1	D2	D3	E	H	A
1-10	12.7	10.16	7.62	9.53	8.13	0.254

### 3.1.3 Solid Works paket programı

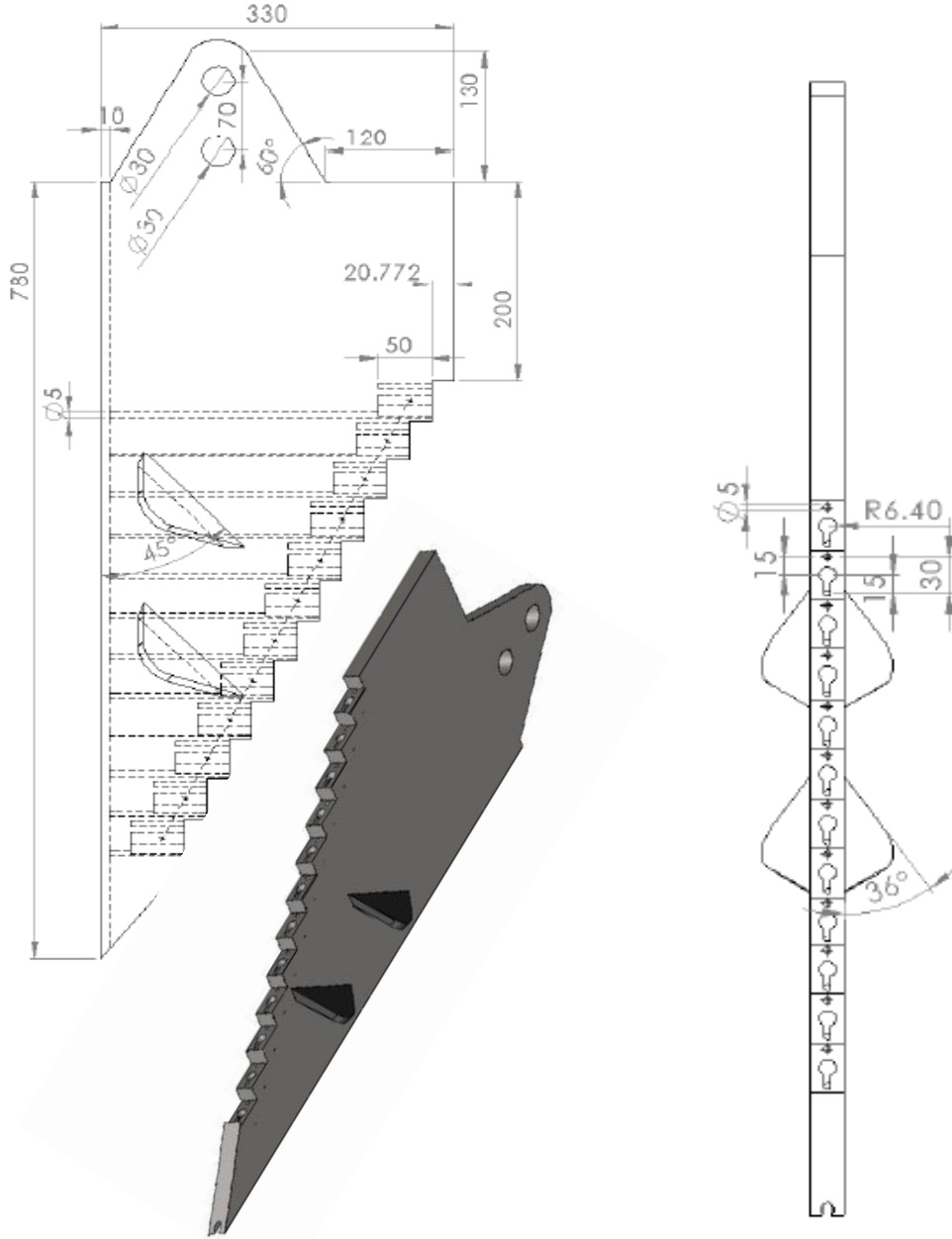
Taban taşı derinliğini tesbit etmek amacıyla, toprak direnci ölçüm sensörünün tasarım ve çizimleri solid Works programı kullanılarak yapılmıştır.

#### • Bıçak

Bıçak tasarımı sırasında bıçağın şekli kesintisiz ölçüm alabilmemizi sağlayacak şekilde, Alloy Steel malzemesi seçilerek ve güven katsayısı 3.22 hesaplanarak tasarlanmıştır. İlk 15 cm'lik toprak tabakasında toprak işlemenin olacağı ve bu derinlikte sıkışık tabakanın oluşmamasından dolayı sensör ilk 15 cm'lik kısmında ölçüm yapmamaktadır.

Sensör 15- 50 cm toprak derinliğinde, her 4 cm'de bir ölçüm alacak, 8 tane yük hücresi taşıyabilecek şekilde ve 25 mm kalınlıkta tasarlanmıştır.

Yük algılayıcılardan gelen sinyalleri transfer eden kabloların çıkışı için bıçağın arka kısmında, şekil (3.5)'de görüldüğü gibi delikler tasarlanmıştır.



**Şekil 3.5.** Ana gövde (bıçak).

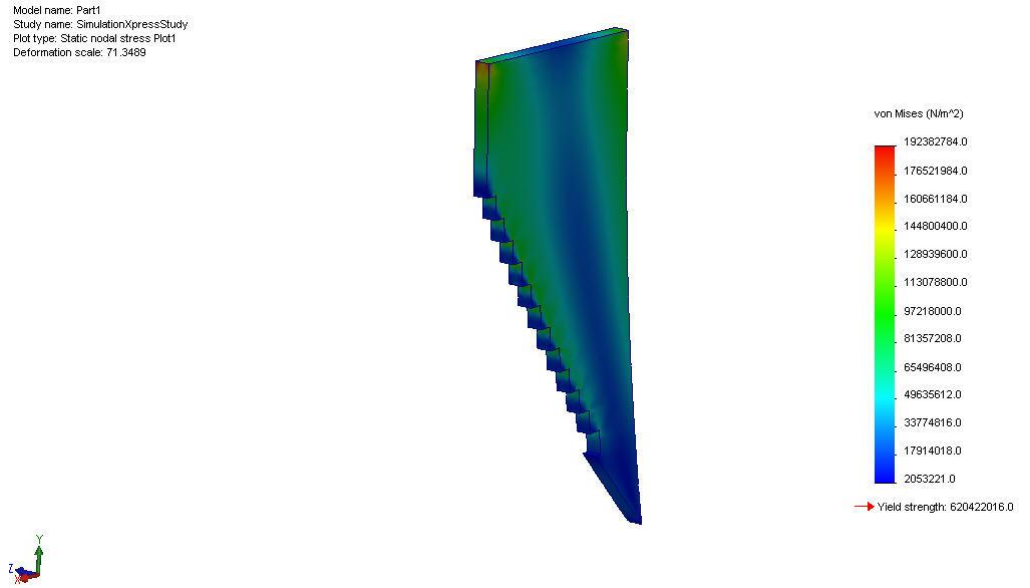
Bu çalışmada, bilgisayar destekli gerilme analizleri, COSMOSXpress analiz programı yardımıyla yapılmıştır. COSMOSXpress SolidWorks çizim yazılımı kullanıcıları için gerilme analizleri yapılması amacıyla önerilmektedir. Dolayısıyla, gerçek koşullarda uygulanan yükün simülasyonu COSMOSXpress programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çizim analizi sonuçları doğrusal statik analiz esasında ve materyalin izotropik olduğu farz edilerek, aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir:

Hooke kanununa göre, materyalin yüke karşı davranışının doğrusal olduğu belirlendi.

Meydana gelen uzama miktarı çok az olduğu için, yükten dolayı bıçağın kalınlığında bir değişimin gerçekleşmesine gerek görülmedi.

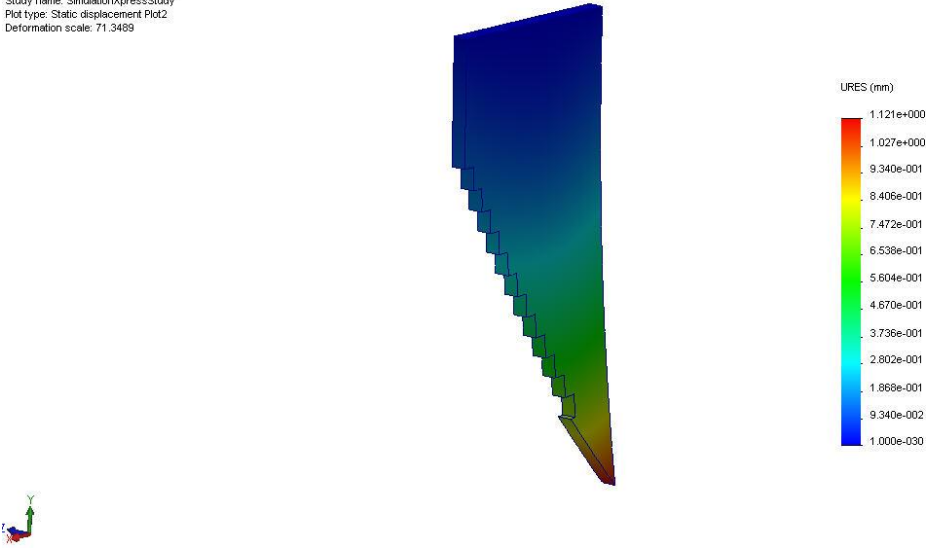
Dinamik etkilerin giderilmesi amacıyla, kuvvetler yavaş yavaş uygulanmıştır.

Yukarıda belirlenen sonuçlara rağmen, gerçek koşullarda yapılan deneylerden elde edilen bilgilerin dikkate alınması gerekmektedir (Analiz ile ilgili detaylı bilgiler Ek.1’de verilmiştir).



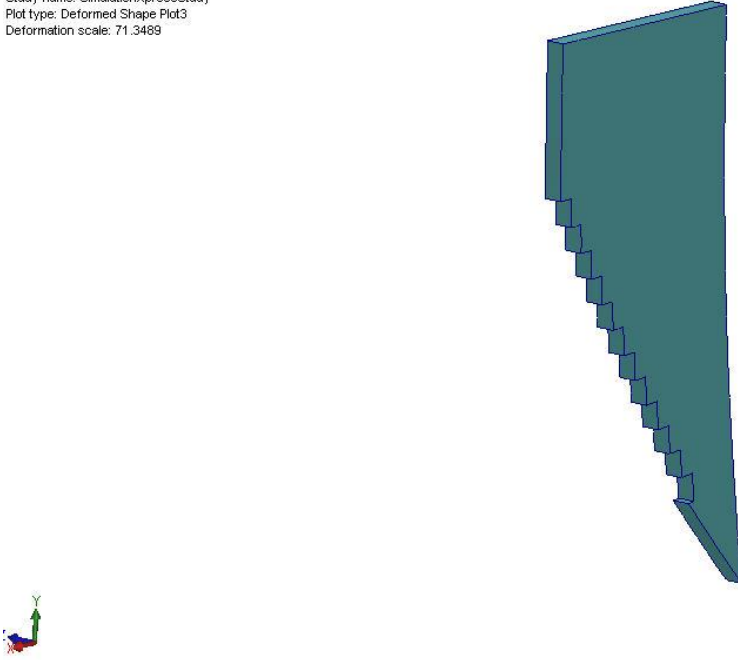
Şekil 3.6 (a) Gerilme analizi.

Model name: Part1  
Study name: SimulationXpressStudy  
Plot type: Static displacement Plot2  
Deformation scale: 71.3489



Şekil 3.6 (b) Uzama analizi.

Model name: Part1  
Study name: SimulationXpressStudy  
Plot type: Deformed Shape Plot3  
Deformation scale: 71.3489

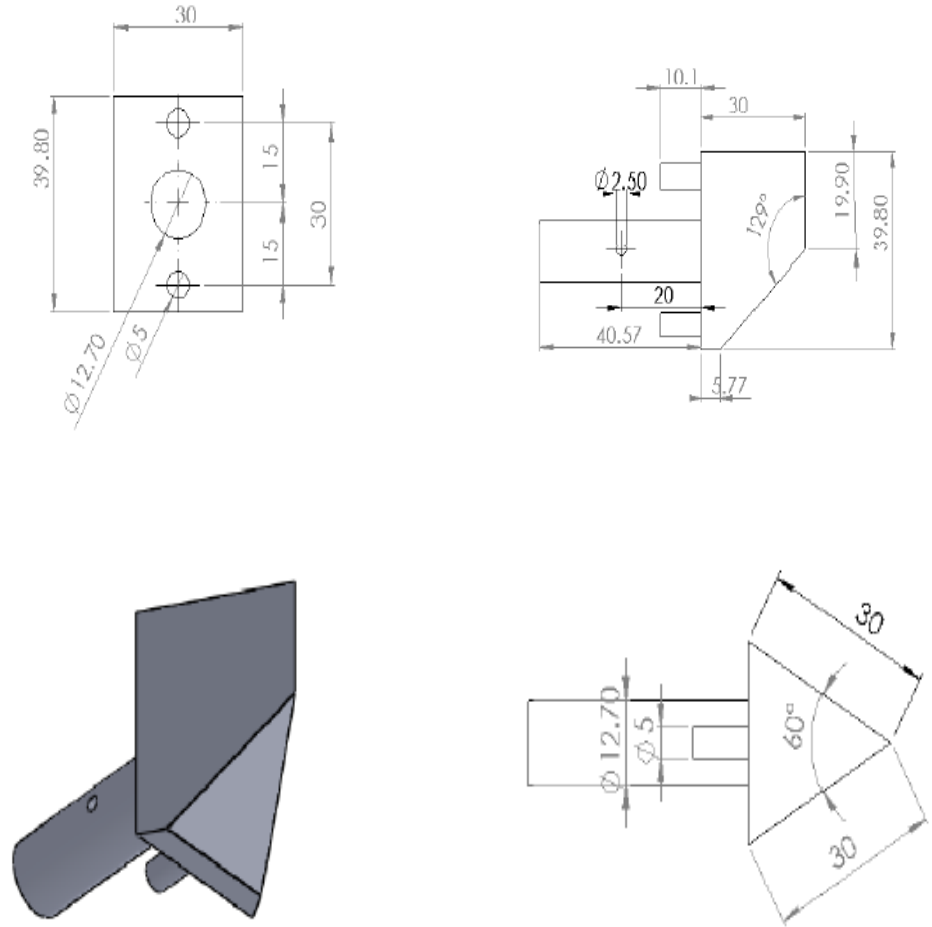


Şekil 3.6 (c) Deformasyon analizi.



### • Algılayıcı uç (Prob)

Algılayıcı uç toprağın her 4 cm'lik tabakasının direncini yük algılayıcılara iletebilmesi için tasarlanmıştır. Sensör, yük algılayıcıların çapına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım parametrelerini optimize etmek amacıyla, simülasyonda kullanılan modelde boyutlar ve algılama elemanlarının koordinatı ve aralarındaki boşluğun minimize edilmesi göz önüne alınmıştır. Bu optimizasyon esas alınarak  $11.94 \text{ cm}^2$  kesit alanı ve  $60^\circ$  kesim açısı özelliklerini taşıyan bir prizmatik prob tipi seçilmiştir (Chung S. O. and Sudduth K. A., 2006) (şekil 3.7). Algılayıcı ucun sensöre montajı sırasında, şekilde görülen delikten (şeki 3.7), bir pimin geçmesi sayesinde algılayıcı uçların hareket esnasında bıçaktan çıkması önlenmiş olmaktadır.



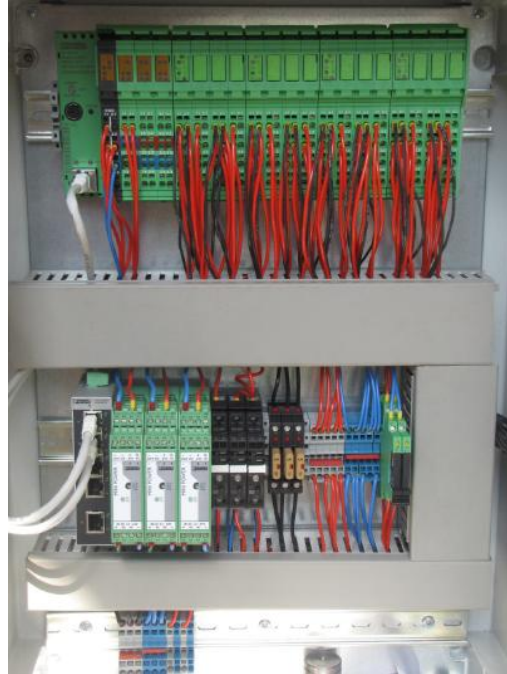
Şekil 3.7. Algılayıcı uç.

### 3.1.4 PLC sistemi

Verileri toplamak ve depolamak için yük hücrelerinin veri çıkışını algılayabilecek özellikte bir PLC sistemi seçilmiştir. Kullanılan bu sistemin görüntüsü şekil 3.8.a ve şekil 3.8.b’de verilmiştir.



Şekil 3.8.a PLC sistemi veri ekranı.



Şekil 3.8.b PLC sistemi.

## 3.2 Yöntem

- İmalat
- Montaj
- Kalibrasyon

### 3.2.1 İmalat

Bıçak imalatı malzeme seçiminin ardından lazer kesim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bıçak üzerine yük hücrelerinin konulacağı delikler açılarak ana gövde hazırlanmıştır. Bıçak malzemesi ile aynı olan algılayıcı uçların imalatı yapılmıştır. Bütün parçalar imalat için hazır hale getirilmiştir şekil(3.9).

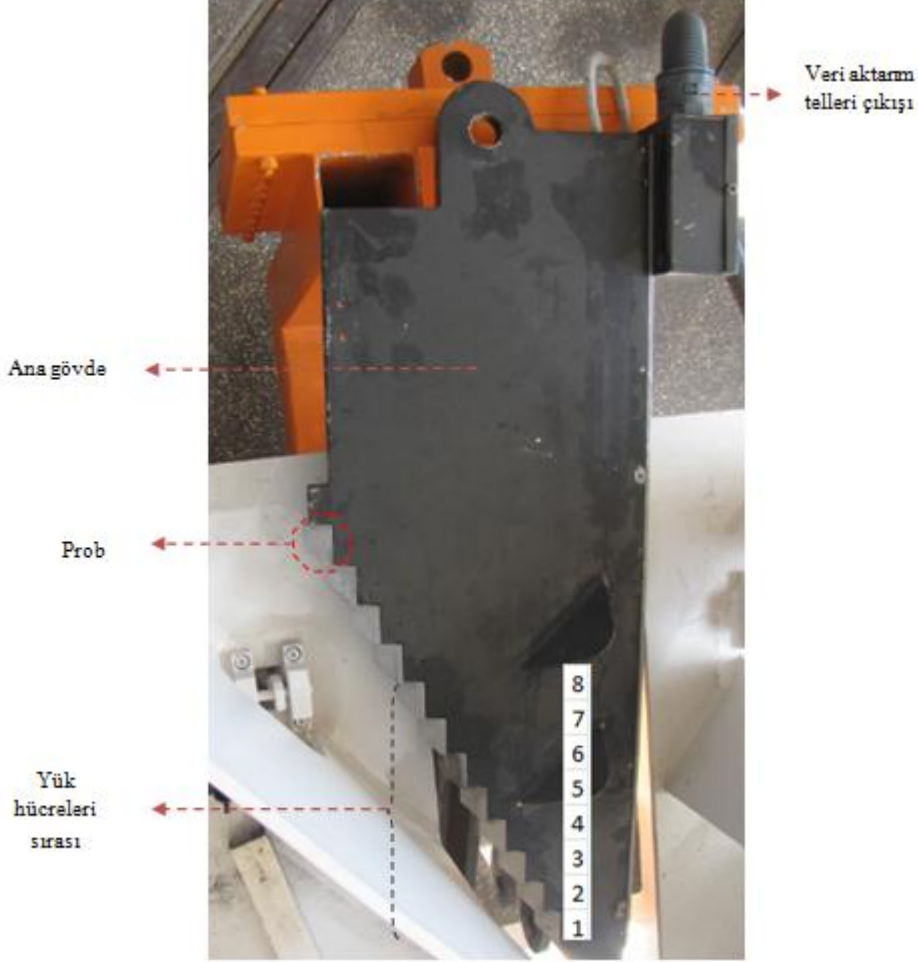


Şekil 3.9. Ana gövde imalattan sonra.

### 3.2.2 Montaj

İmalat bittikten sonra ilk olarak bıçak üzerindeki deliklere yük hücreleri yerleştirilmiştir. İkinci aşamada ise algılayıcı uçlar yük hücrelerinin üzerinde oturacak şekilde, pimler yardımı ile sabitlenmiştir. Yük hücrelerinden gelen sinyalleri iletmek için kullanılan kablolar bıçağın arkasındaki deliklerden geçirilerek PLC sistemine monte edilmiştir.

Bıçak ve PLC sisteminin montajı sonrasında yük hücrelerinden veri aktarma amacıyla çıkan teller PLC sistemine bağlanıp sensör ölçüm için hazır bir hale getirilmiştir şekil (3.10)



Şekil 3.10. Sensör, prob, yük hücreleri ve veri aktarım telleri çıkışı.

### 3.2.3 Kalibrasyon

Sensörün kalibrasyonu için bıçak yatay yönde yatırılmış ve herbir yük hücresi 20,40,60,80,100,120,140 ve 160 kg ağırlıklar kullanılarak yüklenmiş şekil (3.10) ve buna karşılık gelen kg değerleri PLC sisteminde okunarak excel ortamına kaydedilmiştir. Bu değerler daha sonra grafiğe dökülerek herbir yük hücresi için ayrı ayrı kalibrasyon eğrisi ve denklemleri bulunmuştur. Aşağıda yük hücrelerine ait kalibrasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.11. Kalibrasyon için sensörün yüklenmesi.

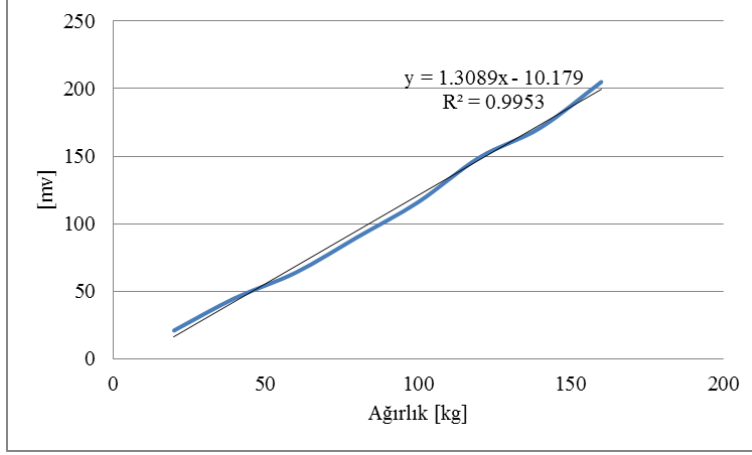
### 3.2.3.1 Kalibrasyon verileri

Çizelge 3.2 Kalibrasyon verileri.

Ağırlık (kg)	1.loadcell	2.loadcell	3.loadcell	4.loadcell	5.loadcell	6.loadcell	7.loadcell	8.loadcell
20	21	20.3	24.8	26	20.1	34.5	23.8	27.3
40	45	41	48.7	53	42.3	64.5	51.7	53.2
60	64	64	76	86	63.5	104	78.2	77
80	90	91	98	108	89	126.3	93	118
100	116	110	110.8	130	116.2	168.5	119.5	130.3
120	149	143	138	154	142.5	191	145.6	160
140	171	174	183	184	165.3	213	194	182.5
160	205	213	208	215	180.5	240	223	212.6

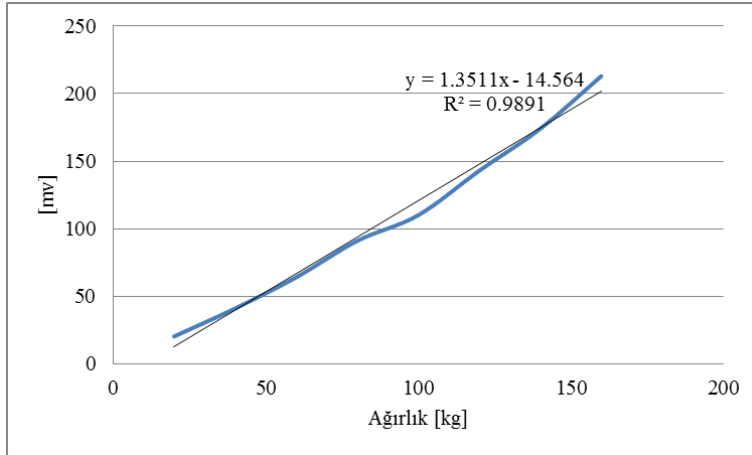
### 3.2.3.2 Kalibrasyon eğrileri

#### • 1. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



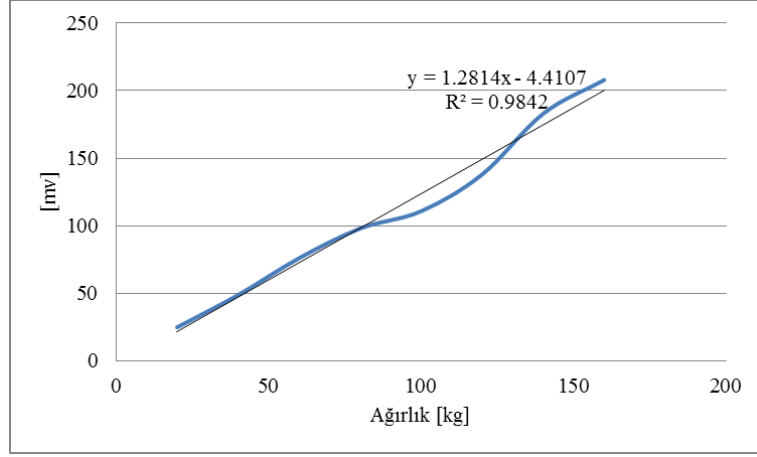
Şekil 3.12. Birinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi.

#### • 2. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



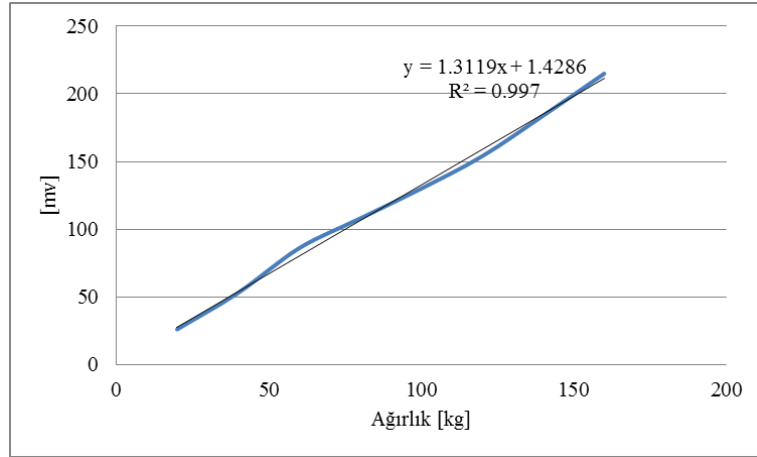
Şekil 3.13. İkinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi

- 3. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



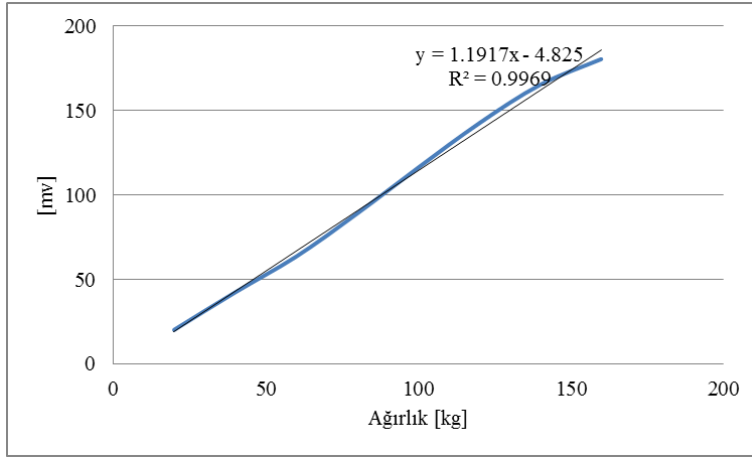
Şekil 3.14. nc yk hücresi kalibrasyon eğrisi.

- 4. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



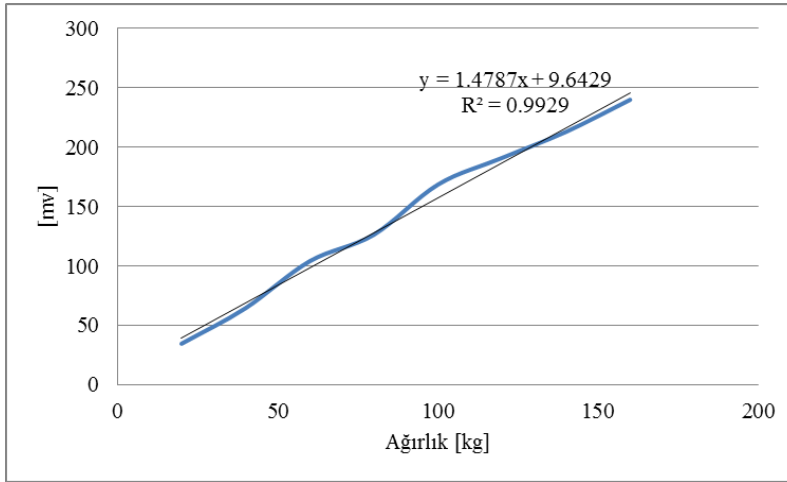
Şekil 3.15. Drdnc yk hücresi kalibrasyon eğrisi.

- 5. Yk hresi kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.16. Beşinci yk hresi kalibrasyon eğrisi.

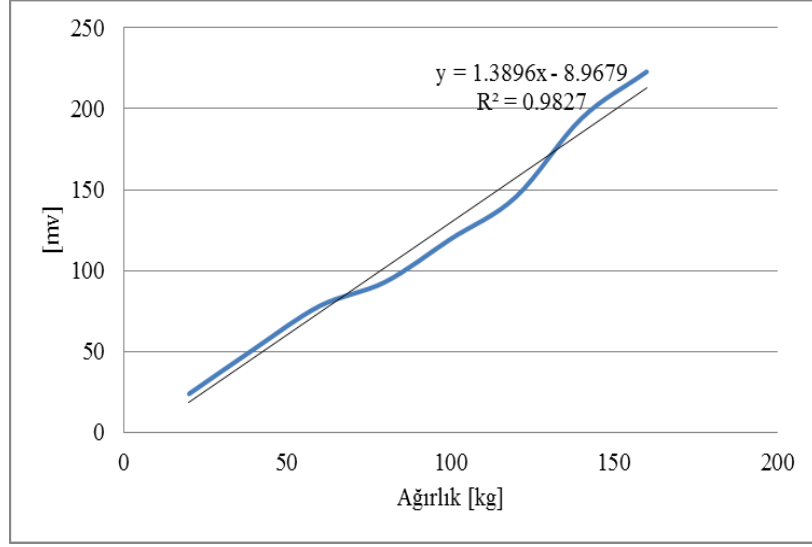
- 6. Yk hresi kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.17. Altıncı yk hresi kalibrasyon eğrisi.

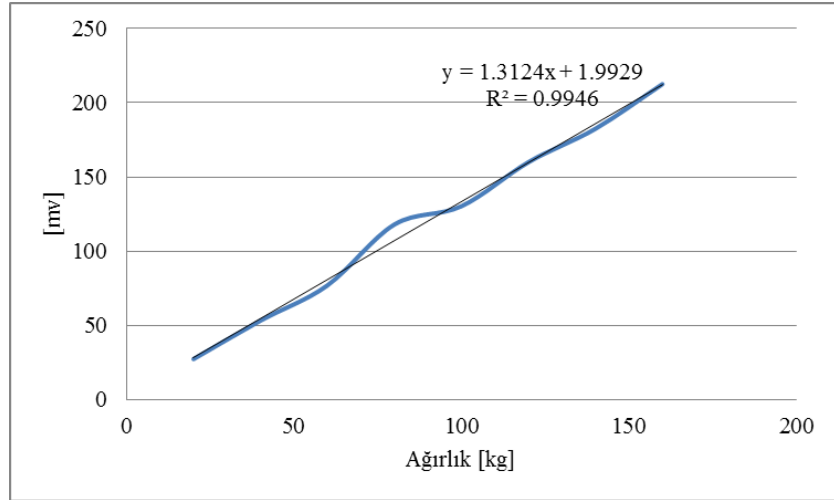


- 7. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



Şekil 3.18. Yedinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi.

- 8. Yük hücresi kalibrasyon eğrisi



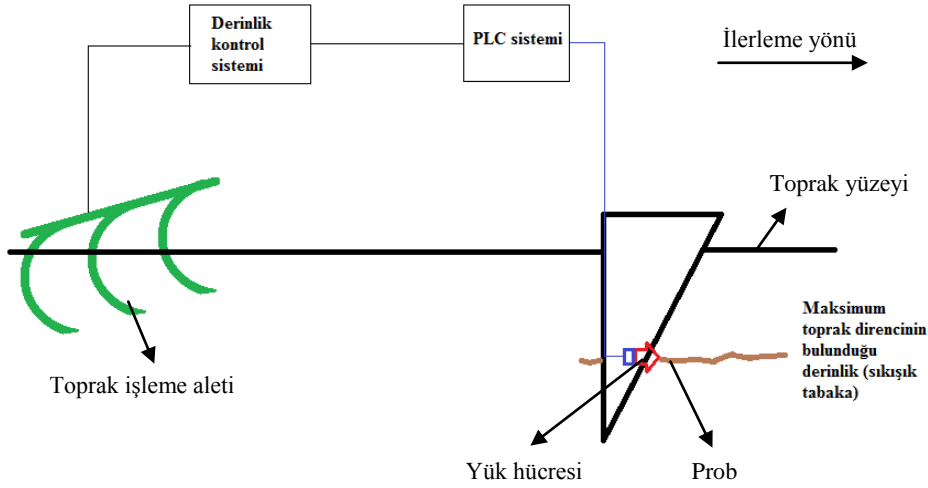
Şekil 3.19. Sekizinci yük hücresi kalibrasyon eğrisi.

#### 4. SONUÇ

Bu sensör, değişken derinlikte toprak işleme yapan bir sistem gelişmesi için yapılmıştır. Sistemde traktörün önünde giden bu sensör toprak direncinin değişik derinliklerde ölçmekte ve elde edilen verilerin en yüksek olanı PLC sistemi yardımı ile algınlıp PLC'ye tanımlanacak olan yazılım yardımıyla tabantaşı derinliğini (toprak direncinin en yüksek olduğu derinlik) belirlemektedir. Böylece gelecekte bu kontrol sistemi yardımıyla arkadaki toprak işleme aletinin iş derinliği anlık olarak taban taşı derinliğine bağlı olarak ayarlanabilecektir.



Şekil 4.1. Değişken derinlikte toprak işleme sisteminin simülasyonu.



Şekil 4.2. Değişken derinlikte toprak işleme sisteminin şeması.

## 5. TARTIŞMA

Özet olarak, şimdiye kadar yapılan tüm çalışmalar sonucunda sıkışan katmanın tespiti gerçek zamanlı olarak yapılmaya çalışılmamıştır. Bazı araştırmacılar sıkışan katmanın derinliğini ve pozisyonunu dikkate almadan toprak mekanik direncini çeşitli metodlar ile belirlemeye çalışmışlardır. Diğer araştırmacılar ise farklı derinliklerdeki sıkışan katmanları hareketli olarak belirlemeye çalışmışlar fakat hiç biri katmanların arazideki pozisyonunu ortaya koyamamıştır. Günümüzde halen toprak sıkışıklığının arazideki derinliğini ve pozisyonunu uygun derinlik çözünürlüklerinde belirlemek amacıyla yapılabilecek bir çok araştırma potansiyeli bulunmaktadır. Toprak sıkışıklığının belirlenmesinde toprak işleme bacağı üzerine gelen yüklerin değerlendirilmesinde, düz yüzeyli bacakların üzerine gelen yüklerin dağılımı, kanat dizaynının temelleri ve metodolojisi hakkında günümüzde yeterli ve tatmin edici araştırmalar henüz gerçekleştirilmemiştir.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Adamchuk, V. I.; Skotnikov, A.V.; Speichinger, J. D. and Kocher M. F.,** 2003, Instrumentation system for variable depth tillage. ASAE Paper No. 031078. Annual International Meeting. Lasvegas, Nevada, USA, 27-30 July.
- Adamchuk, V.I.; Morgan, M. T. and Sumali, H.,** 2001, Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. Transactions of the ASAE. 44 (6): 1377-1383.
- Alihamsiyah, T.; Humphries, E.G.; Bowers, C.G. and Jr.,** 1990, A technique for horizontal measurement of soil mechanical impedance. Transaction of the ASAE, 33 (1): 73-77.
- Andrade, P. and Upadhyaya, S. K.,** 2004, Development and evaluation of UC Davis compaction profile sensor. AgEng conference. Leuven, 12-16 September.
- Andrade, P.; Rosa, U.; Upadhyaya, S. K.; Jenkins, B.; Augera, J. and Josiah, M.,** 2001, Soil profile force measurements using an instrumented tine. Presented at the 2001 ASAE Annual International Meeting. 28 July-1 August. Paper No. 011060. ASAE, 2950 Niles Road, St.Joseph. MI 49085-9659 USA.
- Andrade, P.; Upadhyaya, S. K.; Jenkins, B. M. and Filho, A. G. S.,** 2002, Evaluation of the UC Davis compaction profile sensor. Presented at the ASAE Annual international Meeting / CIGR XVth World Congress. 28-31 July. Paper No. 021185. ASAE, 2950 Niles Road, St.Joseph. MI 49085-9659 USA.
- ASAE Standards S3133.,** 2003, Soil cone penetrometer, Revised Feb 04, St.Joseph, MI: ASAE.
- Blackmore, S. and Wulfsohn, D.,** 2003, Precision Farming around the world. [www.cpf.kvl.dk](http://www.cpf.kvl.dk) (Erişim tarihi: 3 Nisan 2012)

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Boone, F. R. and Veen, B. W.,** 1994, Mechanics of crop response to soil compaction. In: **Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C.** Soil compaction in crop production. Development in Agricultural Engineering 11. Elsevier, Amsterdam. 662 pp.
- Campbell, D. J.,** 1994, Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction: In **Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C.** Soil compaction in crop production. Development in Agricultural Engineering 11. Elsevier, Amsterdam. 662 pp.
- Chancellor, W. J.,** 1971, Effect of compaction in soil strength. In: Compaction of agricultural soils. ASAE, 471 pp.
- Chung, S. O.; Sudduth, K. A. and Hummel, J. W.,** 2003, On-the-go Soil Strength Profile sensor using a load cell array. ASAE Paper No. 031071. Annual International Meeting. Lasvegas, Nevada, USA, 27-30 July.
- Chung, S. O.; Sudduth, K. A. and Hummel, J. W.,** 2006, Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351, Vol. 49(1): 5-14.
- Chung, S. O.; Sudduth, K. A.,** 2006, Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351, Vol. 49(4): 851-863.
- Chung, S. O.; Sudduth, K. A.; Plouffie, C. and Kitchen, N. R.,** 2004, Evaluation of an on-the-go soil strength profile sensor using soil bin and field data. ASAE Paper No. 041039. Annual International Meeting. Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August.
- Drummond, P.E.; Christy, C.D.; Lund, E.D.,** Using an Automated Penetrometer and Soil EC Probe to Characterize Rooting Zone. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, MN, USA, July 27-30, 2000; pp. 34-54.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Earl, R.; Wheeler, P. N.; Blackmore, B. S. and Godwin, R. J.,** 1996, Precision farming-the management of variability. *Landwards*, 51 (4): 18-23.
- Eriksson, J.; Hakansson, I. and Danfos, B.,** 1974, The effect of soil compaction on soil structure and crop yield. *Bull. 354*, Swedish Institute Agricultural Engineering, Uppsala, Sweden. (Eng. Trans. By J. K. Aase).
- Glancey, J. L.; Upadhyaya, S. K.; Chancellor, W. J. and Rumsey, J. W.,** 1989, An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. *Soil and Tillage Research*. 14: 1-24.
- Godwin, R. J.,** 2003a, Field condition mapping technologies. Presented at Iranian Agricultural Research Institute, Karaj, Iran. June.
- Godwin, R. J.,** 2003b, Routes to degradation: Basic mechanics, assessment and alleviation of soil compaction. Lecture, Cranfield University at Silsoe.
- Godwin, R. J. and Miller, P. C. H.,** 2003, A review of the technologies for mapping within-field variability. *Biosystems Engineering*. 84 (4): 393-407.
- Gorucu, S.; Khalilian, A.; Han, Y. J.; Dodd, R. B. and Smith, B. R.,** 2003, Developing an algorithm to determine the tillage depth from soil penetrometer data in coastal plain soils. ASAE Paper No. 031074. Annual International Meeting. Lasvegas, Nevada, USA, 27-30 July.
- Guerif, J.,** 1994, Effect of compaction on soil strength parameters. In: **Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C.** Soil compaction in crop production. *Development in Agricultural Engineering 11*. Elsevier, Amsterdam. 662 pp.
- Jones, A. J.,** 2003, Soil Compaction Tips. Nebraska Cooperative Extension NF95- 243. [www.ianr.unl.edu/pubs/soil/nf243.HTM](http://www.ianr.unl.edu/pubs/soil/nf243.HTM) (Erişim tarihi: 25 Şubat 2012)
- Koostra, B. K. and Stombaugh, T. S.,** 2003, Development and Evaluation of a sensor to continuously measure air permeability of soil. ASAE Paper No. 031072. Annual International Meeting. Lasvegas, Nevada, USA, 27-30 July.

## **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Lui, W.; Upadhyaya, S.K.; Kataoka, T. and Shibusawa, S.,** 1996, Development of a texture/soil compaction sensor. Proceeding of the Third International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis, Minnesota. June 23-26. ASA/CSSA/SSSA. 617- 629.
- Manor, G. and Clark, R. L.,** 2001, Development of an instrumented subsoiler to map soil hard-pans and real-time control of subsoiler depth. Presented at the 2001 ASAE Annual International Meeting. 30 July-1 August. Paper No. 011022. ASAE, 2950 Niles Road, St.Joseph. MI 49085-9659 USA.
- McBride, R.A.; Martin, H.; and Kenedy, B.,** 2003, Soil compaction. [www.gov.on.ca/DMAFRA/english/crops/facts/88-082.htm](http://www.gov.on.ca/DMAFRA/english/crops/facts/88-082.htm) (Erişim tarihi: 4 Nisan 2012)
- McKyes, E.; Negi, S.; Douglas, E.; Taylor, F. and Raghavan, G. S. V.,** 1979, The effect of machinery traffic and tillage operations on the physical properties of a clay yield of silage corn. J. Agr. Eng. Res. 24: 143-148.
- McKyes. E.,** 1985, Soil cutting and tillage. Developmen in Agricultural Engineering 7. Elsevier, Amsterdam. 217 pp.
- Mouazen, A. M.,** 2003, Development of a methodology for the on-line detection of soil compaction in arable fields with a view to refine decision support system in precision agriculture.
- Negi, S.C.; McKyes, E.; Raghavan, G.S.V. and Taylor, F.,** 1981, Relationships of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. J. Terramechanics. 18 (2): 81-90.
- Porterfield, J.W.; Carpenter, T.G.,** Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. Trans. ASAE 1986, 29, 917-922.
- Raghavan, G. S. V.; Alvo, P. and McKyes, E.,** 1990, Soil compaction in agriculture: A view towards managing the problem. Advance in Soil Science, 11: 1- 36.
- Raghavan, G. S. V.; McKyes, E. and Beaulieu, B.,** 1977, Prediction of clay soil compaction. Journal of Terramechanics. 14 (1): 31-38.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Raghavan, G. S. V.; McKyes, E. and Taylor, F.,** 1979, The relationship between machinery traffic and corn yield reductions in successive years. Transaction of the ASAE, 22: 1256-1259.
- Raper, R.,** 2002, Development of a dynamic cone penetrometer for research and private use. Presented at the ASAE Annual international Meeting / CIGR XVth World Congress. 28-31 July. Paper No. 021048. ASAE'2950 Niles Road, St.Joseph. MI 49085-9659 USA.
- Raper, R. L.; Asmussen, L. E. and Powell, J. B.,** 1990, Sensing hard pan with ground penetrating radar. Trans. ASAE, 33 (1): 41-46.
- Richards, T.,** 2000, Development of a system for mapping the performance of agricultural field operations. EngD Thesis, unpublished. Cranfield University at Silsoe, Bedford, Uk
- Sharifi, A.,** 2004, Deveopment of a Soil Compaction Profile Sensor. PhD thesis. Cranfield University at Silsoe National Soil Resources Institute Engineering Group.
- Sirjacobs, D.; Hanquet, F.; Lebeau, F. and Destain, M. F.,** 2002, On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. Soil & Tillage Research, 64: 231-242.
- Soane, B. D. and Blackwell, P. S.; Dickson, J. W. and Painter, D. J.,** 1980/1981, Soil and wheel characteristics. Soil & Tillage Research, 1: 207-237.
- Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C.,** 1994, Soil compaction in crop production. Development in Agricultural Engineering 11. Elsevier, Amsterdam. 662 pp.
- Soane, B. D.; Dickson, J. W and Campell, D. J.,** 1982, Incidence and control of compaction in crop production. Soil & Tillage Research, 2: 3-36.



## **KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Soane, B.D.**, 1985, Traction and transport as related to cropping systems. Proceeding of International Conference on Soil Dynamics, Auburn, AL, U.S.A., 5: 863-935
- Stafford, J. V. and Hendrick, J. G.**, 1985, Dynamic control of pan rupturing tines. ASAE Paper No.85-1547, ASAE, St.Joseph, MI.
- Stafford, J. V. and Hendrick, J. G.**, 1988, Dynamic sensing of soil pans. Transaction of the ASAE, 31 (1): 9-13.
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R. and Drummond, S.T.; Boller, G. A.; Bullock, d. G. and Chung, S. O.**, 2002, Soil strength for quantifying within-field variability. ASAE Paper No. 021182. Annual International Meeting. Chicago, Illinois, USA, 28-31 July.
- Sun, Y.; Ma, D.; Lammers, P.S.; Schmittmann, O.; Rose, M.**, On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Till. Res.* **2006**, *86*, 209-217.
- Taylor, H. M.; Roberson, G.M. and Parker, J. J.**, 1966, Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*. 102: 18-22.
- Tekeste, M.Z., T.E. Grift, and R.L. Raper**, 2002, Acoustic compaction layer detection. Presented at the 2002 ASAE Annual international Meeting / CIGR XVth World Congress. 28-31 July. Paper No. 021089. ASAE'2950 Niles Road, St.Joseph. MI 49085-9659 USA.
- Tekin, E.; Kul, B.; Okursoy, R.**, Sensing and 3D mapping of soil compaction. *Sensors* 2008, 8, 3447-3459.
- Topakci M., Unal İ., Canakci M., Celik H. K. and Karayel D.**, Design of a Horizontal Penetrometer for Measuring On-the-Go Soil Resistance. *Sensors* 2010, 10, 9337-9348; doi: 10.3390/s101009337.
- Vaz, C.M.P. and Hoppmans, J.W.**, 2001, Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65 (1): 4-12.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Verschoore, R.; Pieters, J. G.; Seps, T.; Spriet, Y. and Vangeyet, J., 2003,** Development of a sensor for continuous soil resistance measurement. European Conference on Precision Agriculture, 15-19 June, Germany, Berlin. 689-696.
- Waine, T., 1999,** Non invasive soil property measurement for precision farming. Unpublished Engineering Doctorate Thesis, Cranfield University, Silsoe.
- Wells, L.G.; Shearer, S. A.; Fulton, J. P. and Murdock, L.W., 2000,** Assessment of remote sensing for implementation of precision tillage. ASAE Paper No. 001084.
- Zeng, Q.; Sun, Y.; Lammers, P.S.; Ma, D.; Lin, J.; Hueging, H.,** Improvement of dual-sensor horizontal penetrometer by incorporating an EC sensor. *Comput. Electron. Agr.* **2008**, *64*, 333-337.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1982 Tahran doğumlu olan Nasim SEDAGHAT HERFEH; 2001 yılında İran Urmia Üniversitesi Ziraat Fakültesi'nde üniversite öğrenimine başladı. Lisans öğrenimi sonunda, 2009 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda yüksek lisans çalışmasına başlayan SEDAGHAT HERFEH, İngilizce bilmektedir.



## **EKLER**

EK 1 Ana gövdenin, Solid Works paket programında, gerilim, uzama ve deformasyon analizi sonuçları.

1. File Information
2. Materials
3. Load & Restraint Information
4. Study Property
5. Results
  - a. Stress
  - b. Displacement
  - c. Displacement
  - d. Factor of Safety
6. Appendix

## 1. File Information

Model name: Part1  
Model location: C:\Users\rcza\Desktop\Part1.SLDPRJ  
Result location: C:\Users\rcza\Desktop  
Study name: SimulationXpressStudy (Default)

## 2. Materials

No.	Body Name	Material	Mass	Volume
1	Part1	ISWT Alloy Steel	30.5619 kg	0.00395921 m <sup>3</sup>

## 3. Load & Restraint Information

**Fixtures**

Restraint1 -Part1-	on 1 Face(s) immovable (no translation).
-----------------------	--

**Load**

Load1 -Part1-	on 13 Face(s) apply normal force 10000 N using uniform distribution
------------------	--

**4. Study Property****Mesh Information**

Mesh Type:	Solid Mesh
Mesh Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4-Point
Element Size:	15.836 mm
Tolerance:	0.7918 mm
Quality:	High
Number of elements:	8287
Number of nodes:	14396
Time to complete mesh (hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	REZA-PC

**Solver Information**

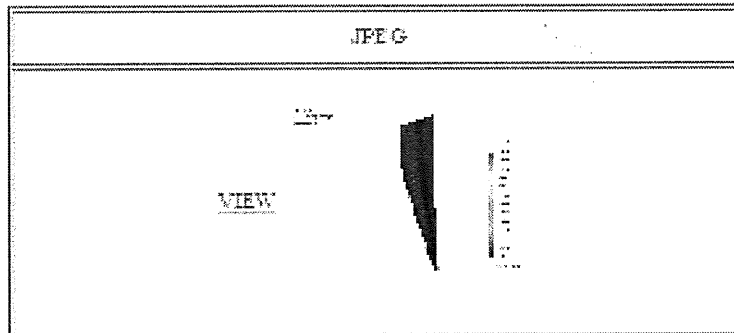
Quality:	High
Solver Type:	Automatic

## 5. Results

### 5a. Stress

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Plot1	VON Mises Stress	1.05522e+005 N/mm <sup>2</sup>	(89.3479 mm, -565.545 mm, - 0.032103 mm)	1.92333e+005 N/mm <sup>2</sup>	(330 mm, 0 mm, 12.5 mm)

Part-Simulation Xpress Study-Stress-Plot1

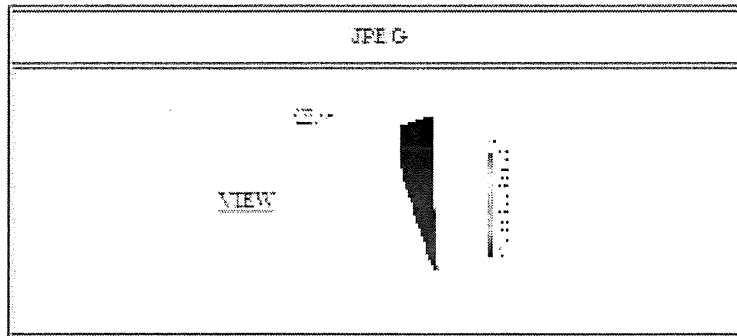


### 5b. Displacement



Name	Type	Min	Location	Max	Location
Plot1	LRFS: Resultant Displacement	0 mm	(0 mm, 0 mm, 12.5 mm)	1.1268 mm	(-78 mm, -762.57 mm, -6327.68 mm)

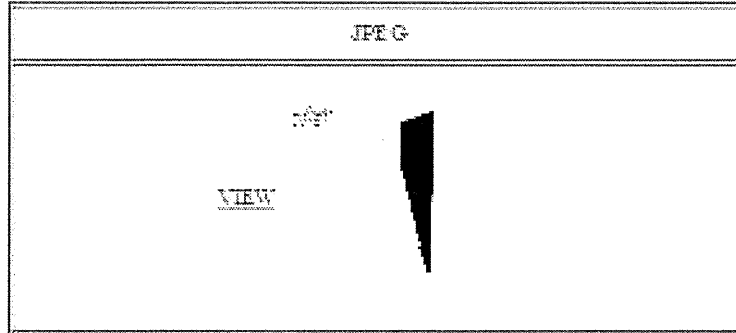
Par1-SimulationXpressStudy-Displacement-Plot1



5c. Displacement

5d. Factor of Safety

Part1-Simulation Xpress Study-Factor of Safety-Plot4



No data available.

### 6. Appendix

Material name:	SW6 Alloy Steel
Description:	
Material Source:	
Material Model Type:	Linear Elastic Isotropic
Default Failure Criteria:	Max von Mises Stress
Application Data:	

Property Name	Value	Units
Elastic modulus	2.1e+011	N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.29	NA
Mass density	7700	kg/m <sup>3</sup>
Yield strength	5.1041e+008	N/m <sup>2</sup>