



**TOPRAĞIN KIVAM LİMİTLERİ VE
SIKIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE
ARITMA ÇAMURUNUN ETKİLERİ**

Armağan CAMBAZTEPE

**Yüksek Lisans Tezi
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı
Toprak Bilimi Bilim Dalı
Doç. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TOPRAĞIN KIVAM LİMİTLERİ VE SIKIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE
ARITMA ÇAMURUNUN ETKİLERİ**

Armağan CAMBAZTEPE

**TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI
Toprak Bilimi Bilim Dalı**

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU



TOPRAĞIN KIVAM LİMİTLERİ VE SIKIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE
ARITMA ÇAMURUNUN ETKİLERİ

Doç. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL danışmanlığında, Armağan CAMBAZTEPE tarafından hazırlanan bu çalışma, 25/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı – Toprak Bilimi Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa Yıldırım CANBOLAT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Uğur ŞİMŞEK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu’nun 01 / 02 / 2018 tarih ve 5 / 36 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOPRAĞIN KIVAM LİMİTLERİ VE SIKIŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE ARITMA ÇAMURUNUN ETKİLERİ

Armağan CAMBAZTEPE

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı
Toprak Bilimi Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL

Topraklara ilave edilen organik madde toprakların fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve mekaniksel özelliklerini geliştirmekle beraber toprak kalitesinin iyileşmesini de sağlamaktadır. Organik atıkların toprak organik madde içeriğini artırmak ve devamlılığını sağlamak için toprağa uygulanması hem çevresel hem de ekonomik olarak en fazla getirisi olan uygulamalardandır. Bu araştırma, farklı tekstürdeki (SL, L, C) toprakların kıvam limitleri ve Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine arıtma çamuru uygulamalarının (%0, %2, %4, %8) etkilerini ortaya koymak amacıyla laboratuvar şartlarında yürütülmüştür. Bu araştırmanın sonuçları, arıtma çamuru (AÇ) uygulamasının toprak mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini ve toprağın sıkışabilirliğini azaltıldığını göstermektedir. Arıtma çamuru uygulaması toprakların organik madde (OM) içeriğini ve agregat stabilitesi (AS) değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Genel ortalama, kontrol seviyesinde OM içeriği %1.43 iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulamaları sonrasında %3.10, 3.38 ve 4.14'e, ortalama AS değeri %31.85'den %36.61, 42.60 ve 49.15'e yükselmiştir. Arıtma çamuru uygulamaları her üç toprağın likit limit (LL), plastik limit (PL), büzülme limiti (BL) ve dağılıbilirlik indeksi (FI) değerlerinde önemli düzeyde ($p<0.05$) artışlar meydana getirmiştir. Uygulama dozları arttıkça değerlerde artışlar meydana gelmiş ve en yüksek değerler en yüksek AÇ uygulama dozlarında (%8) elde edilmiştir. Genel ortalama LL değeri kontrolde %31.85 iken %2, 4, 8 AÇ uygulama dozları sonrasında %13.2, 22.3, 32.0 oranlarında, PL'de de %15.0, 30.3, 41.8 oranlarında artışların meydana geldiği saptanmıştır. Arıtma çamuru uygulamasıyla Proctor sıkışma testinde optimum nem içeriği (OMC) değerlerinin arttığı, maksimum hacim ağırlığı (MBD) değerlerinin azaldığı tespit edilmiş olup, en yüksek OMC ve en düşük MBD değerleri %8 AÇ uygulama dozunda elde edilmiştir. Kontrolleri ile karşılaştırıldığında OMC değerlerinde SL, L ve C tekstür sınıfı toprakları için sırasıyla %73.4, 53.8 ve 27.1 oranlarında artışlar belirlenirken, MBD değerlerinde %9.5, 6.5 ve 13.7 oranlarında azalışların meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, AÇ uygulamaları maksimum sıkışmanın meydana geldiği OMC değerlerinin LL ve PL'ye karşılık gelen oransal değerlerini de artırmıştır. Araştırma sonuçları; AÇ uygulanmış toprakların kontrolleri ile kıyaslandığında daha yüksek nem içeriklerinde daha fazla dağılıbilir olduğunu ve daha az sıkışmanın meydana geleceğini göstermektedir.

2018, 43 sayfa

Anahtar Kelimeler: Arıtma çamuru, kıvam limitleri, Proctor sıkışma testi, toprak mekaniksel özellikleri, işlenebilirlik

ABSTRACT

Master Thesis

INFLUENCE OF SEWAGE SLUDGE APPLICATION ON SOIL CONSISTENCY LIMITS AND SOIL COMPACTIBILITY

Armağan CAMBAZTEPE

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Soil Science and Plant Nutrition
Department of Earth

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ekrem Lütü AKSAKAL

Organic matter addition to soil improves not only the physical, chemical, microbiological and mechanical properties of the soil but also the soil quality. Application of organic wastes to soil is accepted as the most environmentally and economically disposal method to increase the soil organic matter content and ensure its continuity. This study was conducted under laboratory conditions to evaluate the effects of sewage sludge applications (0%, 2%, 4% and 8%) on the consistency limits and the Proctor compaction test parameters of three texturally different soils (SL, L, and C). Results obtained have shown that sewage sludge application significantly enhanced soil mechanical properties and reduced soil compactibility. Sewage sludge application significantly increased soil organic matter content and aggregate stability. Whereas the organic matter content of control soil was 1.43% in general mean, it increased to 3.10%, 3.38%, and 4.14% with 2%, 4%, and 8% sewage sludge application, respectively. Whereas the aggregate stability of control in overall mean was 31.85%, it increased to 36.61%, 42.60%, and 49.15% with 2%, 4%, and 8% sewage sludge application, respectively. Sewage sludge application in all experimental soils significantly ($p<0.05$) increased liquid limit (LL), plastic limit (PL), shrinkage limit (SL), and friability index (FI) values. Increases in the application doses of sewage sludge increased these values and the highest values were obtained from the maximum dose (8%) of sewage sludge application. Application of sewage sludge increased LL values in the ratios 13.2%, 22.3%, and 32.0%, with 2%, 4%, and 8% sewage sludge application, respectively. Similar increases were obtained for PL also. Sewage sludge application decreased maximum dry bulk density (MBD), but increased optimum moisture content (OMC). In all the soils studied, the lowest MBD and the highest OMC were obtained from the highest application dose (8%) of sewage sludge. As compared with the control, the highest sewage sludge application rate (8%) decreased the MBD with the rates of 73.4%, 53.8%, and 27.1% in SL, L and C textured soils, but it increased the OMC values with the rates of 9.5%, 6.5%, and 13.7%. Application of sewage sludge increased water content of liquid limit and plastic limit values of the OMC in which the maximum compaction occurred. Results obtained from this study have shown that application of sewage sludge leads soils more strength to mechanical forces.

2018, 43 pages

Keywords: Sewage sludge, consistency limits, Proctor compaction test, soil mechanical properties, workability

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın her aşamasında bilimsel ve kişisel yardımlarını esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL olmak üzere Sayın Prof. Dr. İlker ANGIN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Serdar SARI'ya ve her türlü yardımları için Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü öğretim üye ve personeline teşekkür ederim.

Armağan CAMBAZTEPE

Ocak, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Arıtma Çamuru ve Tarımsal Alanlarda Kullanımı.....	3
2.2. Kıvam Limitleri, Proctor Testi ve Toprak İşleme Arasındaki İlişkiler	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	9
3.1. Materyal.....	9
3.1.1. Araştırma toprakları	9
3.1.2. Toprak örneklerinin alındığı alanın coğrafi konumu ve iklim özellikleri	9
3.1.3. Toprak örneklerinin alındığı alanların toprak özellikleri	12
3.1.4. Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması.....	12
3.1.5. Arıtma çamuru.....	12
3.2. Yöntemler.....	13
3.2.1. Laboratuvar analiz yöntemleri.....	13
3.2.1.a. Toprak tekstürü.....	13
3.2.1.b. Toprak reaksiyonu (pH)	13
3.2.1.c. Kireç	13
3.2.1.d. Organik madde (OM)	13
3.2.1.e. Katyon değişim kapasitesi (KDK).....	14
3.2.1.f. Elektriksel iletkenlik (EC)	14
3.2.1.g. Tane yoğunluğu	14
3.2.1.h. Hacim ağırlığı (HA)	14
3.2.1.i. Agregat stabilitesi (AS).....	14
3.2.1.j. Kıvam limitleri	15

3.2.1.k. Proctor sıkışma testi	15
3.2.2. Denemenin kurulması ve yürütülmesi.....	16
3.2.3. İstatistiksel değerlendirme.....	17
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	18
4.1. Toprak Özellikleri	18
4.1.1. Fiziksel ve kimyasal özellikler	18
4.1.2. Arıtma çamuru uygulamalarının incelenen toprak özellikleri üzerine etkileri	18
4.1.2.a. Organik madde (OM)	18
4.1.2.b. Agregat stabilitesi (AS)	19
4.1.2.c. Arıtma çamurunun kıvam limitleri üzerine etkileri.....	22
4.1.2.d. Arıtma çamurunun Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine etkileri.....	30
5. SONUÇ	36
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AS	Agregat Stabilitesi
BL	Büzölme Limiti
FI	Dağılabilirlik İndeksi
HA	Hacim Ağırlığı
KDK	Katyon Değişim Kapasitesi
LL	Likit Limit
MBD	Maksimum Hacim Ağırlığı
OM	Organik Madde
OMC	Optimum Nem İçeriği
PI	Plastiklik İndeksi
PL	Plastik Limit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Arıtma çamuru uygulama dozları ile LL, PL ve PI arasındaki ilişkiler.....	29
Şekil 4.2. Araştırma topraklarının Proctor sıkışma testi eğrileri	32
Şekil 4.3. Arıtma çamuru uygulama dozları ile OMC ve MBD arasındaki ilişkiler	33



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Erzurum ili uzun yıllar (1975-2005) ortalama iklim verileri	11
Çizelge 4.1. Araştırmada kullanılan deneme topraklarının ve arıtma çamurunun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	21
Çizelge 4.2. Toprakların organik madde içerikleri, agregat stabilitesi (AS), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastiklik indeksi (PI), büzülme limiti (BL) ve dağılıbilirlik indeksi (FI) değerleri üzerine arıtma çamurunun etkileri	26
Çizelge 4.3. Parametreler arasındaki korelasyon matrisi.....	27
Çizelge 4.4. Parametreler arasındaki korelasyon matrisi.....	28
Çizelge 4.5. Toprakların Proctor sıkıştırma testi parametreleri üzerine arıtma çamurunun etkileri	31

1. GİRİŞ

Ekosistem içerisinde insanlar ile diğer canlılar ve cansız varlıklar sürekli olarak birbirleriyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik ilişkiler, alışverişler ve dayanışmalar içerisindeyler. İnsanların doğrudan veya dolaylı olarak en fazla etkileşim içerisinde oldukları ekosistem ögesi hiç şüphesiz topraktır. İnsanoğlunun yaşamsal ihtiyaçlarının karşılanabilmesi, ekonomik gelişme ve kalkınması için ikamesi olmayan ve potansiyel kullanım sınırlarına ulaşmış doğal bir varlık olan toprağın, sürdürülebilir tarımsal faaliyetler çerçevesinde yönetilmesi ve korunması esastır. Sürdürülebilir tarım ve yüksek verimin elde edilmesinde, toprak üretkenlik ve verimlilik parametrelerinin degrade olmasının önlenmesi ve geliştirilmesi zorunluluk arz etmektedir. Organik maddelerin uygun dozlarda topraklara ilavesi toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek üretkenlik ve verimliliğini artırmakta, bitkisel üretimde verim ve kalite üzerine çok önemli düzeyde etkilerde bulunmaktadır. İşlemeli tarım alanlarındaki toprakların organik madde içeriklerinin azlığı dikkate alındığında, üretkenlik ve verimlilik özelliklerinin iyileştirilmesi için organik kökenli materyallerin topraklara uygulanmasının ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda organik madde içeriği yüksek olan arıtma çamurunun, organik gübre olarak önemli bir kaynak olduğu ve toprak düzenleyicisi olarak kullanılabilirliği büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, arıtma çamurlarının tarımda değerlendirilmesi çevre kirliliğinin önlenmesi ve sahip olunan doğal kaynakların korunması açısından etkin bir geri dönüşüm sürecidir.

Entansif tarımsal faaliyetler tarım alanları üzerindeki baskıların artmasına sebep olarak toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik dengelerinin bozulmasına, verimlilik ve üretkenlik özelliklerinin tahrip olmasına neden olmaktadır. Yanlış arazi kullanımı, yanlış toprak yönetimi ve yanlış bitkisel yönetim sistemleri sonucunda oluşan antropojenik kaynaklı fiziksel toprak degradasyon süreçleri; yüzey akış ve erozyonun artması, hacim ağırlığı ve sıkışma artışı, toplam ve makro porozite ile infiltrasyonda azalmalar gibi olaylar sonucu temelde toprak strüktürünün bozulması olarak ortaya çıkmaktadır. Toprakların strüktürel parametreleri ve agregasyon derecesi toprağın

fiziksel kalitesi ile sürdürülebilir kullanımını ve üretkenliğin yeniden sağlanabilmesini çok önemli düzeyde etkilemektedir. Toprakların iyi gelişmiş strüktürel ve agregasyon özellikleri; toprakların erozyona uğrama eğilimlerini, su ve hava geçirgenliklerini, su ve hava kapasitelerini, bitki besin elementlerinin yarayışlığını, mikroorganizma aktivitesini, kök nüfuzunu, toprağın işlenme kolaylığını, mekaniksel dış kuvvetlere karşı dayanıklılıklarını, ... vb. verimlilik ve üretkenlik özelliklerini doğrudan veya dolaylı olarak önemli ölçüde etkilemektedir. Bu özelliklerin geliştirilmesinde ekonomiklik, sürdürülebilirlik ve çevreye uyumluluk kriterlerine göre ahır gübresi ve kompost gibi organik atık/artıklar ayrı bir öneme sahip olup, bu ve bunlara benzer organik atıkların toprağa ilave edilmesi en yaygın yöntem olarak uygulanmaktadır.

Toprak düzenleyicisi olarak arıtma çamurunun toprak mekaniksel özellikleri ile sıkışabilirliği üzerine etkilerini ortaya koymak için yapılmış çalışmalar çok sınırlı düzeydedir. Bu nedenle bu çalışmanın amacı; farklı tekstürlere sahip topraklarda ağırlık esasından farklı dozlarda uygulanan arıtma çamurunun bazı toprak mekaniksel özellikleri ile Proctor sıkışma testi parametreleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Arıtma Çamuru ve Tarımsal Alanlarda Kullanımı

Atık su arıtımında, fiziksel ve kimyasal arıtma süreçlerinde yüzdürülerek veya çökeltilerek uzaklaştırılan maddeler ile biyolojik arıtma sonunda çözünmüş haldeki maddelerin mikroorganizma bünyesine absorbe etmesiyle, mikroorganizmaların sistemden yüzdürülerek veya çökeltilerek alınması sonucu ortaya çıkan %0.25-12 oranında katı madde içeren akışkan özellikteki, kokulu atıklar “ham arıtma çamuru” olarak isimlendirilmektedir. Ham çamurların farklı yöntemlerle stabilizasyonundan sonra elde edilen kullanıma uygun haline “arıtma çamuru”, “işlenmiş arıtma çamuru” veya “biyokatı” denilmektedir (Tchobanoglous *et al.* 2003).

Arıtma çamurları, elde edildikleri kentsel veya endüstriyel kaynakların çeşidine göre değişmekle birlikte farklı miktarlarda makro ve mikro besin elementler gibi birçok yararlı bileşiklerin yanında, organik kirleticiler, asitler, alkaliler, metal tuzları, fenoller, oksitleyiciler, boyalar, sülfatlar, sabunlar, hidrokarbonlar, yağlar ve bazı ağır metaller ile çeşitli patojen mikroorganizmalarını ve parazit yumurtalarını da içerebilmektedir (Alloway and Jackson 1991). Arıtma tesislerinde oluşan çamurlar, arıtmanın çeşitli kademelerinde işlem gördükten sonra, son işlem yeri olarak toprağa verilmekte, yakılabilmekte, denize deşarj edilebilmekte ya da karasal dolgu materyali olarak kullanılabilmektedir. Giderek miktarları artan arıtma çamurlarının, hem çevreye en az zarar verecek şekilde uzaklaştırılması ve hem de içerdikleri besin elementlerinin madde dolanımına sokulması amacıyla bunları araziye vermek en uygun yöntemlerden biri olarak düşünülse de bunların topraklara ve yeraltı sularına yapabileceği etkileri araştırmak ve buna göre karar vermek gerektiği belirtilmektedir (Singh and Agrawal 2010).

Arıtma çamurlarının arazide kullanımında, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) Yönetmeliği ile Avrupa Birliği Ülkeleri tarafından 2000 yılında

hazırlanmış olan Taslak Yönetmelik esas alınmaktadır. USEPA yönetmeliğine göre arıtma çamurları “A Sınıfı (Doğrudan temas için güvenli)” ve “B Sınıfı (Arazide ve bitkisel üretimde kısıtlı kullanım)” olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (EPA 1994; Epstein 2003). Ülkemizde 10 Aralık 2001 tarih 24609 sayılı resmi gazetede ve 31 Mayıs 2005 tarih 25831 sayılı resmi gazetede yayımlanan ‘Toprak Kirliliğinin Kontrol Yönetmeliği’ yürürlüğe girmiş olup, toprak kirliliğinin giderilmesi/önlenmesi, arıtma çamurlarının ve kompostun toprakta kullanımında gerekli tedbirlerin alınması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde ortaya konulması amacıyla söz konusu materyallerin kullanım esasları belirlenmiştir.

Arıtım sonucu ortaya çıkan çamurlardaki makro ve mikro besin elementlerinin bu atığa faydalı bir gübre; yüksek organik madde içeriğinin (%20-40) ise iyi bir toprak düzenleyici özellik vermesi nedeniyle, bu ürünlerin tarımda kullanımı desteklenmekte ve birçok ülkede uygulamaları yaygınlaşmaktadır (Düring and Gäth 2002).

Navas *et al.* (1998) tarafından, yarı kurak koşullarda farklı miktarlarda (0, 40, 80, 160, 320 t ha⁻¹) uygulanan arıtma çamurunun toprağın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ile arpa bitkisinin gelişimini araştırdıkları çalışmalarında, toprak pH’sının düştüğü, EC değerinin yükseldiği, organik madde ile azot içeriğinin ve toprak porozitesinin arttığı, hacim ağırlığının azaldığı ve ağır metal içeriğinin arttığı bildirilmektedir.

Arıtma çamuru kompostunun güneydoğu Fransa’da üzüm bağlarında uygulanmasının çevresel riskleri Korboulewsky *et al.* (2002) tarafından araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, topraktaki organik madde tüm parsellerde artış göstermiş, topraktaki N kayıp riski düşük düzeyde gerçekleşirken, P için limit değerlere yaklaşıldığı gözlenmiştir. Uzun dönemde toprakta P birikimi yüzey ve yer altı suları için sorun doğuracak düzeye gelebileceği sonucuna varılmıştır.

Topçuoğlu vd (2003) tarafından yapılan araştırma; toprağa artan miktarlarda uygulanan arıtma çamurunu domates bitkisinde iki yıl süre ile N, P, Ca, Fe, Zn, Mn, Cu, Pb, Ni ve Cd içeriklerinin arttığı gözlenmiştir. Çamur uygulaması yinelemeli durumlarda bitkide

daha yüksek düzeyde mineral içeriklerinin ve ağır metalin oluşmasına neden olmuş, düşük düzeyli uygulamalarda bitki gelişimini olumlu etkilemiştir. Yüksek düzeyde tuz ve mineral içeren çamurun ikinci yıl uygulaması domates bitkisinin gelişiminde duraklama ve toksik etkisi yapmış, Cd ve Pb gibi ağır metaller bitkide insan sağlığı için izin verilen sınır değerleri aştığı belirlenmiş olup, arıtma çamurunun tarımda güvenli geri kazanımı endişelere yol açan bir uygulama olduğu savunulmuştur.

Sandoval *et al.* (2012), toprak strüktürünü geliştirmek amacıyla farklı oranlarda karıştırılmış arıtma çamuru ve talaş tozu uygulamalarının agregat stabilitesini ve yarayışlı nem içeriğini artırdığını bildirilmektedirler.

Arıtma çamurları, ciddi bir şekilde erozyondan zarar görmüş, tuzluluk-alkaliliğe veya dış mekaniksel kuvvetlere maruz kalmış fiziksel ve kimyasal degradasyona uğramış alanlarda toprağın strüktürel özellikleri yanında kimyasal özelliklerinde de iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir. Eğimli arazilere uygulanan arıtma çamurunun erozyon kayıplarını önemli oranda azalttığı ayrıca uygulanan arıtma çamurunun gübre etkisi ile yüzey vejetasyonunu geliştirdiği ve bu yolla toprağı koruyarak erozyonu engellediği yapılmış çalışmalarla belirlenmiştir (Harris *et al.* 1995; Sort and Alcaniz 1996).

Angın (2008), arıtma çamurunun toprak düzenleyicisi olarak kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada; toprak işlemeli tarım yapılan, tuzlu-alkali ve rüzgar erozyonuna maruz kalmış alanlara 0, 4, 8 ve 12 t da⁻¹ düzeylerinde arıtma çamuru uygulamıştır. Uygulamalar sonrasında hem fiziksel hem de kimyasal toprak özelliklerinde önemli düzeyde olumlu değişikliklerin olduğu belirlenmiş, incelenen bütün parametreler bakımından en etkili sonuç en yüksek uygulama dozunda elde edilmiştir. Araştırmacı, toprak fiziksel ve kimyasal özelliklerin iyileştirilmesi ve toprak verimliliğinin artırılması amacıyla arıtma çamurunun önemli bir alternatif kaynak olduğunu belirtmektedir.

Toprak sıkışması üzerine arıtma çamurunun etkilerini belirlemek amacıyla Stone and Ekwue (1996) farklı oranlarda arıtma çamuru ilave edilmiş topraklara 0, 10, 100, 600 ve

1000 kPa'lık sıkıştırma kuvveti uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, artan miktarlarda arıtma çamuru uygulamasının aynı seviyedeki sıkıştırma kuvveti altında gözenek miktarını artırdığı belirlenmiştir.

Arıtma çamuru ile ilgili olarak yapılmış çalışmaların sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; arıtma çamurlarının organik madde ve bitki besin elementleri içermesi nedeniyle toprağa uygulanması ile toprağa hem organik madde hem de bitki besin elementi sağladığı, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirdiği belirtilmektedir. Bunun yanında, arıtma çamurlarının tarımsal alanlarda kullanımında, çamurun öncelikle bitki besin elementi içeriği, tuzluluk, pH, patojen ve ağır metal içeriği bakımından detaylı incelemelerin yapılması gerektiği vurgulanmaktadır.

2.2. Kıvam Limitleri, Proctor Testi ve Toprak İşleme Arasındaki İlişkiler

Kıvam limitleri ve Proctor sıkıştırma testi parametreleri toprakların mekaniksel özelliklerinden olup, genellikle toprakların mühendislik özelliklerine göre değerlendirilmesinde ve sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Toprakların işlenebilirlik durumları ve tarım alanlarında meydana gelen sıkışma ile toprakların mühendislik özelliklerini ilişkilendirerek tarımsal açıdan değerlendirmelerin yapıldığı çalışmalar sınırlı düzeydedir (Mapfumo and Chanasyk 1998; Mosaddeghi *et al.* 2009). Bazı araştırmacılar, toprakların işlenebilirlik durumu hakkında yorumlar yapmak ve değerlendirmelerde bulunmak için toprakların genel özellikleri ile su tutma özelliklerini (Dexter and Bird 2001), kıvam limitlerini (Mueller *et al.* 1990) ve Proctor sıkışma testi parametrelerini (Wagner *et al.* 1992) kullanmışlardır.

Toprak kıvamı, toprağın kuru ile akışkan durumu arasında nem içeriklerine bağlı olarak değişen adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine göre toprak taneleri ile su arasındaki ilişkileri ve fiziksel kuvvetlerin tesiri altında toprağın gösterdiği durumu ifade etmek için kullanılan bir terimdir. Toprağın tarımsal, mühendislik veya endüstri amaçlı kullanımlarında kıvamlılık durumu çok önemli etkiye sahiptir (Lal and Shukla 2004;

Hemmat *et al.* 2010). Bazı araştırmacılar, toprak sıkışması ile ilgili çalışmalarında kıvam limitlerini referans alarak araştırmalarına yön vermişlerdir (Mapfumo and Chanasyk 1998; Mosaddeghi *et al.* 2009). Kıvam limitleri değerleri kullanılarak, fazladan enerji harcamadan ve toprak strüktürünün minimum düzeyde tahribata uğrayacağı işleme için en uygun nem içeriği aralığı belirlenebilir (Dexter and Bird 2001). Birçok çalışmada, toprak işleme için en uygun nem içeriği ile PL ve/veya LL arasında çok önemli düzeyde pozitif korelasyon olduğu belirtilmektedir (Terzaghi *et al.* 1988; Reeve and Earl 1989; Mueller and Mueller *et al.* 1990, 2003; Schindler 1998a; Dexter and Bird 2001; Barzegar *et al.* 2004). Toprağın mekaniksel davranışlarının doğrudan ölçümü olan plastik ve likit limit değerleri, toprağın sıkışabilirlik durumunu tahmin etmek için kullanılan toprak özelliklerini de içerdiğinden ayrıca bir öneme sahiptir (Ball *et al.* 2000).

Toprak sıkışması; dinamik bir yük veya basınç altında toprak tanelerinin tertiplenme tarzının bozularak birbirlerine daha yakın bir şekilde yeniden tertiplenmeleri suretiyle porozite ile boşluk oranının azalması ve toprak hacim ağırlığının artması şeklinde tanımlanmaktadır (Allmaras *et al.* 1993; Swan *et al.* 1994). Toprak sıkışmasını etkileyen en önemli toprak özelliği toprağın nem içeriğidir. Bunun dışında toprak tekstürü, toprak strüktürel ve agregasyon özellikleri ile organik madde içeriği sıkışmayı etkileyen toprak özellikleridir (Demiralay 1977; Jones 1995; Stiegler 2001). Toprak tekstürü inceldikçe, organik madde miktarı ve stabil agregat miktarı arttıkça maksimum kuru hacim ağırlığı azalmakta ve maksimum hacim ağırlığını elde etmek için gerekli olan optimum nem miktarı artmaktadır (Demiralay 1977; Jones 1995; Özdemir 1998; Stiegler 2001). Toprak sıkışmasını etkileyen faktörler aynı zamanda toprağın işlenebilirliğini, toprağın tarla trafiğine karşı direncini ve uygunluğunu da etkilemektedir (Larson *et al.* 1994).

Toprağın işlemeye uygunluğu ile plastik limit nem içeriğinin çok yakından ilişkili olduğu bildirilmekte olup (Smedema 1993; Mueller and Schindler 1998b; Dexter and Bird 2001), işleme için optimal nem içeriğinin 0.9PL civarında olduğunu, Keller *et al.* (2007) 0.7-0.9PL aralığında ve Mosaddeghi *et al.* (2009) ile Mueller *et al.* (2003) 0.6-0.9PL aralığında olduğunu belirtmektedirler.

Bazı araştırmacılar da, toprakların işlenebilirliği ile toprakların sıkışma durumlarının ve sıkışmaya karşı dirençlerinin değerlendirilmesinde kullanılan Proctor sıkıştırma testi parametrelerini ilişkilendirmişlerdir (De Kimpe *et al.* 1982; Felton and Ali 1992; Wagner *et al.* 1992; Wagner *et al.* 1994; Ekwue and Stone 1995; Thomas *et al.* 1996; Zhang *et al.* 1997; Hakansson and Lipiec 2000). Belli bir sıkıştırma enerjisi altında bir toprağın göstereceği sıkışma derecesinin toprak nem miktarına sıkı bir şekilde bağlı olarak değiştiğini ve söz konusu sıkıştırma enerjisinin toprağa kazandırabileceği maksimum sıkışmanın ancak belli bir nem miktarında elde edilebileceğini ilk olarak Proctor (1933) saptamıştır (Demiralay ve Güresinli, 1979). Belli bir sıkıştırma enerjisi altında bir toprağın kazanabileceği en yüksek hacim ağırlığı maksimum hacim ağırlığı ve bunun sağlanabildiği nem miktarı da optimum nem olarak değerlendirilmektedir.

Toprak işleme bitkisel üretimde önemli bir parametre olup, optimum toprak yapısını elde etmek ve toprağın üretkenlik özelliklerinin korunması ve geliştirilmesi için uygulama zamanı ile şekli dikkatli planlanmalıdır. İşleme sırasında toprağın nem içeriğine bağlı olarak toprak strüktürünün tavrı farklılıklar göstermektedir (Dexter and Bird 2001; Mosaddeghi *et al.* 2009). İşlemeye uygun nem aralığı dışında işleme yapıldığında strüktür tahrip olabilmekte, kesikleşme ve aşırı sıkışma gibi olumsuz durumlar ortaya çıkabilmektedir. Wagner *et al.* (1992) Proctor testinde belirlenmiş olan kritik nem içeriğinin toprak işleme için optimum nem içeriği olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca, Mueller *et al.* (2003)'de toprak işlenebilirliği ile Proctor kritik nem içeriği arasında kuvvetli bir ilişki olduğu bildirilmektedir.

Likit limit, plastik limit ve Proctor testi optimum nem içeriğinde meydana gelen artışlar, toprağın mekaniksel dış kuvvetlere karşı daha dirençli olmasını sağlayarak sıkıştırılabilirliğini en aza indirirken daha geniş aralıkta daha kolay işlenebilmesini de sağlar.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Araştırma toprakları

Araştırmada, Erzurum yöresinde yaygın olarak bulunan bazaltik, kireçtaşı ve kollufulivial ana materyal üzerinde oluşmuş, benzer toprak nem ve sıcaklık rejimine sahip, %2-4 hafif eğimli tarım arazilerinden; Daphan Ovasından Vertisol ordosu Haplustert, Erzurum Ovasından Entisol ordosu Ustorthent ve Fluvaquent büyük toprak gruplarından 0-20 cm'lik işleme katmanından alınan 3 farklı toprak grubuna ait örnekler kullanılmıştır. Örnekleme noktaları Akgül (1992) ve Özgül (2003) tarafından yapılan çalışma sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir.

3.1.2. Toprak örneklerinin alındığı alanın coğrafi konumu ve iklim özellikleri

Erzurum, Doğu Anadolu Bölgesinde 39°10'-40°57' kuzey enlemleri ve 40°15'-42°30' doğu boylamları arasında yer almaktadır. İl, kuzeyden Artvin-Rize, kuzeydoğudan Ardahan, batıdan Gümüşhane-Erzincan, güneyden Bingöl-Muş, doğudan Ağrı-Kars illeri ile çevrilmiş olup genel sınırları içinde kalan alan 24 768 km², merkez ilçenin alanı ise 2 892 km²'dir.

Erzurum ili Türkiye'nin sıcaklık ortalaması en düşük illerinden birisi olup, karasal iklim tipine sahiptir. Kış mevsimi soğuk ve kar yağışlı, yaz ayları ise serin ve kurak geçmektedir. Gece ile gündüz, yaz ile kış mevsimleri arasındaki sıcaklık farkı oldukça yüksek olup, yüksek basınç şartları etkili olduğundan dolayı kış aylarının şiddeti fazladır. Toprak aylarca karla kaplı kalmakla birlikte donlu günlerin sayısı fazladır. İklimin bu özelliği bitki örtüsü üzerine olumsuz etki yapmaktadır. Dolayısıyla tarım yapılan bitki paterni sınırlı kalmaktadır. Ekim ayının sonlarından mayıs ayına kadar yörede egemen olan kuru ve soğuk hava bu aydan sonra yavaş yavaş ısınmaya

başlamaktadır. Erzurum ili uzun yıllar (1975-2005) ortalama iklim verileri Çizelge 3.1. de verilmiştir. Erzurum'un otuz yıllık iklim verilere göre yıllık ortalama yağış 435,6 mm'dir. Aylık ortalama yağış en fazla Mayıs (71,7 mm) en az Ağustos (17,9 mm) ayında düşmektedir. Sıcaklık ortalaması 5,7°C, en sıcak aylar Temmuz (19,3°C) ve Ağustos (19,4°C), en soğuk ay ise Ocak (-9,1°C) ayıdır. Yıllık buharlaşma 987,2 mm, ortalama nispi nem %63,9, ortalama donlu gün sayısı 112 gündür. İlk don olayı Ekim ayının sonlarında, son don olayı da Nisan ayının ortalarında görülmektedir (Anonim, 2006).



Çizelge 3.1. Erzurum ili uzun yıllar (1975-2005) ortalama iklim verileri (Anonim, 2006)

İklim verileri		AYLAR												Yıllık Ort./Top.
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Ortalama yağış, mm		22,8	27,0	35,6	53,6	71,7	49,7	28,4	17,9	24,7	45,5	35,2	23,5	435,6
Ortalama sıcaklık, °C		-9,1	-7,7	-2,8	5,2	10,6	14,4	19,3	19,4	14,7	8,1	1,1	-5,4	5,7
Ortalama maksimum sıcaklık, °C		-4,0	-2,5	2,1	10,6	16,6	21,4	26,2	26,8	22,4	14,9	6,6	-1,0	11,7
Ortalama minimum sıcaklık, °C		-13,7	-12,5	-7,3	0,2	4,5	7,5	11,3	11,2	6,7	1,9	-3,4	-9,7	-0,2
Extrem maksimum sıcaklık, °C		8,0	10,6	21,4	23,5	29,6	32,2	35,6	35,4	32,0	27,0	20,7	12,3	35,6
Extrem minimum sıcaklık, °C		-36,0	-37,0	-33,2	-18,5	-7,0	-5,6	-1,8	-1,1	-6,8	-12,6	-34,3	-37,2	-37,2
Toprak sıcaklığı, °C	5 cm	-10,6	-8,6	1,8	8,6	12,6	19,7	25,2	23,4	17,9	10,2	2,3	-5,8	8,1
	10 cm	-10,5	-8,6	1,2	8,1	12,1	19,0	24,3	23,2	18,0	10,3	2,5	-5,4	7,8
	20 cm	-10,0	-8,2	0,1	7,1	11,2	17,6	22,7	22,1	17,5	10,4	3,1	-4,3	7,4
Ortalama nispi nem, %		76,2	75,2	74,2	65,3	61,2	56,3	50,3	47,5	50,3	61,5	72,2	76,5	63,9
Ortalama buharlaşma, mm		0,0	0,0	0,0	11,3	119,1	160,9	237,9	235,8	168,6	55,3	0,0	0,0	987,2
Ortalama rüzgar hızı, m s ⁻¹		1,9	2,2	2,5	3,2	3,0	2,8	3,0	3,0	2,7	2,6	2,2	2,0	2,6
Kar yağışlı günler sayısı		11,4	10,6	10,5	3,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,9	10,0	50,6
Karla örtülü gün sayısı		28,5	26,5	21,7	3,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	6,5	23,3	111,2
En yüksek kar örtüsü, cm		63,0	102,0	77,0	54,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	41,0	68,0	

3.1.3. Toprak örneklerinin alındığı alanların toprak özellikleri

Erzurum Ovası allüviyal karakterde olup, Karasu civarındaki organo-mineral topraklar hariç, arazinin büyük kısmının toprağı Halosen genç allüviyonlardan oluşmaktadır. Allüviyal materyalin bileşimi; aglomera, bazalt, volkanik tuf, konglomera ve kireç taşının parçalanma ayrışma ürünlerini içermektedir (Atalay 1978).

Daphan ovası toprakları zonal toprak gruplarından kestanerengi ve kahverengi büyük toprak grubuna girmektedirler. Ova topraklarının büyük bir bölümü ağır bünyeli olup üst horizonları hafif ve orta derecede alkalın sınıfına girmektedir. Yüzey topraklarının organik madde içerikleri %1.0- 3.6 arasındadır. Düz kesimlerde kireç yüzey horizonlarından yıkanmış olup değişebilir sodyum yüzdesi %1.5'in altındadır. Bitkiye elverişli potasyum bakımından zengin olan ova toprakları, fosfor bakımından ise gübrelemeye ihtiyaç göstermektedir. Ovada tuzluluk problemi yoktur (Akgül 1994).

3.1.4. Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması

Araştırmada kullanılmak üzere Daphan ovasından Haplustert, Erzurum ovasından Ustorthent ve Fluvaquent büyük toprak gruplarına ait alanlardan 0-20 cm'lik işleme katmanından bozulmuş toprak örnekleri alınmıştır.

Alınan örnekler plastik torbalara konulup etiketlendikten sonra laboratuvara getirilerek oda sıcaklığında kurutulmuş ve 8.0 mm'den elenmiştir. Ayrıca, her toprak örneği için 2 mm'lik elekten geçirilmiş alt örneklerde toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir.

3.1.5. Arıtma çamuru

Araştırmada, ASKİ Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesisinden alınan anaerobik arıtma çamuru kullanılmıştır. Kullanılan arıtma çamuru USEPA yönetmeliğine göre "B Sınıfı

Arıtma Çamuru”, Avrupa Birliği Ülkeleri Taslak Yönetmeliğine göre ise “Geleneksel Standart Arıtma Çamuru” olarak tanımlanmaktadır (Bilgin vd., 2002). Araştırmada kullanılan arıtma çamurunun bazı özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

3.2. Yöntemler

3.2.1. Laboratuvar analiz yöntemleri

3.2.1.a. Toprak tekstürü

Toprakların tekstürleri Bouyoucos Hidrometre yöntemiyle belirlenmiştir (Gee and Bauder 1986).

3.2.1.b. Toprak reaksiyonu (pH)

Toprakların pH’ları 1:2.5’luk toprak-su süspansiyonunda ve arıtma çamurunun pH’sı saturasyon ekstraktında elde edilen süzüklerden cam elektrotlu pH metre ile ölçülmüştür (McLean 1982).

3.2.1.c. Kireç

Toprakların kireç içerikleri Scheibler kalsimetresi ile volümetrik olarak saptanmıştır (Nelson 1982).

3.2.1.d. Organik madde (OM)

Toprakların organik madde içerikleri Smith-Weldon yöntemiyle, arıtma çamurunun organik madde içeriği kül fırınında yakılarak ağırlık kaybından belirlenmiştir (Nelson and Sommers 1982).

3.2.1.e. Katyon değişim kapasitesi (KDK)

Katyon değişim kapasiteleri, örneklerde sodyum asetatla (1 N, pH=8.2) sodyum adsorbsiyonu sağlandıktan sonra, amonyum asetatla (1 N, pH=7.0) ekstrakte edilen solusyonlarda alev fotometresiyle Na okuması yapılarak belirlenmiştir (Rhoades 1982a).

3.2.1.f. Elektriksel iletkenlik (EC)

Toprakların EC'leri 1:2.5'luk toprak-su süspansiyonunda, arıtma çamurunun EC değeri saturasyon macunundan elde edilen ekstraksiyon süzüklerinde elektriki kondüktivite aleti ile mS cm^{-1} olarak belirlenmiştir (Rhoades 1982b).

3.2.1.g. Tane yoğunluğu

Tane yoğunluğu analizleri piknometre yöntemiyle yapılmıştır (Blake and Hartge 1986a).

3.2.1.h. Hacim ağırlığı (HA)

Toprakların hacim ağırlıkları 100 cm^3 'lük bozulmamış örnekler alınarak belirlenmiştir (Blake and Hartge 1986b).

3.2.1.i. Agregat stabilitesi (AS)

Toprakların agregat stabilitesi değerleri hava kurusu 1-2 mm büyüklüğündeki agregat fraksiyonlarında 0.25 mm elek açıklığında, 12.7 mm darbe uzunluğu ve 42 devir/dak darbe frekansına sahip Yoder tipi ıslak eleme aleti kullanılarak belirlenmiştir (Kemper and Rosenau 1986).

$$AS = [(P_1 - P_2) / (P - P_2)] \times 100$$

AS: Agregat stabilitesi, %

P₁: Stabil agregat + Kum miktarı, g

P₂: Kum miktarı, g

P: Fırın kuru toprak miktarı, g

3.2.1.j. Kıvam limitleri

Kıvam limit [(Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL), Plastiklik İndeksi (PI), Büzülme Limit (BL)] değerlerini belirlemek amacıyla; deneme sonrası topraklarından yaklaşık 4'er kg hava kuru örnekler 0.42 mm'lik elekten elenmiştir. Elek altındaki örneklerden 250 g'lık alt örnekler yaklaşık plastik nem seviyesinde (cam macunu kıvamında) olacak şekilde homojen olarak nemlendirilmiş ve hidrolik dengeye ulaşması için kapaklı kutular içerisinde bir gün bekletilmiştir.

Likit limit (LL) değerleri, tepe açısı 30° ve ağırlığı 80 g olan koniye sahip cone-penetrometre kullanılarak üç nokta yöntemiyle belirlenmiştir. Koninin 20 mm batma derinliğine karşılık gelen nem içeriği toprakların likit limit değerleri olarak kullanılmıştır. Toprakların plastik limit (PL) değerleri 3 mm kalınlığında çubuk oluşturabilme yöntemine göre belirlenmiştir. Plastiklik indeksi (PI) değerleri LL ve PL değerleri arasındaki farktan hesaplanmıştır (McBride 1993).

3.2.1.k. Proctor sıkıştırma testi

Toprakların sıkışabilirlik durumlarını belirlemek amacıyla; maksimum derecede sıkışabildikleri optimum nem miktarının ve optimum neme karşılık gelen maksimum kuru hacim ağırlığının tespiti için Proctor aleti kullanılmıştır. Söz konusu alet yaka, örnek kabı, tabla ve tokmaktan oluşmaktadır. Toprak örneği, iç çapı 102 mm, yüksekliği 115 mm olan kap içine konulmakta ve sıkıştırma için çapı 50.8 mm olan 2.5 kg ağırlığındaki ve 30.5 cm'den düşen tokmak kullanılmaktadır.

Araştırmada kullanılan toprakların proctor testiyle tam bir sıkışma eğrisini elde etmek amacıyla farklı nem seviyelerinde sıkıştırma testi uygulanmıştır. Bu amaçla her topraktan; her biri hava kurusu 4 kg toprak tartılmış ve her bir toprağa 4 kg'ın %3'üne tekabül eden 120 ml'den başlanmak üzere katları şeklinde su verilmiştir. Toprak örnekleri homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra proctor testi uygulanmıştır.

Proctor testinde kullanılacak örnekten yeter miktarda alınıp üç defada proctor kabını dolduracak şekilde kısımlara bölünmüştür. Birinci kısım kaba konduktan sonra, 2.5 kg ağırlığındaki tokmak 30.5 cm yükseklikten serbest düşürülerek 25 darbede sıkıştırılmıştır. Aynı işlem diğer katmanlar içinde uygulanmıştır. Toprak örneği üzerindeki bu sıkıştırma işlemlerinden sonra proctor kabının üstüne geçirilmiş olan yaka kısmı çıkarılıp kabın üstünde kalan fazla toprak bir spatula yardımıyla düzlenmiştir. Kalıp içinde sıkıştırılmış halde bulunan toprak ağırlığı, kalıbın hacmine (911 cm³) bölünerek yaş hacim ağırlığı belirlenmiştir.

Sıkıştırılan toprak örneği kalıptan çıkarılmış ve ağırlık esasından nem miktarını belirlemek için alt örnek alınmıştır. Toprağın yaş hacim ağırlığı ve nem miktarı belirlendikten sonra kuru hacim ağırlığı aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (ASTM 1992).

$$\gamma_k = \gamma_y / 1+w$$

γ_k : Kuru hacim ağırlığı, g cm⁻³

γ_y : Islak hacim ağırlığı, g cm⁻³

w : Ağırlık esasından toprak nem içeriği, %

3.2.2. Denemenin kurulması ve yürütülmesi

Araştırmada kullanılmak üzere seçilen kumlu tın, tın ve kil tekstür sınıfındaki toprakların kıvam limitleri ve Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine arıtma çamurunun etkisini incelemek amacıyla deneme kurulmuştur.

Denemenin kurulması için 8 mm'den elenen toprak örnekleri ayrı ayrı fırın kuru ağırlık esasına göre kumlu tın tekstür sınıfındaki toprak için 17 kg, tın tekstür sınıfındaki toprak için 16 kg ve kil tekstür sınıfı toprak için 14 kg tartılmıştır. Toprak örneklerine 2 mm'den elenmiş fırın kuru ağırlık esasına dört farklı dozda (%0, %2, %4 ve %8) arıtma çamuru uygulanmış ve homojen karışımları sağlanmıştır. Toprak-arıtma çamuru karışımları 40 cm uzunluğunda, 25 cm genişliğinde ve 15 cm derinliğindeki plastik kaplara yerleştirilmiştir. Deneme 3 tekerrürlü olarak laboratuvar koşullarında yürütülmüştür. Denemede 3 toprak $\times$ 4 doz $\times$ 3 tekerrür olarak toplamda 36 örnek üzerinde çalışılmıştır. Plastik kaplara yerleştirilen toprak-arıtma çamurları yaklaşık tarla kapasitesi nem seviyesinde laboratuvar şartlarında 4 ay inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sürecinde örneklerin nem içerikleri sürekli olarak kontrol edilerek buharlaşmadan meydana gelen kayıplar için 3'er gün arayla tarla kapasitesinde olacak şekilde su ilavesi yapılmıştır. Deneme sonrasında plastik kaplardan gerekli miktarlarda örnekler alınarak araştırma konusu parametreler için analizler yapılmıştır. Denemede kullanılan toprakların ve arıtma çamurunun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

3.2.3. İstatistiksel değerlendirme

Faktöriyel deneme desenine uygun olarak planlanan bu çalışmada muamele faktörlerinin incelenen özellikler üzerindeki etki değerlerinin belirlenmesinde ANOVA ve Duncan'ın çoklu karşılaştırma test yöntemi uygulanmıştır (SPSS Inc. 2004).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Toprak Özellikleri

4.1.1. Fiziksel ve kimyasal özellikler

Araştırma konusu topraklara ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Söz konusu çizelgeden görüleceği üzere I nolu toprak örneğinin kil içeriği %16.59, silt içeriği %24.54 ve kum içeriği ise %58.87 olarak tespit edilmiş olup tekstür sınıfı kumlu tın (SL) olarak belirlenmiştir. Kil içeriği %25.85, silt içeriği %40.67 ve kum içeriği %33.48 olarak bulunan II nolu toprak örneğinin tekstür sınıfı tın (L) ve kil içeriği %64.24, silt içeriği %19.14, kum içeriği %16.62 olarak bulunan III nolu toprak örneğinin tekstür sınıfı kil (C) olarak tespit edilmiştir. Toprakların pH değerleri 1:2.5 toprak: su karışım oranına göre nötr ve hafif alkalın karakterde, kireç içerikleri ise %0.46, %0.51 ve %0.85 olup kireç içerikleri bakımından çok az sınıfa girmektedir. Araştırma konusu toprakların organik madde içerikleri %1.93, %1.24 ve %1.12 olarak belirlenmiş olup az sınıfına girmektedir. Toprakların katyon değişim kapasiteleri sırasıyla 22.54, 40.67 ve 47.01 cmol kg⁻¹ olup kil içeriği en fazla olan Haplustert büyük toprak grubunda en yüksek bulunmuştur.

4.1.2. Arıtma çamuru uygulamalarının incelenen toprak özellikleri üzerine etkileri

4.1.2.a. Organik madde (OM)

Arıtma çamuru uygulamalarının araştırma konusu her üç toprağın OM içeriklerini önemli ölçüde ($p < 0.05$) artırdığı, uygulama dozu artışı ile toprakların OM içeriklerinin de arttığı belirlenmiş olup en yüksek OM içerikleri %8 AÇ uygulama dozlarında elde edilmiştir. Toprak I’in kontrol seviyesinde OM %1.93 iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulama dozları sonrasında sırasıyla %3.37, %3.56 ve %4.43’e yükseldiği belirlenmiştir. Kontrolü ile kıyaslandığında %8 uygulama dozu sonrasında toprağın OM içeriğinde

%129.5 oranında artışın meydana geldiği hesaplanmıştır. Kontrolleri ile kıyaslandığında Toprak II ve III'de %8 AÇ uygulaması sonrasında OM içeriklerinde sırasıyla %279.0 ve %194.6 oranlarında artışların meydana geldiği belirlenmiştir. Genel ortalama, kontrol seviyesinde OM içeriği %1.43 iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulamaları sonrasında %3.10, %3.38 ve %4.14'e yükselmiştir (Çizelge 4.2). Arıtma çamuru (AÇ) ile OM arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.925**, 0.917** ve 0.915** olarak belirlenirken, AÇ-OM arasındaki genel korelasyon katsayısı 0.678** olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Topraklara uygulanan organik kaynaklı atıkların, toprakların OM içeriklerini artırdığı önceki yıllarda yapılmış olan araştırma sonuçlarında da görülmektedir (Haynes and Naidu 1998; Shirani *et al.* 2002; Tsadilas *et al.* 2005; Curtin and Mullen 2007; Angin 2008; Candemir and Gülser 2011).

4.1.2.b. Agregat stabilitesi (AS)

Arıtma çamuru uygulamaları araştırma topraklarının agregat stabilitesi (AS) değerlerini kontrollerine göre önemli düzeyde ($p < 0.05$) artırmıştır (Çizelge 4.2). Arıtma çamurunun agregat stabilitesi üzerine etkinliği doz arttıkça artış gösterdiği belirlenmiştir. Kontrolleri ile karşılaştırıldığında en yüksek AS değerleri en yüksek uygulama dozu %8'de elde edilmiştir. Kontrollerine göre karşılaştırıldığında %8 AÇ uygulaması sonrasında Toprak I, II ve III'de AS değerlerindeki artış oranları sırasıyla %82.0, 32.5 ve 47.4 olarak hesaplanmıştır. Genel ortalama AS değeri kontrolde %31.85 iken AÇ uygulama dozlarının artışı ile artış göstermiş, %2, 4 ve 8 uygulama dozlarında sırasıyla %36.61, 42.60 ve 49.15 olarak belirlenmiş olup kontrole göre %14.9, 33.8 ve 54.3 oranlarında artışların meydana geldiği saptanmıştır. Arıtma çamuru uygulamasıyla AS değerlerindeki artışların temel nedeni AÇ uygulamasıyla topraklara önemli düzeyde OM girdisinin sağlanmış olmasıdır. Genel ortalama kontrol seviyesinde toprakların OM içeriği %1.43 iken %2, %4 ve %8 arıtma çamuru uygulamaları sonrasında %3.10, 3.38 ve 4.14'e yükselmiştir. Toprak agregatlarının stabilizasyonunda toprak organik madde içeriği çok önemli bir faktördür (Khaleel *et al.* 1981; Tisdall and Oades 1982; Blanco-Canqui and Lal 2004; Candemir and Gülser 2011). Arıtma çamuru uygulaması ile AS arasındaki korelasyon katsayısı Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.944**, 0.925**

ve 0.891** olarak belirlenirken, AÇ-AS arasındaki genel korelasyon katsayısı ise 0.786** olarak belirlenmiştir. Organik madde ile AS arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.874**, 0.810** ve 0.747** olarak belirlenirken, OM-AS arasındaki genel korelasyon katsayısı ise 0.497** olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).



Çizelge 4.1. Araştırmada kullanılan deneme topraklarının ve arıtma çamurunun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametreler		Topraklar ve Materyal					
		Toprak I	Toprak II	Toprak III	Arıtma Çamuru (AÇ)		
Kil (%)		16,6	25,8	64,3	-		
Silt (%)		24,5	40,7	19,1	-		
Kum (%)		58,9	33,5	16,6	-		
Tekstür sınıfı		Kumlu tın (SL)	Tın (L)	Kil (C)	-		
Büyük toprak grubu		Ustorthent	Fluvaquent	Haplustert	-		
KDK (cmol kg ⁻¹)		22,5	40,7	47,0	-		
CaCO ₃ (%)		0,46	0,51	0,85	-		
Organik madde (%)		1,93	1,24	1,12	45,5		
pH		6,57 ^s	7,75 ^s	7,26 ^s	7,21 ^e		
EC (mS cm ⁻¹)		0,54 ^s	0,85 ^s	1,06 ^s	14,1 ^e		
Tane yoğunluğu (g cm ⁻³)		2,66	2,63	2,67			
Hacim ağırlığı (g cm ⁻³)		1,32	1,21	1,07			
XRF analizi (Konsantrasyon, %)	O	47,3	46,9	47,7	47.6	Tane büyüklük dağılımı (%)	
	Ca	3,8	4,9	2,1	13.2	2000-1000 µ	29,01
	Si	31,7	30,2	32,5	9.4	1000-500 µ	29,18
	Mg	1,44	1,51	1,77	1.25	500-250 µ	19,77
	K	2,09	1,75	1,93	0.96	250-100 µ	10,09
	Al	8,4	8,3	8,9	3.54	<100 µ	11,95
	P	0,17	0,16	0,05	2.27		
	S	0,04	0,05	0,07	2.21		
	Fe	1,82	2,42	2,18	1.81		
	Na	1,75	1,42	0,48	0.23		
	Mn	0,04	0,06	0,05	0.04		
	Sr	0,01	0,01	0,01	0.02		

^s 1:2.5 (toprak:su) ekstraktında belirlendi.

^e Saturasyon ekstraktında belirlendi.

4.1.2.c. Arıtma çamurunun kıvam limitleri üzerine etkileri

Araştırmada kullanılan toprakların kıvam limitleri arasında önemli düzeyde farklılıklar belirlenmiştir (Çizelge 4.2). En yüksek likit limit (LL), plastik limit (PL), plastiklik indeksi (PI), büzülme limiti (BL) ve dağılıbilirlik indeksi (FI) değerleri en yüksek kil içeriğine sahip Toprak III'de (Haplustert) elde edilmiştir. İncelenen parametrelerin (LL, PL, PI, BL, FI) kil içeriği ile önemli düzeyde pozitif ilişkiye sahip olduğu belirlenirken, kum ve silt içeriği ile önemli düzeyde negatif ilişkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Toprağın difüzyon çift tabaka katmanının karakteristiklerini etkileyen kil, kum ve organik maddenin Atterberg limitleri üzerine de önemli düzeyde etkiye sahip olduğu Lal and Shukla (2004) ve Hemmat *et al.* (2010) tarafından ifade edilmektedir. De Jong *et al.* (1990) toprağın kil içeriğinin Atterberg limitlerinin en önemli belirleyicisi olduğunu belirtmektedir. Ayrıca, Keller and Dexter (2012) ihmal edilebilir düzeyde az organik madde içeren toprakların plastiklik özellik gösterebilmesi için en az %10 kil içermesi gerektiğini belirtmektedirler. Canbolat ve Öztaş (1997) ve Canbolat vd (1999) yaptıkları çalışmalarında kıvam limitleri ile kum ve silt içeriği arasında negatif, kil ve organik madde içeriği ile pozitif ilişkiler saptamışlardır.

Arıtma çamuru (AÇ) uygulamaları her üç toprağın LL, PL, BL ve FI değerlerinde önemli düzeyde ($p < 0.05$) artışlar meydana getirmiştir. Ayrıca, arıtma çamuru uygulamalarının Toprak I'in PI değerlerinde önemli düzeyde artışlar meydana getirdiği, Toprak II ve III'ün PI değerlerinde ise meydana gelen değişimlerin önemsiz olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

Her üç toprakta da arıtma çamuru uygulama dozları arttıkça LL değerlerinde artışlar meydana gelmiş ve en yüksek LL değerleri en yüksek arıtma çamuru uygulama dozlarında (%8) elde edilmiştir. Toprak I'in kontrol düzeyinde LL değeri %27.01 iken %2, 4 ve 8 uygulama dozları sonrasında sırasıyla %32.83, 36.79 ve 42.87 olarak belirlenmiş olup, kontrole göre %21.5, 36.2 ve 58.7 oranlarında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır. Toprak II'nin kontrol düzeyinde LL değeri %34.68 iken %8 uygulama sonrasında kontrole göre %43.3 oranında artışla %49.72 olarak belirlenmiştir.

Toprak III'de de %8 uygulama sonrasında LL değerinde %16.2 oranında artışın meydana geldiği hesaplanmıştır. Arıtma çamuru uygulamasıyla oransal olarak en yüksek artış kil içeriği en az olan kumlu tın tekstür sınıfındaki Toprak I'de meydana gelirken, oransal olarak en düşük artış kil içeriği en yüksek olan kil tekstür sınıfındaki Toprak III'de meydana gelmiştir. Arıtma çamuru ile LL arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için 0.985**, 0.969** ve 0.951 olarak belirlenirken, AÇ-LL arasındaki genel korelasyon katsayısı 0.957** olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, arıtma çamurunun LL üzerine etkinliğinin toprağın kil içeriğinin artmasıyla azaldığını göstermektedir (Çizelge 4.2; 4.3).

Arıtma çamuru (AÇ) uygulamalarının PL değerlerinde de önemli düzeyde ($p < 0.05$) artışlar meydana getirdiği ve bu artışların LL'de olduğu gibi uygulama dozu arttıkça arttığı belirlenmiştir. En yüksek PL değerleri %8 dozunda Toprak I, II ve III için sırasıyla %32.41, 38.78 ve 53.25 olarak belirlenmiştir. Kontrolleri ile kıyaslandığında Toprak I, II ve III'de AÇ uygulamaları sonrasında PL değerlerinde %57.0, 69.0 ve 20.6 oranlarında artışlar meydana gelmiştir. AÇ uygulamaları ile PL arasında da önemli düzeyde ilişkiler belirlenmiştir (Çizelge 4.2; 4.3). Topraklara arıtma çamuru uygulamasıyla LL ve PL değerlerinde meydana gelen artışlar, arıtma çamuru uygulamasıyla ilave edilmiş olan organik maddenin su tutma kapasitesini artırmasından kaynaklanmaktadır (Rixon *et al.* 1991; Bhushan and Sharma 2002). Toprak organik maddesi su tutma kapasitesini ve spesifik yüzeyi etkileyerek LL ve PL değerlerini önemli düzeyde etkilemektedir (Smith *et al.* 1985; Malkawi *et al.* 1999; Hemmat *et al.* 2010). Arıtma çamuru uygulamalarının araştırma konusu her üç toprağın OM içeriklerini önemli ölçüde artırdığı, AÇ ile OM arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.925**, 0.917** ve 0.915** olarak belirlenmiştir. OM ile LL arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.922**, 0.947** ve 0.837** olarak, OM-PL arasındaki korelasyon katsayıları 0.919**, 0.892** ve 0.748** olarak belirlenmiştir. Ayrıca, agregat stabilitesinin kıvam limitleri üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmekte olup, AS-LL ve AS-PL arasında önem düzeyinde pozitif ilişki belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Plastiklik indeksi (PI), toprağın dış kuvvetler tarafından sıkışmaya duyarlı nem içeriği aralığını yansıtmaktadır. PI ne kadar yüksekse toprağın sıkışmaya uygun olduğu nem aralığının o kadar yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Arıtma çamuru uygulamasının toprakların PI değerleri üzerine etkileri tam olarak net olmayıp, PI değerlerinde düzensiz dalgalanmalar belirlenmiştir. Likit limit, PI değerinin artmasında önemli bir etkiye sahipken, PL'deki artış LL'in etkisini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Arıtma çamuru uygulama dozları ile LL, PL ve PI arasındaki ilişkiler Şekil 4.1'de sunulmuştur. Arıtma çamuru uygulama dozları sonrasında en yüksek PI değerleri Toprak I ve III için %8 uygulama dozunda (%10.46 ve %28.44) belirlenirken Toprak II'de %2 dozunda (%12.73) belirlenmiştir. Toprak I'de AÇ uygulamaları sonrasında PI değerleri arasında önemli farklılıklar belirlenirken Toprak II ve III'de AÇ uygulama dozları sonrasında belirlenen PI değerleri arasında farklılığın olmadığı gözlemlenmiştir. Genel ortalamada, en yüksek PI değeri %8 AÇ uygulamasında (%16.61) elde edilirken uygulamalar arasında önemli farklılıklar tespit edilmiştir (Çizelge 4.2). Stanchi *et al.* (2009) alpin toprakların organik madde içeriği ile LL ve PL arasında pozitif korelasyon olduğunu bildirirken, toprakların organik madde içeriğinin PI üzerine etkisinin olmadığını bildirmektedir. Buna karşılık, Blanco-Canqui *et al.* (2006) toprak organik karbon ve PI arasında güçlü bir pozitif korelasyon bulmuşlardır. McBride and Bober (1989) yapmış oldukları çalışmalarında, 44 toprağın incelenmesinden sonra toprak organik madde içeriği arttıkça PI'nin azaldığını belirtti. Bu çalışmada, toprak organik madde içeriği ile PI arasında genel korelasyonda ters bir ilişki ($r = -0.515^{**}$) gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, her bir toprağın korelasyonunun ayrı ayrı incelenmesiyle organik madde içeriği ile PI arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla Toprak I, II ve III için 0.731^{**} , 0.042 ve 0.612^{*} olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Arıtma çamuru uygulama çalışmada kullanılan üç toprakta da büzülme limiti (BL) ve dağılılabilirlik indeksi (FI) değerlerini önemli ölçüde artırmıştır (Çizelge 4.2). Arıtma çamuru uygulama dozları arttıkça BL ve FI değerlerinde artışların olduğu belirlenmiş olup, en yüksek değerler %8 dozunda elde edilmiştir. Toprak I'in kontrolünde BL %7.12 iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulamaları sonrasında %8.93, 11.82 ve 13.83 olarak belirlenmiş ve kontrole göre %25.4, 66.0 ve 94.2 oranlarında artışların meydana geldiği

belirlenmiştir. Benzer durumlar tın ve kil tekstür sınıfındaki Toprak II ve III'de de gözlemlenmiş olup, %8 AÇ uygulaması sonrasında kontrollerine göre %106.7 ve %32.3 oranlarında artışlar tespit edilmiştir. Kontrolüne göre en düşük oransal artışlar Toprak III'de belirlenmiş olsa da, en yüksek BL değerleri en fazla kil içeriğine sahip kil tekstür sınıfındaki Toprak III'de belirlenmiştir. Arıtma çamuru uygulamasıyla BL değerlerinde meydana gelen artışlar; topraklara ilave edilen organik madde ile su absorpsiyon kapasitesinin artmasıyla ilişkilidir (Bhushan and Sharma, 2002; Hemmat *et al.*, 2010). Bu gerekçe, organik madde ile BL arasındaki önemli düzeydeki ilişkiler ile de kendini göstermektedir. Organik madde ile BL arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.912**, 0.895** ve 0.711** olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Toprak strüktüründeki minimum tahribatı sağlamak için optimal toprak işleme periyodu FI değerindeki artış ile uzatılabilir. (Tivy, 1990). PL ve BL değerleri arasındaki farktan hesaplanmış olan FI değerleri, PL ve BL değerlerine uygun olarak en yüksek değerler %8 AÇ uygulama dozlarında belirlenmiştir (Çizelge 4.2). Genel olarak, AÇ uygulama dozu arttıkça FI değerleri de artmıştır. Bu sonuçlar, AÇ uygulanmış toprakların kontrolleri ile kıyaslandığında daha yüksek nem içeriklerinde strüktürel olarak tahribata uğramadan işlenebileceğini ve daha yüksek nem içeriklerinde işleme sırasında daha dağılabilir olduğunu işaret etmektedir. Organik madde ile FI arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.863**, 0.851** ve 0.635* olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Benzer sonuçlar McBride and Bober (1989), Watts and Dexter (1998), Dexter and Bird (2001) ve Hemmat *et al.* (2010) tarafından yapılmış çalışmalarda da elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Toprakların organik madde içerikleri, agregat stabilitesi (AS), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastiklik indeksi (PI), büzülme limiti (BL) ve dağılıbilirlik indeksi (FI) değerleri üzerine arıtma çamurunun etkileri (Ortalama±Std)

Topraklar	Uygulama oranları (w/w)	Organik madde (%)	Agregat stabilitesi (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	BL (%)	FI (%)
Toprak I	Kontrol	1,93±0,41c	32,71±0,84c	27,01±0,53d	20,64±1,67d	6,37±1,29c	7,12±1,29d	13,52±1,29c
	%2	3,37±0,25b	40,86±3,89b	32,83±0,93c	23,98±0,50c	8,85±0,71bc	8,93±0,58c	15,04±0,19c
	%4	3,56±0,14b	46,47±2,60b	36,79±1,13b	28,69±0,71b	8,10±0,70ab	11,82±0,62b	16,87±1,15b
	%8	4,43±0,33a	59,54±5,35a	42,87±1,51a	32,41±0,75a	10,46±0,77a	13,83±0,73a	18,58±0,12a
Ortalama		3,32±0,85B	44,89±10,65A	34,88±6,11C	26,43±4,76C	8,45±1,72C	10,43±2,80C	16,00±2,12B
<i>p</i>		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Toprak II	Kontrol	1,24±0,10c	31,40±1,89b	34,68±0,65d	22,95±1,41d	11,74±1,18	9,90±0,33d	13,05±1,10c
	%2	3,91±0,12b	33,05±2,04b	41,83±1,18c	29,10±0,84c	12,73±1,00	13,45±0,98c	15,64±0,19b
	%4	4,28±0,33ab	39,08±0,43a	46,19±1,58b	33,80±2,57b	12,39±0,99	16,75±1,23b	17,04±1,36ab
	%8	4,70±0,42a	41,60±2,02a	49,72±1,51a	38,78±1,05a	10,94±2,13	20,46±0,99a	18,33±0,35a
Ortalama		3,53±0,77A	36,28±4,62C	43,10±5,96B	31,16±6,26B	11,95±1,40B	15,14±4,16B	16,02±2,18B
<i>p</i>		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	ns (0,464)	<0,05	<0,05
Toprak III	Kontrol	1,12±0,09c	31,42±2,09c	70,33±1,71d	44,15±1,85c	26,18±0,59	16,79±0,82b	27,36±1,03c
	%2	2,02±0,20bc	35,93±3,26bc	74,74±1,92c	47,88±2,38b	26,85±1,85	19,49±2,27a	28,39±0,88ab
	%4	2,32±0,25b	42,24±3,99ab	78,49±1,13b	51,87±0,40a	26,61±0,81	21,67±0,78a	30,20±0,79ab
	%8	3,30±0,37a	46,32±4,31a	81,69±1,68a	53,25±1,52a	28,44±1,74	22,21±1,14a	31,03±2,06a
Ortalama		2,19±0,68C	38,98±6,69B	76,31±4,64A	49,29±3,99A	27,02±1,47A	20,04±2,53A	29,25±1,87A
<i>p</i>		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	ns (0,271)	<0,05	<0,05
Genel Ortalama	Kontrol	1,43±0,55c	31,85±1,61c	44,01±20,04d	29,25±11,32d	14,76±8,92b	11,27±4,38d	17,98±7,11d
	%2	3,10±0,86b	36,61±4,38c	49,80±19,14c	33,65±10,98c	16,14±8,28ab	13,96±4,76c	19,69±6,54c
	%4	3,38±0,88b	42,60±4,04b	53,82±18,98b	38,12±10,63b	15,70±8,43ab	16,75±4,34b	21,37±6,70b
	%8	4,14±0,72a	49,15±8,81a	58,09±17,99a	41,48±9,30a	16,61±8,99a	18,83±3,92a	22,65±6,38a
<i>p</i>		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0,05). ns: not significant.

Çizelge 4.3. Parametreler arasındaki korelasyon matrisi

		AÇ	OM	AS	LL	PL	PI	BL	FI	OMC	MBD
Toprak I	AÇ	-									
	OM	,925**	-								
	AS	,944**	,874**	-							
	LL	,985**	,922**	,978**	-						
	PL	,981**	,919**	,949**	,980**	-					
	PI	,783**	,731**	,847**	,838**	,714**	-				
	BL	,962**	,912**	,924**	,958**	,976**	,701*	-			
	FI	,936**	,863**	,912**	,939**	,959**	,680*	,875**	-		
	OMC	,967**	,925**	,907**	,960**	,970**	,725**	,929**	,952**	-	
	MBD	-,966**	-,877**	-,887**	-,944**	-,964**	-,683*	-,952**	-,910**	-,955**	-
Toprak II	AÇ	-									
	OM	,917**	-								
	AS	,925**	,810**	-							
	LL	,969**	,947**	,875**	-						
	PL	,974**	,892**	,885**	,975**	-					
	PI	-,229	,042	-,233	-,104	-,322	-				
	BL	,981**	,895**	,899**	,970**	,993**	-,312	-			
	FI	,922**	,851**	,824**	,946**	,974**	-,329	,940**	-		
	OMC	,937**	,799**	,881**	,929**	,946**	-,278	,945**	,911**	-	
	MBD	-,934**	-,887**	-,909**	-,944	-,928**	,133	-,933**	-,881**	-,941**	-
Toprak III	AÇ	-									
	OM	,915**	-								
	AS	,891**	,747**	-							
	LL	,951**	,837**	,919**	-						
	PL	,915**	,748**	,908**	,953**	-					
	PI	,521	,612*	,437	,571	,297	-				
	BL	,853**	,711**	,803**	,849**	,932**	,151	-			
	FI	,799**	,635*	,852**	,886**	,873**	,428	,638*	-		
	OMC	,904**	,752**	,895**	,894**	,865**	,475	,834**	,719**	-	
	MBD	-,953**	-,952**	-,851**	-,919**	-,843**	-,617*	-,737**	-,801**	-,781**	-

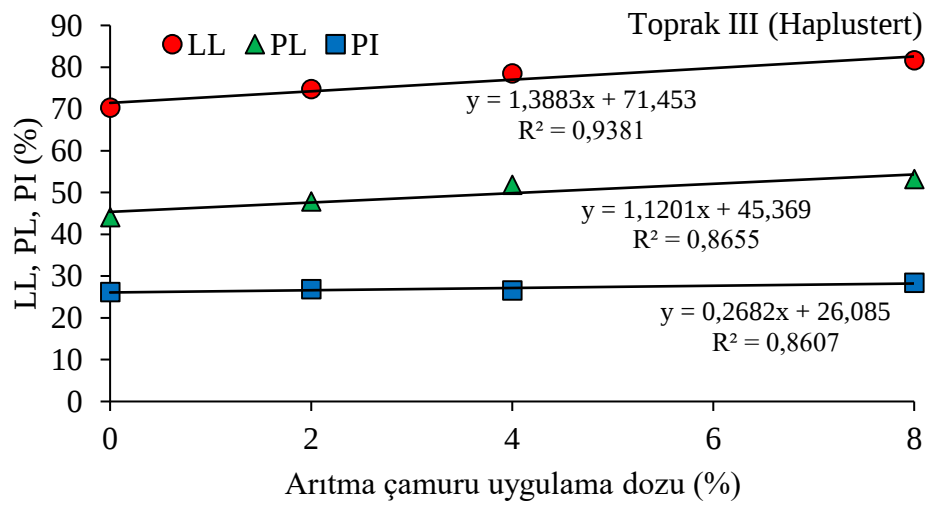
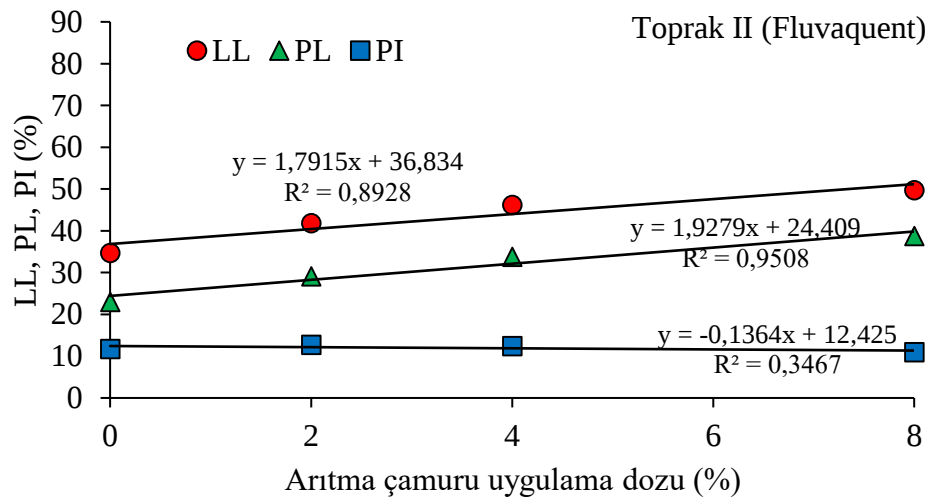
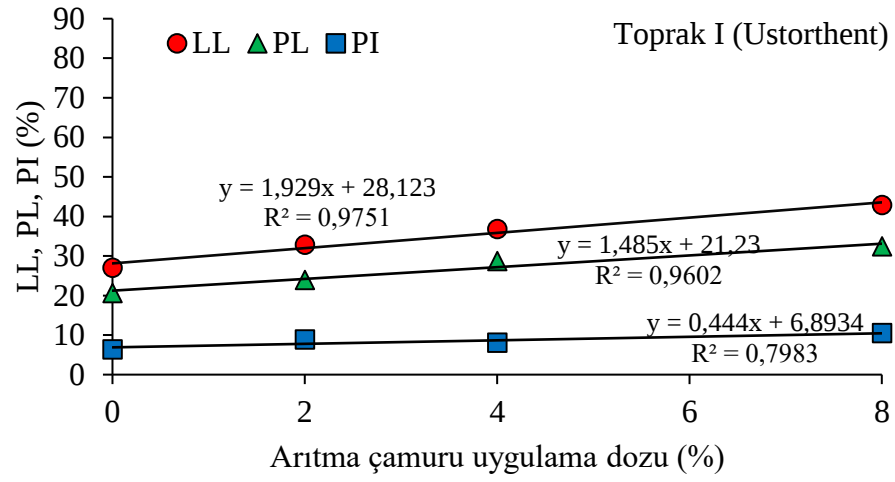
Çizelge 4.4. Parametreler arasındaki korelasyon matrisi

		Kil	Silt	Kum	AÇ	OM	AS	LL	PL	PI	BL	FI	OMC	MBD
Genel Korelasyon	Kil	-												
	Silt	-,548**	-											
	Kum	-,896**	,120	-										
	AÇ	0	0	0	-									
	OM	-,587**	,585**	,386*	,678**	-								
	AS	-,165	-,246	,327	,786**	,497**	-							
	LL	,957**	-,519**	-,861**	,277	-,367*	,067	-						
	PL	,896**	-,481**	-,808**	,419*	-,241	,175	,981**	-					
	PI	,983**	-,540**	-,881**	,070	-,515**	-,081	,966**	,898**	-				
	BL	,743**	-,197	-,777**	,569**	,031	,206	,877**	,937**	,745**	-			
	FI	,937**	-,657**	-,763**	,268	-,429**	,136	,977**	,963**	,938**	,808**	-		
	OMC	,837**	-,409*	-,777**	,503**	-,142	,252	,950**	,976**	,859**	,938**	,922**	-	
	MBD	-,921**	,369*	,897**	-,328	,259	-,050	-,974**	-,959**	-,936**	-,897**	-,924**	-,945**	-

AÇ: Arıtma çamuru dozu; OM: Organik madde içeriği; AS: Agregat stabilitesi; LL: Likit limit; PL: Plastik limit; PI: Plastiklik indeksi; BL: Büzülme limiti; FI: Dağılılabirlik indeksi; OMC: Optimum nem içeriği; MBD: Maksimum hacim ağırlığı.

** Korelasyon 0,01 seviyesinde önemlidir.

* Korelasyon 0,05 seviyesinde önemlidir.



Şekil 4.1. Arıtma çamuru uygulama dozları ile LL, PL ve PI arasındaki ilişkiler

4.1.2.d. Arıtma çamurunun Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine etkileri

Arıtma çamuru uygulamalarının Proctor sıkışma testi parametreleri, optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD), üzerine olan etkilerinin istatistiksel olarak önemli ($p < 0.05$) olduğu belirlenmiş olup (Çizelge 4.4), toprakların Proctor sıkışma testi grafikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Arıtma çamuru uygulamalarının, Proctor testinde en yüksek sıkışmanın elde edildiği OMC değerlerini önemli düzeyde artırırken, MBD değerlerini önemli düzeyde düşürdüğü belirlenmiştir (Çizelge 4.4; Şekil 4.2; Şekil 4.3). Benzer AÇ uygulama dozları dikkate alındığında, en düşük OMC ve en yüksek MBD değerleri en yüksek kum en düşük kil içeriğine sahip kumlu tın tekstür sınıfındaki Toprak I’de elde edilmiştir. Toprakların kontrol düzeylerinde, OMC değerleri Toprak I, II ve III için sırasıyla %14.59, 18.88 ve 29.55 olarak belirlenirken; MBD değerleri 1.89, 1.70 ve 1.46 g cm⁻³ olarak belirlenmiştir. Araştırma topraklarında kil içeriğinin artmasıyla OMC değerlerinin arttığı, MBD değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, OMC’nin artmasında ve MBD’nin düşmesinde toprak kil içeriğinin en önemli faktörlerden olduğunu göstermektedir. Kil-OMC (0.837**) ve kil-MBD (-0.921**) arasında elde edilen korelasyon katsayıları da söz konusu ilişkiyi destekler niteliktedir. Barik (2004) yapmış olduğu çalışmada da benzer sonuçlar elde etmiş olup, kil içeriği ile Proctor testi maksimum hacim ağırlığı arasında negatif bir ilişki belirlerken, kum içeriği ile pozitif ilişki belirlemiştir. Ayrıca, kil içeriği ile maksimum sıkışmanın meydana geldiği optimum nem içeriği arasında pozitif, kum içeriği ile negatif ilişki tespit etmiştir. Larson *et al.* (1980), Carig (1987), Barzegar *et al.* (2000) ve Aksakal *et al.* (2013) yapmış oldukları çalışmalarında da benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

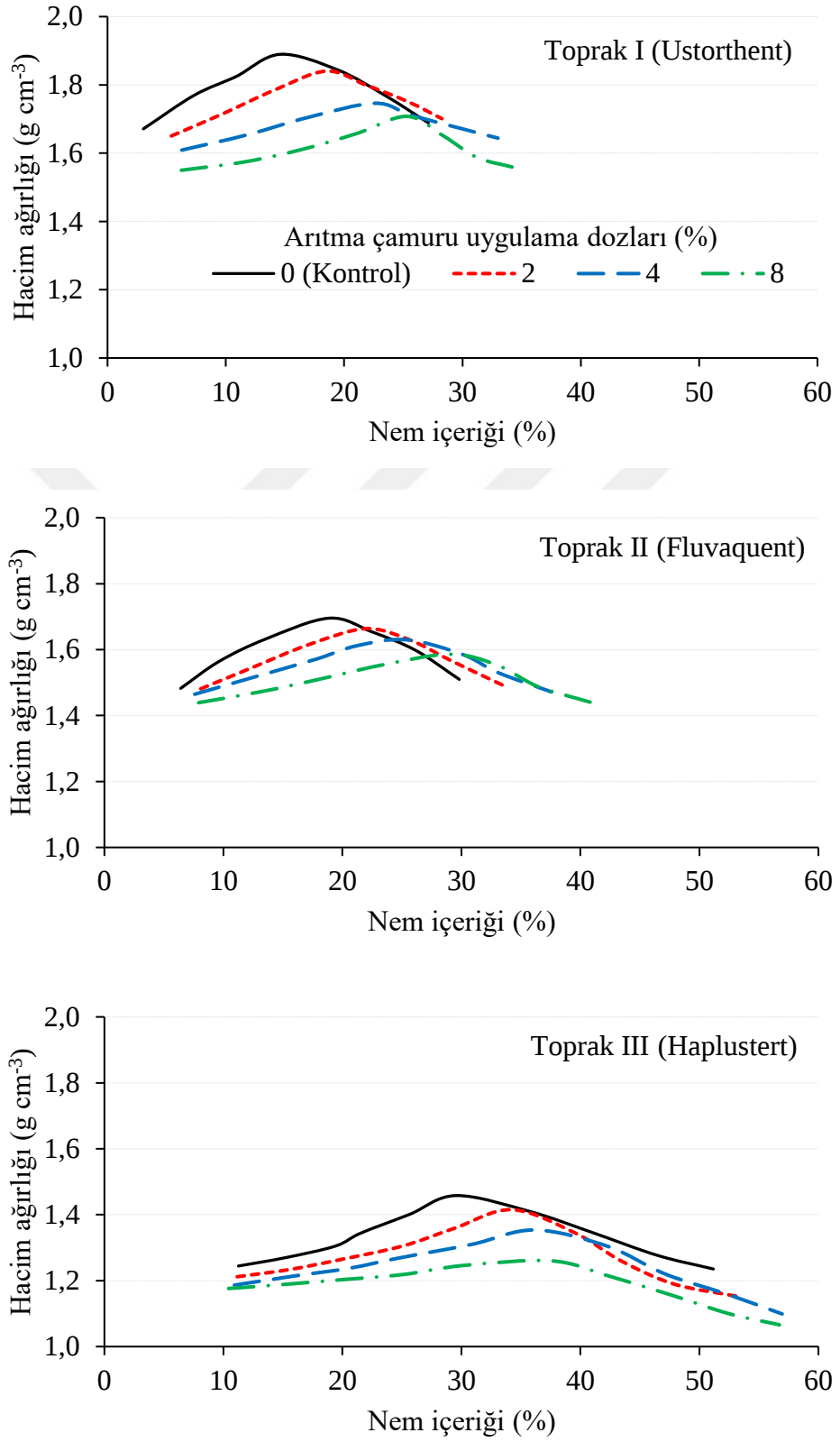
Arıtma çamuru uygulama dozu arttıkça OMC değerlerinin arttığı, MBD değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Her bir toprak ayrı ayrı ve toprakların genel ortalama değerleri incelendiğinde, en yüksek OMC ve en düşük MBD değerlerine %8 AÇ uygulamasında edilmiştir. Toprak I’in kontrol seviyesinde OMC değeri %14.59 iken AÇ uygulama dozlarının artışı ile artış göstermiş, %2, 4 ve 8 uygulama dozları sonrasında sırasıyla %18.49, 22.59 ve 25.30 olarak belirlenmiş olup kontrole göre %26.7, 54.8 ve 73.4

oranlarında artışların meydana geldiği saptanmıştır. Toprak II ve III’de de benzer durumlar belirlenmiş olup, kontrole göre en yüksek artış oranları %8 AÇ dozunda Toprak II için %53.8 ve Toprak III için %27.1 olarak hesaplanmıştır. Genel ortalama kontrol seviyesinde OMC değeri %21.00 iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulamaları sonrasında %24.90, 28.03, 30.63’e yükseldiği ve %18.6, 33.5 ve 45.9 oranlarında artışların meydana geldiği saptanmıştır.

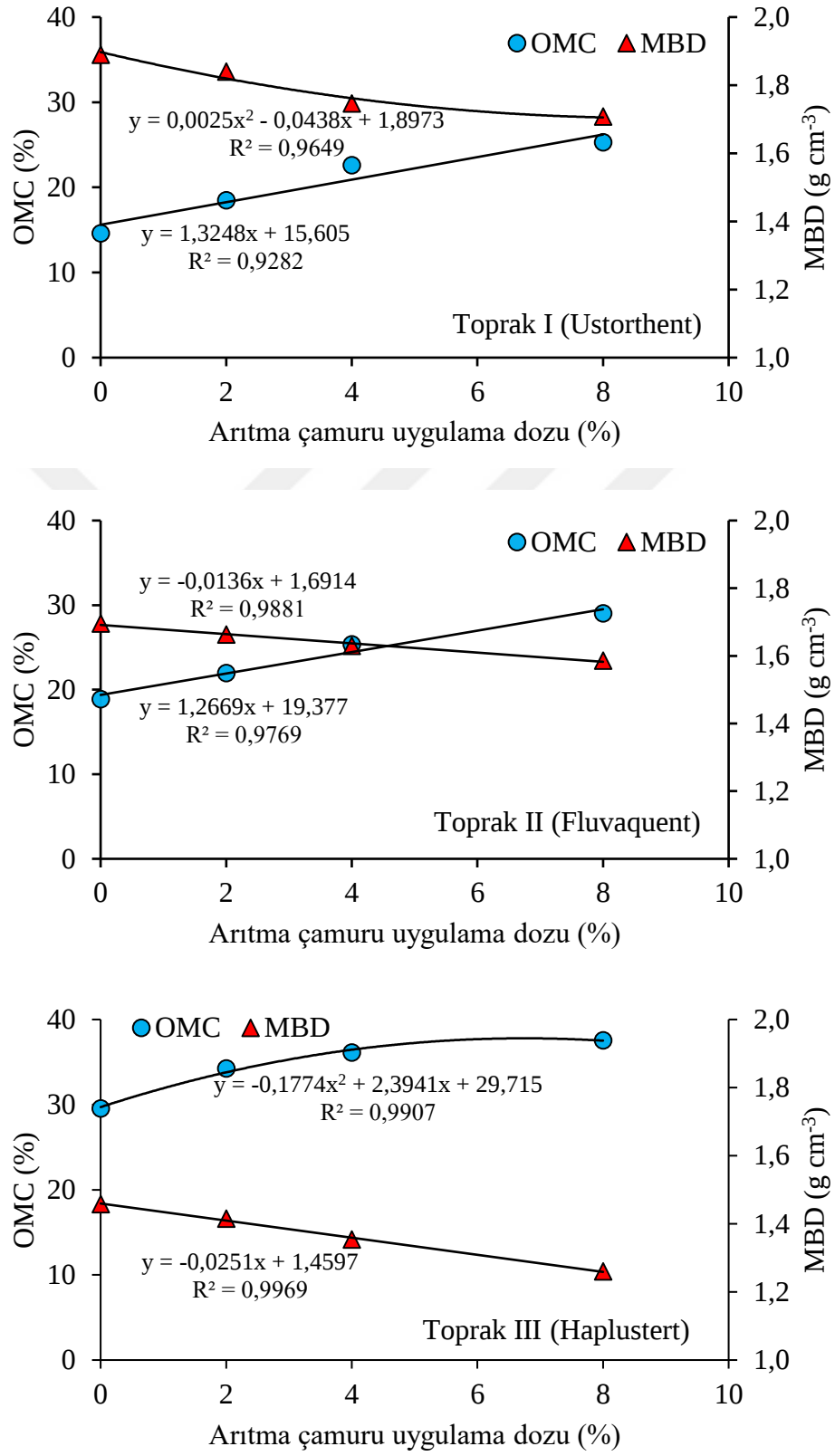
Çizelge 4.5. Toprakların Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine arıtma çamurunun etkileri (Ortalama±Std)

Topraklar	Uygulama oranları (w/w)	Optimum nem içeriği (%)	Maksimum hacim ağırlığı (g cm ⁻³)
Toprak I	Kontrol	14,59±1,17d	1,89±0,03a
	%2	18,49±0,90c	1,84±0,01b
	%4	22,59±1,72b	1,75±0,02c
	%8	25,30±1,01a	1,71±0,02d
	Ortalama	20,24±4,38C	1,80±0,08A
<i>p</i>		<0,05	<0,05
Toprak II	Kontrol	18,88±2,00c	1,70±0,03a
	%2	21,96±1,75c	1,66±0,01ab
	%4	25,37±1,76b	1,63±0,01b
	%8	29,04±1,29a	1,59±0,02c
	Ortalama	23,81±4,22B	1,64±0,05B
<i>p</i>		<0,05	<0,05
Toprak III	Kontrol	29,55±2,24c	1,46±0,03a
	%2	34,24±1,04b	1,41±0,02a
	%4	36,12±0,64ab	1,35±0,03b
	%8	37,57±0,63a	1,26±0,02c
	Ortalama	34,37±3,35A	1,37±0,08C
<i>p</i>		<0,05	<0,05
Genel Ortalama	Kontrol	21,00±6,86d	1,68±0,19a
	%2	24,90±7,25c	1,64±0,19b
	%4	28,03±6,32b	1,58±0,18c
	%8	30,63±5,52a	1,52±0,20d
	<i>p</i>	<0,05	<0,05

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0,05).



Şekil 4.2. Araştırma topraklarının Proctor sıkışma testi eğrileri



Şekil 4.3. Arıtma çamuru uygulama dozları ile OMC ve MBD arasındaki ilişkiler

Araştırma topraklarında en fazla sıkışma durumları kontrol seviyelerinde meydana gelmiş olup en yüksek MBD değerleri söz konusu durumda elde edilmiştir. Arıtma çamuru uygulama dozu arttıkça sıkışmanın en önemli göstergesi olan MBD değerleri düşmüş ve en düşük değerler %8 AÇ uygulama dozlarında belirlenmiştir. Toprak I'in kontrol seviyesinde MBD değeri 1.89 g cm^{-3} iken AÇ uygulama dozlarının artışı ile düşüş göstermiş, %2, 4 ve 8 uygulama dozları sonrasında sırasıyla 1.84, 1.75 ve 1.71 g cm^{-3} olarak belirlenmiş olup kontrole göre %2.6, 7.4 ve 9.5 oranlarında düşüşlerin meydana geldiği saptanmıştır. Toprak II ve III'de de kontrole göre en fazla düşüş oranları %8 AÇ dozunda, %6.5 ve %13.7 olarak hesaplanmıştır. Genel ortalama kontrol seviyesinde MBD değeri 1.68 g cm^{-3} iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulamaları sonrasında 1.64, 1.58, 1.52'ye düştüğü ve %2.4, 6.0 ve 9.5 oranlarında düşüşlerin meydana geldiği saptanmıştır. Arıtma çamuru uygulaması ile OMC arasında Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.967**, 0.937** ve 0.904** önemli düzeyde pozitif korelasyon belirlenirken, AÇ-MBD arasında önemli düzeyde negatif korelasyon (-0.966**, -0.934**, -0.953**) belirlenmiştir. Genel korelasyonda ise AÇ-OMC arasında önemli seviyede pozitif (0.503**) ilişki belirlenirken, AÇ-MBD arasında negatif (-0.328) ilişki tespit edilmiştir (Çizelge 4.4).

Daha önceki yıllarda yapılmış olan bazı çalışmalar, toprak strüktürel yapısının iyileşmesi ve özellikle agregat stabilitesindeki artışların toprak sıkışabilirliğini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Baumgart and Horn 1991; Barzegar *et al.* 1996; Aksakal *et al.* 2013). Organik madde ilavesi ve/veya birikimini destekleyen tarımsal yönetim uygulamalarının AS'ni artırdığı bilinmektedir (Batjes 2014; Yazdanpanah *et al.* 2016). Toprağa ilave edilen organik maddenin mineralizasyonu ile açığa çıkan organik bileşiklerin toprak mineral partikülleri arasındaki kohezif kuvvetleri artırarak AS'ni artırdığı bildirilmektedir (Chenu *et al.* 2000; Yazdanpanah *et al.* 2016). Bu çalışmada da, toprağa ilave edilen AÇ'nun toprak organik maddesini ve AS'ni önemli düzeyde artırdığı belirlenmiştir (Çizelge 4.2). Araştırma topraklarının agregat stabilitelerinin artması ile OMC değerlerinin arttığı, MBD değerlerinin azaldığı belirlenmiş olup; AS-OMC arasında önemli pozitif korelasyonlar belirlenirken, AS-MBD arasında önemli negatif korelasyonlar tespit edilmiştir. Toprak I, II ve III için, AS-OMC arasındaki

korelasyon katsayılar 0.907**, 0.881**, 0.895** ve AS-MBD arasındaki korelasyon katsayıları -0.887**, -0.909**, -0.851** olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3).

Toprakların LL ve PL değerleri, yönetim uygulamaları için indikatör olarak kullanılan fiziksel kuvvetlere karşı direnç ve sıkışabilirlik gibi toprak fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan gösterge parametrelerindendir. Arıtma çamuru uygulamaları, maksimum sıkışmanın meydana geldiği OMC değerlerine karşılık gelen LL ve PL değerlerindeki nem içeriklerini artırmıştır. Kumlu tın tekstür sınıfındaki Toprak I için maksimum sıkışmanın meydana geldiği OMC değeri kontrolde 0.54LL değerine karşılık gelirken, %2, 4 ve 8 AÇ uygulama dozlarında 0.56LL, 0.61LL ve 0.59LL'ye yükselmiştir. Toprak I'in kontrolünde OMC 0.71PL iken %2, 4 ve 8 AÇ uygulama dozları sonrasında 0.77PL, 0.79PL ve 0.78PL değerlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Benzer artışlar Toprak II ve III'de de belirlenmiştir. Bir çok çalışmada da benzer sonuçlar belirlenmiş olup; OMC-LL-PL arasında önemli pozitif ilişkiler tespit edilmiştir (Terzaghi *et al.* 1988; Mueller *et al.* 1990; Dexter and Bird 2001; Mueller *et al.* 2003; Barzegar *et al.* 2004; Mosaddeghi *et al.* 2009; Aksakal *et al.* 2013). Genel korelasyonda, OMC-LL arasındaki korelasyon katsayısı 0.950** ve OMC-PL arasındaki 0.976** olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

5. SONUÇ

Farklı tekstür sınıfındaki topraklara arıtma çamuru uygulamalarının yapıldığı bu çalışmada; arıtma çamuru uygulamalarının araştırma konusu her üç toprağın OM içeriklerini ve AS değerlerini kontrollerine göre önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Uygulama dozu artışı ile OM içeriklerinin ve AS değerlerinin de arttığı belirlenmiş olup, en yüksek değerler en yüksek uygulama dozu olan %8'de elde edilmiştir.

Araştırmada kullanılan toprakların kıvam limitleri arasında önemli düzeyde farklılıklar olduğu belirlenmiş olup, en yüksek LL, PL, PI, BL ve FI değerleri en yüksek kil içeriğine sahip Toprak III'de (Haplustert) elde edilmiştir. İncelenen parametreler (LL, PL, PI, BL, FI) kil içeriği ile önemli düzeyde pozitif ilişki gösterirken, kum ve silt içeriği ile önemli düzeyde negatif ilişki göstermişlerdir. Arıtma çamuru uygulamaları toprakların LL, PL, BL ve FI değerlerinde önemli düzeyde ($p<0.05$) artışlar meydana getirmiştir. Arıtma çamurunun LL üzerine etkinliğinin toprağın kil içeriğinin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, arıtma çamuru uygulamalarının Toprak I'in PI değerlerinde önemli düzeyde artışlar meydana getirdiği, Toprak II ve III'ün PI değerlerinde ise meydana gelen değişimlerin önemsiz olduğu belirlenmiştir.

Arıtma çamuru uygulamaları ile Proctor testinde en yüksek sıkışmanın elde edildiği OMC değerlerinin önemli düzeyde arttığı, MBD değerlerinin ise önemli düzeyde düştüğü belirlenmiştir. Uygulama dozu arttıkça OMC değerlerinin arttığı, MBD değerlerinin düştüğü belirlenmiş olup, en yüksek OMC ve en düşük MBD değerleri %8 AÇ uygulama dozunda gözlemlenmiştir. Ayrıca, arıtma çamuru uygulamaları maksimum sıkışmanın meydana geldiği OMC değerlerine karşılık gelen LL ve PL değerlerindeki nem içeriklerini artırmıştır.

Bu araştırmanın sonuçları; arıtma çamuru uygulaması ile toprakların AS değerlerindeki artışın OMC değerlerini artırmada, MBD değerlerini düşürmede önemli bir faktör olduğunu, mekaniksel kuvvetlere ve fiziksel deformasyona karşı daha dirençli hale

geldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, OMC değerlerinin LL ve PL'ye karşılık gelen oransal değerlerindeki artışlar, arıtma çamuru uygulanmış toprakların kontrolleri ile kıyaslandığında daha yüksek nem içeriklerinde daha fazla dağılabilir olduğunu ve toprakların herhangi bir deformasyona uğramadan daha yüksek nem içeriklerinde daha kolay işlenebileceğini göstermektedir. Arıtma çamuru uygulaması; toprakların daha geniş bir aralıkta daha kolay işleme olanağı sağlarken daha az sıkışmanın oluşmasını da sağlayacaktır.

Arıtma çamuru; yüksek oranda organik madde ve farklı miktarlarda makro ve mikro besin elementi içeriğiyle toprak kalitesinin olumlu yönde gelişmesini teşvik etmektedir. Ancak, farklı formdaki kirleticiler, ağır metaller ile çeşitli patojen mikroorganizmalar ve çözünabilir tuzlar içerebileceğinden dolayı toprak özelliklerini olumsuz yönde etkileme potansiyeli de vardır. Bu nedenle, uygulanacak arıtma çamurunun özellikleri dikkate alınarak kontrollü bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgül, M., 1992. Daphan Ovası Topraklarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üni. Fen Bilimleri Enst. Doktora Tezi.
- Akgül, M., 1994. Daphan ovası topraklarının temel toprak etütleri I. Bazı fiziksel ve kimyasal özellikler. Atatürk Üni. Ziraat Fak. Der. 2: 223-236.
- Aksakal, E.L., Angin, I., Oztas, T., 2013. Effects of diatomite on soil consistency limits and soil compactibility. *Catena* 101: 157-163.
- Allmaras, R.R., Juzwik, J., Overton, R.P., and Copeland, S.M., 1993. Soil compaction: causes, effects, Management in bareroot nurseries. Northeastern and Intermountain Forest Nursey Associations, 1993 August 25, St. Louis, MO. General Tech. Report RM-243. Ft. Collins, CO: U.S. Depart. Of Agri., Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 158 pp.
- Alloway, B., Jackson, P., 1991. The Behaviour of Heavy Metals in Sewage Sludge Avended Soils. Elsevier Science Publishers B.V., UK.
- Angin, İ., 2008. Arıtma Çamurlarının Fiziksel ve Kimyasal Toprak Düzenleyicisi Olarak Kullanımı. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Doktora Tezi, p. 97, Erzurum.
- Anonim, 2006. T.C. Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Erzurum Bölge Müdürlüğü Raporları.
- ASTM, 1992. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Atalay, İ., 1978. Erzurum ovası ve çevresinin jeolojisi ve jeomorfolojisi. Atatürk Üni. Yayınları No: 91.
- Ball, B.C., Campbell, D.J., Hunter, E.A., 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Tillage Research* 57, 83–91.
- Barik, K., 2004. Erzurum İli Yukarı Pasin Ovası Topraklarının Sıkışma Durumlarının Belirlenmesi. Atatürk Üni. Fen Bilimleri Enst. Doktora Tezi.
- Barzegar, A.R., Asoodar, M.A., Ansari, M., 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil Till Res* 57: 167-172.
- Barzegar, A.R., Hashemi, A.M., Herbert, S.J., Asoodar, M.A., 2004. Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in Fluvisols in southwest Iran. *Soil Till Res* 78: 45-52.
- Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P., 1996. Soil structure degradation and mellowing of compacted soils by saline-sodic solutions. *Soil Sci Soc Am J* 60: 583-588.
- Batjes, N.H., 2014. Projected changes in soil organic carbon stocks upon adoption of recommended soil and water conservation practices in the upper Tana River catchment, Kenya. *Land Degrad Dev* 25: 278-287.
- Baumgart, T., Horn, R., 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil Till Res* 19: 203-213.

- Bhushan, L., Sharma, P.K., 2002. Long-term effects of lantana (*Lantana spp. L.*) residue additions on soil physical properties under ricewheat cropping. I. Soil consistency, surface cracking and clod formation. *Soil Till Res* 65: 157-167.
- Bilgin, N., Eyüpoğlu, H. ve Üstün, H., 2002. Biyokatıların (Arıtma Çamurlarının) Arazide Kullanımı. ASKİ Arıtma Tesisi Başkanlığı – KHGM Ankara Araştırma Enstitüsü.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986a. Particle Density. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 377-382, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986b. Bulk Density. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 363-375, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Blanco-Canqui H, Lal R. 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences* 23(6): 481-504.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Post, W.M., Izaurralde, R.C., Shipitalo, M.J., 2006. Organic carbon influences on soil particle density and rheological properties. *Soil Sci Soc Am J* 70: 1407-1414.
- Canbolat, M.Y., Barik, K., Özgül, M., 1999. Erzurum yöresinde farklı ana materyaller üzerinde oluşmuş üç toprak profilinin kıvam limitleri ve şişme-büzülme karakteristikleri. *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg.* 30(2): 121-129.
- Canbolat, M.Y., Öztaş, T., 1997. Toprağın kıvam limitleri üzerine etki eden bazı faktörler ve kıvam limitlerinin tarımsal yönden değerlendirilmesi. *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg.* 28(1): 120-129.
- Candemir F, Gülser C. 2011. Effects of different agricultural wastes on some soil quality indexes in clay and loamy sand fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42: 13-28.
- Carig, R.F., 1987. *Soil Mechanics*. New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci Soc Am J* 64: 1479-1486.
- Curtin, J.S., Mullen, G.J., 2007. Physical properties of some intensively cultivated soils of Ireland amended with spent mushroom compost. *Land Degradation & Development* 18: 355-368.
- De Jong, E., Acton, D.F., Stonehouse, H.B., 1990. Estimating the Atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents. *Can J Soil Sci* 70: 543-554.
- De Kimpe, C.R., Bernier-Cardou, M., Jolicoeur, P., 1982. Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil-water properties. *Canadian Journal of Soil Science* 62, 165-176.
- Demiralay, İ., 1977. Toprak Fiziği Ders Notları. Atatürk Üni. Ziraat Fak. Toprak Böl., 232 s, Erzurum.
- Demiralay, İ., Güresinli, Y.Z., 1979. Erzurum ovası topraklarının kıvam limitleri ve sıkışabilirliği üzerine bir araştırma. *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Dergisi* 10 (1-2): 77-93.
- Dexter, A.R., Bird, N.R.A., 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till Res* 57: 203-212.

- Düring, R.A., Gäth, S., 2002. Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go? *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 165(4): 544-556.
- Ekwue, E.I., Stone, R.J., 1995. Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 38, 357-365.
- EPA, 1994. Land Application of Biosolids. Process Design Manual. Cincinnati, OH, USA.
- Epstein, E., 2003. Land Application of Sewage Sludge and Biosolids. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.
- Felton, G.K., Ali, M., 1992. Hydraulic parameter response to incorporated organic matter in the B horizon. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 35, 1153-1160.
- Gee, G.W., and Bauder, J.W., 1986. Particle-Size Analysis. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 383-411, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Hakansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Research* 53 (2), 71-85.
- Harris, R.L., Redente, E.F., Barbarick, K.A., 1995. Sewage sludge application effects on runoff water quality in semiarid grassland. *Journal of Environmental Quality*, 24(1): 112-115.
- Haynes, R.J., Naidu, R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 123-137.
- Hemmat, A., Aghilinategh, N., Rezainejad, Y., Sadeghi, M., 2010. Longterm impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. *Soil Till Res* 108: 43-50.
- Jones, A.J., 1995. Soil compaction tips. Nebraska Cooperative Extension NF95-243. Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln.
- Keller, T., Arvidsson, J., Dexter, A.R., 2007. Soil structures produced by tillage as affected by water content and the physical quality of soil. *Soil Tillage Research* 92, 45-52.
- Keller, T., Dexter, A.R., 2012. Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. *Soil Res* 50: 7-17.
- Kemper, W.D., and Rosenau, R.C., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 425-442, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Khaleel, R., Reddy, K.R., Overcash, M.R., 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality* 10: 133-141.
- Korboulewsky, N., Dupouyet, S., Bonin, G., 2002. Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals, nitrogen, and phosphorus accumulation. *Journal of Environmental Quality* 31(5): 1522-1527.
- Lal, R., Shukla, M.K., 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker Inc., New York . 682 pp.

- Larson, W.E., Eynard, A., Hadas, A., Lipiec, J., 1994. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, pp. 597-625.
- Larson, W.E., Gupta, S.C., Useche, R.A., 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci Soc Am J* 44: 450-457.
- Malkawi, A.I.H., Alawneh, A.S., Abu-Safaqah, O.T., 1999. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Appl Clay Sci* 14: 257-278.
- Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., 1998. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils from Alberta. *Soil Tillage Research* 46, 193-202.
- McBride, R.A., 1993. Soil consistency limits. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publication/CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 519-527.
- McBride, R.A., Bober, M.L., 1989. A re-examination of alternative test procedures for soil consistency limit determination: I. A compression-based procedure. *Soil Sci Soc Am J* 53: 178-183.
- McLean, E.O., 1982. Soil pH and Lime Requirement. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 199-224, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Mosaddeghi, M.R., Morshedizad, M., Mahboubi, A.A., Dexter, A.R., Schulin, R., 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil Tillage Research* 105, 242-250.
- Mueller, L., Schindler, U., 1998a. Soil moisture and workability of heavy arable soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 44 (2), 161-174.
- Mueller, L., Schindler, U., 1998b. Wetness criteria for modelling trafficability and workability of cohesive arable soils. *Proceedings of the Seventh Annual Drainage Symposium on Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment*, Orlando, FL, March 8-10, 1998, pp. 472-479.
- Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N.R., Lal, R., 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil Till Res* 72: 9-20.
- Mueller, L., Tille, P., Kretschmer, H., 1990. Trafficability and workability of alluvial clay soils in response to drainage status. *Soil Tillage Research* 16, 273-287.
- Navas, A., Bermudez, F., Machin, J. 1998. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*. 87: 123-135.
- Nelson, D.W., and Sommers, L.E., 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 539-579, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Nelson, R.E., 1982. Carbonate and Gypsum. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 181-197, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Özdemir, N., 1998. Toprak Fiziği. Ondokuz Mayıs Üniv. Ziraat Fak. Ders Kitabı No: 30, 209 s, Samsun.

- Özgül, M., 2003. Erzurum Yöresinde Yaygın Olarak Bulunan Büyük Toprak Gruplarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Anabilimdalı Doktora Tezi.
- Proctor, R.R., 1933. First of four articles on the design and construction of rolled-earth dams. *Fundamental principles of soil compaction*. *Engr. Nevs. Rec.*, 111, 245-248.
- Reeve, M.J., Earl, R., 1989. The effect of soil strength on agricultural and civil engineering field operations. *Soil Survey and Land Research Centre Report to the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Contract No. 3806*, Silsoe, Bedford. 55 pp.
- Rhoades, J.D., 1982a. Cation Exchange Capacity. *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd Edition. *Agronomy No: 9*, 149-157, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Rhoades, J.D., 1982b. Soluble Salts, In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed.: ASA, SSSA, *Agronomy No: 9*. Madison, Wisconsin, pp. 167-179.
- Rixon, A.J., Yao, X., Zhu, H.X., 1991. Effect of heavy applications of organic residues on the physical properties of paddy soils in China. *Soil Till Res* 20: 101-108.
- Sandoval, E.M., Celis, H.J., Bahamondes P.C., 2012. Effect of sewage sludge and sawdust in association with hybrid ryegrass (*Lolium x hybridum* Hausskin.) on soil macroaggregates and water content. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(4): 568-573.
- Shirani, H., Hajabbasi, M.A., Afyuni, M., Hemmat, A., 2002. Effects of farmyard manure and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. *Soil and Tillage Research* 68: 101-108.
- Singh, R.P., Agrawal, M., 2010. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 632-641.
- Smedema, L.K., 1993. Drainage performance and soil management. *Soil Technology* 6, 183-189.
- Smith, C.W., Hadas, A., Dan, J., Koyumdjisky, H., 1985. Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. *Geoderma* 35, 47-65.
- Sort, X., Alcaniz, J.M., 1996. Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitations of limestone quarries. *Land Degradation and Development*, 7(1): 69-76.
- SPSS Inc. 2004. *SPSS® 13.0 Base User's Guide*. Chicago, IL.
- Stanchi, S., Oberto, E., Freppaz, M., Zanini, E. 2009. Linear regression models for liquid and plastic limit estimation in Alpine soils. *Agrochimica* 53: 322-338.
- Stiegler, J.H., 2001. Soil compaction and crusts. *Oklahoma Cooperative Extension Service F-2244*, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University.
- Stone, R.J., Ekwue, E.I., 1996. Soil compressibility as influenced by sewage sludge incorporation. *J. Agric. Eng. Res.*, 64: 227-236.
- Swan, J.B., Moncrief, J.F., and Voorhees, W.B., 1994. Soil compaction: causes, effects, and control. *Uni. Of Minnesota Extension Service*, BU-3115-GO.

- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel H. D., 2003. Treatment, Reuse, and Disposal of Solids and Biosolids, Fourth Edition Ch. 14 in Wastewater Engineering Treatment and Reuse, Metcalf & Eddy, Inc.
- Terzaghi, A., Hoogmoed, W.B., Miedema, R., 1988. The use of the 'wet workability limit' to predict the land quality 'workability' for some Uruguayan soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36, 91-103.
- Thomas, G.W., Haszler, G.R., Blevins, R.L., 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test. *Soil Science* 161, 502-508.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Tivy, J., 1990. *Agricultural Ecology*. London, UK: Longman.
- Topçuoğlu, B. Önal, M.K., Arı, N., 2003. Toprağa uygulanan kentsel arıtma çamurunun domates bitkisine etkisi I. Bitki besinleri ve ağır metal içerikleri. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(1): 87-96.
- Tsadilas, C.D., Mitsios, I.K., Golia, E., 2005. Influence of biosolids application on some soil physical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 709-716.
- Wagner, L.E., Ambe, N.M., Barnes, P., 1992. Tillage-induced soil aggregate status as influenced by water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 35 (2), 499-504.
- Wagner, L.E., Ambe, N.M., Ding, D., 1994. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 37, 1121-1125.
- Watts, C.W., Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur J Soil Sci* 49: 73-84.
- Yazdanpanah, N., Mahmoodabadi, M., Cerdà, A., 2016. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma* 266: 58-65.
- Zhang, H., Hartge, K.H., Ringe, H., 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. *Soil Science Society of America Journal* 61, 239-245.

ÖZGEÇMİŞ

19.12.1990 tarihinde Erzurum’da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2009 yılında kayıt yaptırdığı Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümünden 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı.

