

TOPRAK DEFORMASYONU VE GERİLİMİNİN REOLOJİ DENKLEMİNE GÖRE ANALİTİK İNCELENMESİ

İmanverdi EKBERLİ* Coşkun GÜLSER Nutullah ÖZDEMİR

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Samsun
*iman@omu.edu.tr

Geliş Tarihi: 20.05.2013

Kabul Tarihi: 15.01.2014

ÖZET: Toprakların gevşeme süreçleri toprağın deformasyon ve gerilim özellikleri ile ilişkilidir. Toprakların deformasyon ve gerilim durumu tarımsal faaliyetleri önemli düzeyde etkilemektedir. Bu çalışmada temel reoloji denkleminin göre toprağın deformasyon ve gerilimi teorik olarak incelenmiştir. Toprakta gevşeme sürecine neden olan başlangıç deformasyonunun harmonik ve doğrusal değişim durumlarında temel reoloji denkleminin çözümü kullanılarak zamana bağlı toprak gerilimi $[\sigma(t)]$ belirlenmiştir. Kayma sürecini oluşturan başlangıç geriliminin harmonik ve doğrusal değişim koşullarında ise toprak deformasyonunu $[\varepsilon(t)]$ gösteren ilişkiler elde edilmiştir. Toprağa uygulanan dış yükün etkisi altında zamana bağlı oluşan deformasyon, toprak nemi, hacim ağırlığı gibi toprağın fiziksel özellikleri, tarım alet ve makinelerinden oluşan doğrusal ve açılma deformasyon hızlarıyla doğru orantılı olarak değişmektedir.

Anahtar Sözcükler: Temel reoloji denklemi, harmonik, doğrusal, deformasyon, gerilim

ANALYTICAL INVESTIGATION OF SOIL DEFORMATION AND STRAIN ACCORDING TO RHEOLOGY EQUATION

ABSTRACT: Relaxation processes of soils are related with deformation and strain properties of soils. Deformation and strain status of soils affect agricultural practices significantly. In this study, soil deformation and strain was investigated theoretically according to basic rheology equation. In case of harmonic and linear variability of initial deformation which causes relaxation process in soil, soil strain $[\sigma(t)]$ was determined using solution of basic rheology equation with respect to time. Relationships for soil deformation $[\varepsilon(t)]$ were obtained in harmonic and linear variability conditions of initial strain causing shear process. Time dependent soil deformation occurred with external load, changes linearly with soil physical properties such as moisture, bulk density, and linear and angular deformation velocities of agricultural machinery and equipments.

Keywords: Basic rheology equation, harmonic, linear, deformation, strain

1. GİRİŞ

Reoloji genel anlamda mekanik kuvvetlerin etkisi altında katıların deformasyonunu ve sıvıların akışını inceleyen bilim dalıdır. Herhangi bir sıvıya uygulanan kayma gerilmesi ile kayma hızı (deformasyonun oluşum hızı) doğru orantılıysa, yani sıvının viskozitesi kayma hızı ile değişmiyorsa bu sıvıya Newtonyen sıvı adı verilir. Newtonyen olmayan sıvılarda ise sıvının viskozitesi kayma gerilmesi ile kayma hızının uygulanma süresine bağımlı veya bağımsız olarak değişebilir (Barnes ve ark., 1989, Alemdar, 2001). Kil, şeker çözeltileri, mısır nişastası-su karışımı, su-kum karışımı gibi newtonyen olmayan süspansiyonlarda, deformasyon hızındaki artışla viskozitede de artışlar meydana gelmektedir (Ün, 2007).

Toprak verimliliğinin iyileştirilmesi ve korunması günümüzün önemli ekolojik problemlerinden olup, verimliliğin korunmasına bir çok antropojen faktör negatif etki yapmaktadır. Tarım alanlarında makinelerin sürekli kullanımı toprak sıkışmasına,

dolayısıyla toprakların fiziksel- mekanik özelliklerinin bozulmasına ve tarla bitkilerinin verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Tarla bitkilerinin verimliliğindeki süreklilik, toprakların elverişli fiziksel özelliklerine de bağlı olmaktadır. Toprak tekstürü, hacim ağırlığı, nem toprakların fiziksel özelliklerini belirleyen temel parametrelerdir. İnsan etkileri sonucunda oluşan toprak sıkışmasının ortadan kaldırılmasının ve kültür bitkilerinin gelişimi için toprak koşullarının iyileştirilmesinin bilimsel yöntemlerin belirlenmesi, farklı toprakların fiziksel-mekaniksel özelliklerinin incelenmesi ile mümkündür.

Toprağın reoloji özelliklerindeki değişim dışarıdan uygulanan yük ve toprak arasındaki karşılıklı etkileşimler sonucunda oluşmaktadır. Dış yükün toprağa etkisine bağlı olarak, dağılmaya neden olan ve olmayan deformasyon toprağın fiziksel-mekaniksel özelliklerine göre değişir (Şein ve Karpaçevskiy, 2007). Jiang (1996) yaptığı laboratuvar çalışmasında kaolinit hamurunun davranışını dışarıdan farklı büyüklükte kuvvet ve su uygulamaları altında

incelemiştir. Çamurun özellikle içerdiği nem oranı ve dışarıdan uygulanan kuvvetlerin büyüklüğüne bağlı olarak akışkan-elastik-plastik maddelerin özelliklerinin bileşimini gösterdiği belirtmiştir. Akışkan-elastik-plastik maddelerin davranışlarının matematiksel modellenmesi Shibayama ve ark. (1990) ve Trien (1991) tarafından ifade edilmiştir. Qi ve Hou (2006), su ve çamurun düşey yöndeki iki boyutlu bir aradaki taşınımını gerilim ve stres ilişkilerine bağlı reoloji denklemi ile göstermişlerdir. Araştırmacılar, su dalgası ve akımları altında kohezif sedimentlerin çökmesi, birikmesi ve erozyonu, çamur yataklarındaki akışkanlık ve sıvılaşıma gibi reoloji özellikleri inceleyen konularda çalışmalar yapılımasının gerekliliğini belirtmişlerdir. Ekberli ve ark. (2012) erozyon sonrası oluşan üç boyutlu toprak gerilimini matematiksel olarak değerlendirmişlerdir. Ekberli ve ark. (2012), katı ortamdaki gerilim ve deformasyonu, iki ve üç boyutlu gerilimi, deformasyonun oluşumunu, doğrusal esnekliği teorik olarak incelemişlerdir. Erozyon sonrası toprak gerilimini özgül ağırlığa bağlı olarak farklı derinlikler için, gerilim ve deformasyon arasındaki zamana bağlı olmayan denklemler kullanarak analitik olarak ifade etmişlerdir.

Zemin mekaniğinde toprağın reoloji özelliklerinden olan gerilim ve deformasyon arasındaki ilişkiyi ifade eden denklemler; i) zamana bağlı olmayan ve ii) zamana bağlı olan denklemler şeklinde ikiye ayrılır. Gerilim (σ) ile h kadar sıkışmadaki mutlak deformasyon veya nispi deformasyon (ε) arasındaki ilişkiyi gösteren $\sigma = \sigma(h)$ veya $\sigma(\varepsilon)$ biçimindeki denklemler sadece kalıcı deformasyonun ifade edilmesine ve hesaplanmasına imkan sağlamakta, buna rağmen su ile doymuş topraklarda olduğu gibi kalıcı olmayan deformasyonda ortaya çıkabilmektedir. Farklı topraklarda hem kalıcı hem de kalıcı olmayan deformasyon değerleri toprağa etki eden yükün uygulama hızına ve etki zamanına bağlı olması durumunda birinci (i) türden, zamana bağlı olmayan denklemler ile ifade edilememektedir.

Birinci (i) tür denklemlerde olan yetersizlikleri, ikinci tür (ii) zamana bağlı olan denklemler, yani akışkan (viskoz)-elastik ortam teorisinin reoloji denklemi ortadan kaldırmaktadır. Gerilim ve deformasyon arasındaki ilişkileri zamana bağlı olan deformasyonun gerçekleştiği maddeler akışkan-elastik ortamları oluşturmaktadır. Deformasyona uğrayan akışkan-elastik ortamın reoloji özellikleri bu ortam için karakteristik olup, gerilim ve kayma süreçleri sonucunda ortaya çıkmaktadır (Koltunov ve ark., 1983).

Sıkıştırma (dinamik) yükünün etkisi altındaki toprağın her bir fiziksel durumuna, neme bağlı olarak belirli bir deformasyon kuralı uygun gelmektedir. Doymuş toprak nem koşullarından daha düşük nem düzeylerinde dış yüklerin etkisiyle toprakta oluşan deformasyon dönüşümlü ve dönüşümsüz (kalıcı)

olarak ayrılmaktadır. Dış yükün etkisi ile toprak sıkışmaya ve sertleşmeye maruz kalmaktadır. Kalıpla sıkıştırma biçimindeki yükün toprağa etkisi sonucunda, düşey yönde toprağın yer değişimi çok az olmakta, yükün artması ile çökme artışı zayıflamakta ve deformasyon sabitleşmektedir. Çok küçük bir kuvvetin etkisiyle oluşan ve etkileyici kuvvetin artmasıyla oluşum hızı artan toprağın kalıcı deformasyonunun (strüktürel deformasyon) oluştuğu ortamı akışkan kabul etmek mümkündür.

Dış yükün etkisinin kaldırılması sonucunda, toprakta elastik ve akışkan kısımlardan oluşan geri dönüşümlü deformasyon ortaya çıkmaktadır. Topraktaki minerallerin kristal kafes bağlantılarının yer değişimi sonucunda ortaya çıkan elastik deformasyon, geri dönüşümlü deformasyonun çok az bir kısmını oluşturmaktadır. Su ile doymamış toprağa uygulanan basıncın değişmesiyle eşzamanlı olarak, elastik deformasyon çok çabuk oluşmakta ve sonlanmaktadır. Her hangi bir zamanda oluşan geri dönüşümlü deformasyon akışkanlığı karakterize ederek, elastik deformasyona göre daha fazladır. Topraktaki su-kolloid ilişkisine bağlı bozulmuş strüktürel yapının iyileşmesi, geri dönüşümlü deformasyonun akışkan kısmı ile ilişkilidir.

Yüksek ve nitelikli verim elde etmek için sürekli gelişen teknolojilerin tarımda kullanılması nedeniyle, tarım makinelerinin toprağa olan etkisi dinamik bir süreç olmaktadır. Bu süreç de toprağa etki eden dış yük ve deformasyon arasındaki ilişkinin en uygun ifadesinde zaman faktörünün göz önüne alınması gerekir.

Deformasyona uğrayan ortamın başlangıç özellikleri, ilk gerilim ve deformasyon değerleri, ilk deformasyonun hızı ve durumu, gevşeme (sabit deformasyonda materyalin veya deformasyona uğrayan ortamın zamana bağlı olarak geriliminin değişimi) ve kayma (sabit gerilimde deformasyonun artması) süreçlerine önemli düzeyde etki yapan faktörlerdir (Selivanov, 1999).

Bolsman-Volterra akışkan-elastiklik teorisi akışkan elastik ortamın deformasyonunun modellenmesini sağlayan en genel teoridir (Koltunov ve Kravçuk, 1973; Koltunov ve ark., 1983). Bazı toprakların deformasyon süreçlerinin modellenmesinde, bu teoriye dayanarak elde edilen denklemler kullanılmaktadır (Vyalov, 1978; 1986). Deneysel verilerin değerlendirilmesi sonucunda, birçok toprağın sıkışma ve kayma zamanındaki deformasyon süreçlerinin doğrusal olmayan bağımsız terimli 2. tip doğrusal Volterra integral denklemi ve Koltunov yöntemiyle yeterli hassaslıkta modellenebileceği belirlenmiştir. İntegral denklemlerle deneysel verilerin modellenmesi, Fisher testine göre %5 düzeyde benzerlik göstermektedir (Zolotarevskaya, 1998; 2003a).

Bu çalışmanın amacı, dış yük etkisinin kaldırılması ile gerilim ortamında oluşan toprağın gevşeme süreçlerinin matematiksel modellenmesinin incelenmesidir.

2. AKIŞKAN-ELASTİK ORTAMA TEMEL REOLOJİ DENKLEMİNİN UYGULANMASI

Kısa zaman aralığında elastiklik, uzun zaman aralığında ise plastiklik özelliklerine sahip ortam akışkan-elastik ortamdır. Akışkan-elastik ortamın gerilim değişim hızı ($\dot{\sigma}$), elastik deformasyonun doğrusal hızını ($\dot{\varepsilon}_e$); σ gerilimi ise plastik deformasyonun doğrusal hızını ($\dot{\varepsilon}_f$) oluşturmaktadır. Akışkan-elastik ortam modelinde, akışkan-elastik ortamın deformasyon hızı, $\dot{\varepsilon}_e$ ve $\dot{\varepsilon}_f$ hızlarının vektörel toplamına eşit olabilir.

Akışkan-elastik Maxwell cisimi olarak bilinen bu ortama bir eksenli σ geriliminin etki yaptığı varsayılırsa, bir eksenli veya sıkışmadaki gerilim (σ) ve deformasyon (ε) arasındaki ilişkiyi ifade eden, $\sigma = E\varepsilon$ Hooke yasasına göre elastik deformasyon

$$\varepsilon_e = \sigma / E \quad (1)$$

biçiminde olur (burada, E -Young modülüdür).

Normal gerilimin (σ) etkisi altında olan ortamın deformasyon hızı

$$\frac{d\varepsilon_f}{dt} = \frac{\sigma}{2\mu} \quad (2)$$

(burada, t -zaman; μ -dinamik plastiklik katsayısı) olmaktadır. Ortamın tam deformasyonu elastik ve sıvıya benzer kısımların deformasyon toplamına eşit olduğundan, $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_f$ olur. Tam deformasyon hızı ise

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_f}{dt} \quad (3)$$

olarak belirlenir. (1)'den elde edilen $\frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt}$ ifadesi ve (2) eşitliği (3)'de yerine konursa,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{2\mu} \sigma + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4)$$

elde edilir. (4) ifadesi temel reoloji denklemi olup, akışkan-elastik Maxwell cismin de deformasyon hızı, gerilim ve gerilimin değişim hızı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

Akışkan elastik ortamda $t = 0$ anında gerilimin oluşturduğu ani deformasyonun (ε_0) herhangi bir anda ($t > 0$) sabit olduğu durumu inceleyelim. (4) kuralı ile ifade olunan hızlı deformasyon sürecinde, ortam kendini elastik cisim gibi göstermekte $d\varepsilon/dt$ ve $d\sigma/dt$ ise temel etkenler olmaktadır. Bu nedenle, başlangıç anında oluşan gerilim $\sigma_0 = E\varepsilon_0$ olur. Sonraki aşamada deformasyon sabit olmakta ($d\varepsilon/dt = 0$) ve (4) denklemi aşağıdaki biçime dönüşmektedir:

$$\frac{1}{2\mu} \sigma + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = 0$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{2\mu} \sigma \quad \text{veya}$$

$$d\sigma = -\frac{E}{2\mu} \sigma dt \quad \text{veya}$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{2\mu} dt \quad (5)$$

(5) ifadesinin integrali alınır,

$$\ln \sigma = -\frac{E}{2\mu} t + C \quad \text{veya}$$

$$\sigma = e^{-\frac{E}{2\mu} t + C} = e^{-\frac{E}{2\mu} t} e^C \quad (6)$$

olur. $\sigma(t = 0) = \sigma_0$ başlangıç koşuluna göre

$e^C = \sigma_0$ olarak, (6)'dan $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{2\mu} t}$ elde edilir.

Başlangıç geriliminin e kat azalması zamanı, yani akışkan-elastik ortamın gevşeme süresi (t_{ve}),

$\frac{\sigma_0}{e} = \sigma_0 e^{-\frac{E}{2\mu} t}$ ifadesinden $t_{ve} = 2\mu / E$ olarak

belirlenir.

3. TOPRAK GERİLİMİ VE DEFORMASYONU ARASINDAKİ İLİŞKİ

Tarım alet ve makinelerinin toprakla etkileşimi çok kısa bir zaman sürecinde gerçekleştiğinden, 2. tip doğrusal Volterra integral denklemin yerine geçebilen daha basit denklemin bulunması gerekmektedir. Sıkışmış toprakların deneysel olarak belirlenmiş deformasyon özelliklerinin (Denisov, 1951; Tsytoovich, 1983) teorik olarak incelenmesinde, toprakların t anındaki değişen gerilimi (σ) ve nispi deformasyonu (ε) arasındaki ilişki t ve ε 'nin yeterli derecedeki küçük değerlerinde, yaklaşık olarak diferansiyel denklemle (temel reoloji denklemi ile) ifade edilebilir (Turcotte ve Schubert, 1985; Zolotarevskaya, 2003a). (4) diferansiyel denkleminde aşağıdaki ifade elde edilir.

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{E}{2\mu} \sigma + \frac{d\sigma}{dt} \quad (7)$$

Toprağın reoloji denklemindeki parametrelerin fiziksel anlamı farklı olup, bu denklem yapısal olarak ideal akışkan-elastik Maxwell cisminin deformasyon kuralını ifade eden diferansiyel denkleme, dolayısıyla (7) ifadesine benzerlik göstermekte ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$q \frac{d\varepsilon}{dt} = p\sigma + \frac{d\sigma}{dt} \quad (8)$$

Burada, $\frac{d\varepsilon}{dt}$ - sıkışan toprağın nispi deformasyonu,

$\frac{d\sigma}{dt}$ - sıkışma geriliminin değişim hızı; q ve p ise

toprağın akışkan ve elastik bileşenlerini ayırmadan, toprağın akışkan-elastik özelliğini bütün olarak karakterize eden katsayılar; h - deformasyon sürecinde toprak derinliğinin değişimi (cm);

$\varepsilon = \frac{h}{H_p}$ - sıkışan toprağın nispi deformasyonu ve

H_p - sıkışan toprağın deformasyon derinliğidir (cm).

Toprakta sıkışma geriliminin değişim hızı toprağın tam deformasyon değerine etki etmediği durumda, akışkan-elastik toprağın q (MPa) parametresi fiziksel anlamda toprağın deformasyon modülünü (elastik limit sınırları içinde bir cisme uygulanan gerilimin birim deformasyona oranı) göstermektedir. p (san^{-1}) parametresi gevşeme zamanının tersidir.

Tarım alet tekerleklerinin toprağa etkisi sonucunda oluşan $\sigma(t)$ temas gerilimi, genel olarak tekerleklerin doğrusal ($v, m/\text{san}$) ve açısal (ω, san^{-1}) hızına (dolayısıyla, deformasyonun doğrusal ve açısal hızına), tekerleklerin toprağa temas zamanına (t, san), toprak rutubetine ($w, \%$) bağlı olarak değişmektedir. $\sigma(t)$ temas gerilimi ve onu etkileyen faktörler arasındaki deneysel regresyon ilişkisinin (8) denklemine göre elde edilen teorik regresyon ilişkisiyle %5 düzeyinde benzerlik göstermesi, (8) denkleminin toprak sıkışmasının modellenmesinde uygulanabilirliğini göstermiştir (Habatov ve ark. 1987; Zolotarevskaya, 2003).

Gevşeme zamanının tersi olan p (san^{-1}) parametresi, tarım alet tekerleklerinin toprağa etkisi sonucunda oluşan harmoni deformasyon hızının (ω, san^{-1}) frekansına bağlı olmaktadır. Bu nedenle, (8) denkleminin çözümünde, $p = k\omega$ (burada, k - toprağın akışkan-elastik özelliğini ifade eden birimsiz katsayıdır) olduğunun göz önüne alınmalıdır. Zolotarevskaya (2003)'e göre, k ve q parametrelerinin, deneysel değerlere bağlı olarak, $k = f_1(\rho, \omega, w)$ ve $q = f_2(\rho, \omega, w)$ [burada, ρ (g/cm^3)-strüktürel yapısı bozulmamış kuru toprağın hacim ağırlığıdır] biçiminde doğrusal regresyon denklemleri ile ifade edilmesi mümkündür.

4. TOPRAĞIN REOLOJİ DENKLEMİNİN ANALİTİK ÇÖZÜMÜ

Tarımsal faaliyetlerde toprağın yüzey katmanına uygulanan bir yükün etkisiyle oluşan deformasyon sürecinin matematiksel modellenmesi anlık (saniye veya saniyenin kısımlarında), inşaat çalışmalarında ise daha uzun zamanda (saat veya günlerle) gerçekleştiği kabul edilir (Citovic, 1983; Habatov ve ark., 1987).

Dış yükün etkisi ile deformasyona uğrayan toprağın zamana bağlı olarak gerilim değişiminin (gevşeme sürecinin) incelenmesi için, topraktaki gerilim-deformasyon sürecinin iki aşamasının dikkate alınması gerekir. Birinci aşamada, $t \in [0; t_0]$ zamanında $\varepsilon = \varepsilon(t)$ deformasyonu $\varepsilon \in [0, \varepsilon_0]$ ve $\sigma = \sigma(t)$ gerilimi ise $\sigma \in [0; \sigma_0]$ aralıklarında artmaktadır. Topraktaki gerilim-deformasyon sürecinin ikinci aşamasında (gevşeme süreci) $t \in [t_0; \infty]$ zaman aralığında $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{sabit}$ olup, $\sigma = \sigma(t)$ gerilimi ise bu süre içerisinde artmaktadır. Toprağın gevşeme sürecini oluşturan başlangıç deformasyonunun harmonik ve doğrusal değişimi mümkündür.

Başlangıç deformasyonunun harmonik olarak değişimi aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a \cos \omega t, \quad t \in [0; t_0] \quad (9)$$

Burada, ε_a - deformasyonun amplitütü; ω - deformasyonun açısal hızıdır.

Sıkıştırılan toprağın nispi deformasyonunun (9)

koşulundan elde edilen $\frac{d\varepsilon}{dt} = -\omega\varepsilon_a \sin \omega t$ değişim

hızı (8) denkleminde yerine konursa aşağıdaki birinci dereceden doğrusal diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{d\sigma}{dt} + p\sigma = -q\omega\varepsilon_a \sin \omega t \quad (10)$$

(10) denkleminde $\sigma(t) = u(t)v(t)$ biçiminde değişken dönüşümü yapılarak, $u(t) = e^{-pt}$,

$$v(t) = -q\omega\varepsilon_a \left(\frac{pe^{pt}}{\omega^2 + p^2} \sin \omega t - \frac{\omega e^{pt}}{\omega^2 + p^2} \cos \omega t + C \right)$$

bulunur ve aşağıdaki genel çözüm elde edilir:

$$\sigma(t) = -q\omega\varepsilon_a e^{-pt} \left(\frac{pe^{pt}}{\omega^2 + p^2} \sin \omega t - \frac{\omega e^{pt}}{\omega^2 + p^2} \cos \omega t + C \right)$$

(C - integral sabitidir) (11)

$t = 0$ anındaki $\sigma(t) = 0$ başlangıç koşuluna göre

elde edilen $C = \frac{\omega}{\omega^2 + p^2}$ ifadesi ve $p = k\omega$

dikkate alındığında, (11) genel çözümünden aşağıdaki özel çözüm elde edilir:

$$\sigma(t) = -q\omega\varepsilon_a e^{-pt} \left(\frac{pe^{pt}}{\omega^2 + p^2} \sin \omega t - \frac{\omega e^{pt}}{\omega^2 + p^2} \cos \omega t + \frac{\omega}{\omega^2 + p^2} \right)$$

veya

$$\sigma(t) = \frac{q\varepsilon_a}{k^2 + 1} \left(\cos \omega t - k \sin \omega t - e^{-k\omega t} \right), \quad t \in [0; t_0] \quad (12)$$

$t \in [0, t_0]$ zaman aralığında (başlangıç gevşeme sürecinden önce) gerçekleşen dış etki sonucunda toprağın deformasyonu, deformasyon derinliği, k ve q parametreleri değişmektedir.

Toprağın hacim ağırlığının (ρ) değişimi sonucunda, gevşeme özellikleri değişmekte; akışkan- elastik toprağın özelliğini ifade eden parametreler k_1 ve q_1 yeni değerlerini almaktadır.

Gevşeme sürecinde $\varepsilon = \varepsilon_0 = \cos \omega t_0 = \text{sabit}$ olur. Bu durumda, elde edilen $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ ifadesi (8)'de yerine konursa aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\frac{d\sigma}{dt} + p\sigma = 0 \quad (13)$$

(13) denkleminde, $\frac{d\sigma}{\sigma} = -p dt$ olarak,

$\sigma(t) = Ce^{-pt}$ genel çözümü elde edilir. $t = t_0 = 0$ olduğunda $\sigma(t) = \sigma_0$ başlangıç koşuluna göre $C = \sigma_0$ olduğundan,

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-k_1 \omega t}, \quad t \in (t_0; \infty) \quad (14)$$

özel çözümü bulunur ve çözümdeki σ_0 değeri $t = t_0$ için (12) ifadesinden kullanılarak hesaplanabilir. (14) ifadesinden görüldüğü gibi, zaman arttığında ($t \rightarrow \infty$) toprak gerilimi sifıra yaklaşmaktadır ($\sigma \rightarrow 0$).

Başlangıç deformasyonun $\varepsilon(t) = \nu t + \beta$, $t \in [0; t_0]$ (burada, $\nu > 0$ sabit olup, deformasyonun doğrusal hızı; δ -sabittir) biçiminde doğrusal olarak değişimini varsayalım. Bu durumda, $\frac{d\varepsilon}{dt} = \nu$ olarak (8) denklemi

$\frac{d\sigma}{dt} + p\sigma = \nu q$ gibi yazılabilir ve (10) çözümüne benzer biçimde bu denklemin genel çözümü

$$\sigma(t) = e^{-pt} \left(\frac{\nu q}{p} e^{pt} + C \right) \text{ olur.}$$

$\sigma(0) = 0$ başlangıç koşuluna göre, $C = -\frac{q\nu}{p}$ olduğundan,

$$\sigma(t) = \frac{\nu q}{k\omega} \left(1 - e^{-k\omega t} \right), \quad t \in [0; t_0] \quad (15)$$

özel çözümü bulunur. Relaksasyon sürecinde

$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = \nu t + \beta = \text{sabit}$ ve $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ olarak,

$\sigma(t = t_0 = 0) = \sigma_0$ başlangıç koşuluna göre, (8) denkleminde $\sigma(t)$ toprak gerilimi için (14) ifadesi elde edilir.

(15) ifadesinin $\sigma(t_0) = \sigma_0$ koşulundaki değeri (14)'de yerine konursa,

$$\sigma(t) = \frac{\nu q}{k\omega} \left(1 - e^{-k\omega t_0} \right) e^{-k_1 \omega t}, \quad t \in (t_0; \infty) \text{ olur.}$$

Sabit gerilimde, her hangi bir materyalin veya ortamın deformasyonunun zamana bağlı olarak değişimi kayma sürecini ifade etmektedir. Kayma sürecinde her hangi bir materyalin veya deformasyona uğrayan ortamın sabit gerilimde deformasyonu zamana bağlı olarak değişmektedir. Toprakta kayma sürecinin incelenmesi için, toprağın gerilim-deformasyon durumunun değişiminin iki aşamasına bakılır. Birinci (başlangıç) aşamada, topraktaki $\sigma(t)$ gerilimi ve $\varepsilon(t)$ deformasyonu $t \in [0; t_0]$ zamanında, 0'dan sırasıyla σ_0 ve ε_0 değerlerine kadar artmaktadır. Kayma aşamasında ise, $\sigma = \sigma_0 = \text{sabit}$, sıkışmış toprağın nispi deformasyonu ise zamana bağlı olarak $[\varepsilon = \varepsilon(t)]$ değişmektedir.

Toprak kaymasının birinci aşamasında gerilimin harmonik ve doğrusal olarak değiştiğini varsayalım. Başlangıç geriliminin harmonik olarak değişimi aşağıdaki gibi olsun:

$$\sigma(t) = \sigma_a \cos \omega t, \quad t \in [0; t_0] \quad (16)$$

Burada, σ_a - gerilimin amplitütüdür.

(16) koşulundan elde edilen $\frac{d\sigma}{dt} = -\sigma_a \omega \sin \omega t$ ve

(16) ifadesi (8) denkleminde yerine konursa aşağıdaki sıradan diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{p\sigma_a}{q} \cos \omega t - \frac{\sigma_a \omega}{q} \sin \omega t \Rightarrow d\varepsilon = \frac{p\sigma_a}{q} \cos \omega t dt - \frac{\sigma_a \omega}{q} \sin \omega t dt \quad (17)$$

(17) denkleminin integrali alınırsa

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_a k}{q} \sin \omega t + \frac{\sigma_a}{q} \cos \omega t + C, \quad \left(k = \frac{p}{\omega} \right), \quad t \in [0; t_0]$$

genel çözüm bulunur. $\varepsilon(0) = 0$ başlangıç koşuluna göre $C = -\frac{\sigma_a}{q}$ olduğundan aşağıdaki özel çözüm

elde edilir:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_a}{q} (k \sin \omega t + \cos \omega t - 1), \quad t \in [0; t_0] \quad (18)$$

Topraktaki kayma sürecinde $\sigma(t) = \sigma_0 = \sigma_a \cos \omega t_0 = \text{sabit}$ ve toprağın akışkan-elastik özelliğini ifade eden parametreler k_1 ve q_1 olur. Bu durumda elde edilen $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ ifadesi (8)'de yerine yazılırsa $q_1 \frac{d\varepsilon}{dt} = p\sigma_0 \Rightarrow d\varepsilon = \frac{k_1\omega}{q_1} \sigma_0 dt$ ($p = k_1\omega$) olarak, genel integrali $\varepsilon(t) = \frac{k_1\omega\sigma_0 t}{q_1} + C$, $t \in (t_0; \infty)$ biçiminde bulunur. $\varepsilon(t = t_0 = 0) = \varepsilon_0$ başlangıç koşuluna göre, $C = \varepsilon_0$ olduğundan özel çözüm aşağıdaki gibi olur:

$$\varepsilon(t) = \frac{k_1\omega\sigma_0 t}{q_1} + \varepsilon_0, \quad t \in (t_0; \infty) \quad (19)$$

(19) çözümündeki ε_0 değeri $t = t_0$ olarak (18) ifadesinden hesaplanabilir.

Görüldüğü gibi, (19) çözümü

$$\varepsilon(t) = bt + \varepsilon_0, \quad \left(\varepsilon_0 \text{ ve } b = \frac{k_1\omega\sigma_0}{q_1} \text{ sabitlerdir} \right), \quad t \in (t_0; \infty)$$

biçiminde olup, kayma sürecini doğrusal olarak ifade etmektedir. Dolayısıyla, $\sigma_0 = \text{sabit}$ durumunda sıkışmış toprağın deformasyonu zamana bağlı olarak doğrusal olarak artmaktadır. Kayma sürecinde deformasyonun bu kuralla değişimi ideal akışkan-elastik Maxwell ortamı için karakteristik olmaktadır. Toprak ise ideal akışkan-elastik ortama sahip değildir. Deneysel olarak belirlenmiştir ki, toprak geriliminin sabit ve toprak dayanıklılığının sınır değerinden düşük olması durumunda; toprak dayanıklılığının ve hacim ağırlığının belirli değerlerine kadar, sıkışma ve dayanıklılık gerçekleşmekte, deformasyon süreci stabilleşmektedir.

Sıkışmış toprağın deformasyon değerleri ve deformasyon derinliği, toprağın akışkan-elastik özelliğini ifade eden k ve q parametreleri, kayma sürecinde deformasyonun stabilleşme anına kadar zamanın sürekli bir fonksiyonu olarak değişmekte, küçük zaman aralıklarında ise yaklaşık sabit olmaktadır (Zolotarevskaya, 2007).

Toprakta başlangıç geriliminin değişimi $\sigma(t) = vt$, $t \in [0; t_0]$ (burada, $v > 0$ - gerilimin sabit doğrusal hızıdır) gibi doğrusal biçimde olsun.

$\sigma(t)$ ve $\frac{d\sigma}{dt}$ ifadeleri (8)'de yerine konursa,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{p\nu}{q} t + \frac{\nu}{q} \Rightarrow d\varepsilon = \frac{p\nu}{q} t dt + \frac{\nu}{q} dt$$

olarak, $\varepsilon = \frac{\nu}{q} \left(\frac{p}{2} t^2 + t \right) + C$ olur.

$\varepsilon(0) = 0$ başlangıç koşuluna göre $C = 0$ ve $p = k\omega$ ifadesi göz önüne alınırsa zamana bağlı deformasyonun ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$\varepsilon(t) = \frac{\nu}{q} \left(\frac{k\omega}{2} t^2 + t \right), \quad t \in [0; t_0] \quad (20)$$

Toprağın kayma aşamasında $\sigma(t) = \sigma_0 = \nu t_0 = \text{sabit}$ ve $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ olduğu için bu durumdaki deformasyon da (19) çözümü ile ifade edilir. (20) ifadesinden bulunan $\varepsilon(t = t_0) = \varepsilon_0$ değeri (19)'da yerine konur ve kayma aşamasındaki deformasyonun ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$\varepsilon(t) = \frac{k_1\omega\sigma_0 t}{q_1} + \frac{\nu}{q} \left(\frac{k\omega}{2} t_0^2 + t_0 \right), \quad t \in (t_0; \infty)$$

Akışkan-elastik toprağın özelliğini ifade eden k, q, k_1, q_1 parametreleri deformasyonun doğrusal ve açılma hızına, toprak rutubetine doğrusal olarak bağlı olup, özel deneyler sonucunda belirlenmektedir (Zolotarevskaya 2003a, 2003b).

5. SONUÇ

Dış yükün etkisi ile toprağın deformasyon ve gerilim durumundaki değişim toprağın reoloji özelliklerine (kayma, uzun zamanlı dayanıklılık) bağlıdır. Reoloji denkleminin toprağa uygulanmasında, toprağın ideal akışkan-elastik ortam olmaması nedeniyle dış etki sonucunda toprağın fiziksel özelliklerindeki değişimlerin (dayanıklılık, gözeneklilik, rutubet, strüktür, geçirgenlik vb.) göz önüne alınması gerekir. Toprağın fiziksel özelliklerindeki değişim sonucunda toprağın reoloji özellikleri de değişmektedir. Toprak karmaşık bir sistem olduğundan, deformasyon ve gerilim değişimine etki yapan tüm faktörlerin göz önüne alınması kolay değildir. Bu nedenle, toprağın gevşeme sürecinin teorik incelenmesinde deformasyon - gerilim durumunun iki aşaması;

i) başlangıç anında ($t \in [0; t_0]$) deformasyon ve gerilimin artması,

ii) $t \in (t_0; \infty)$ anında ise deformasyonun sabit, gerilimin ise değişkenliği dikkate alınmaktadır.

Toprakta herhangi bir dış yükün etkisi altında zamana bağlı oluşan deformasyon; toprak nemi, hacim ağırlığı, tarım alet ve makinelerinden oluşan doğrusal ve açılma deformasyon hızları ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

Bu çalışma, toprağın ideal olmayan akışkan-elastik ortam olması varsayımına dayanarak, toprakta temel reoloji denkleminin uygulanabilirliğine yöneliktir. Denklemin çözümüne göre elde edilen deformasyon ve gerilim ifadelerindeki parametrelerin belirlenmesi için özel arazi ve laboratuvar denemeleri yapılmalı, araştırma teorik bilgilere bağlı olduğundan farklı disiplinlerin bir araya gelmesi ve bu alanda elde edilen verilerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumda elde edilebilecek sonuçlar, toprak verimliliğini artırmak için yapılması gereken tarımsal yöntemlerin geliştirilmesine de faydalı olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Alemdar A., 2001. Bentonit ve Montmorillonit Dirpersiyonlarının Reolojik Viskoelastik, Kolloidal Özellikleri Üzerine Organik ve İnorganik Tuzların Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 111 s., İstanbul.
- Barnes, H.A., Hutten, J.F., Walters, K., 1989. An Introduction to Rheology, Rheology Series-3. Elsevier Science, Amsterdam.
- Čitović, H.A., 1983. Mehanika gtuntov (kratkij kurs). Vysshaya Şkola, 288 s.
- Denisov, N.Ya., 1951. The engineering properties of loess and loess-like soils (in Russian). Moscow, Press Gosstroizdat, 133 p.
- Ekberli, İ., Gülser, C., Özdemir, N., Selvi, K.Ç., 2012. Mathematical Evaluation of Soil Stress in Erosion. Process. 8th International Soil Science Congress on Land Degradation and Challenges in Sustainable Soil Management. May 15-17, 2012. Çeşme-İzmir/Turkey. Volume IV, pp. 434-439.
- Habatov, R.Ş., Zolotarevskaya, D.İ., Matveyev V.V., Truşin, V.G., Truşin, G.A., Lyadin, V.P., 1987. Zakonomernosti deformirovaniya traktornih koles s pnevmaticeskimi şinami. İzvestiya TSHA, 3: 173-180.
- Jiang, Q., 1996. Study on rheological properties and mass transport of soft mud under water waves. Ph.D. Thesis, University of Tokyo, Japan.
- Koltunov, M.A., Kravchuk, A.S., Majboroda, V.P., 1983. Applied Mechanics of Deformable Solid Body, Vysshaya Şkola, Moscow, 349 p.
- Koltunov M.A., Kravchuk, A.C., 1973. Mehanika deformiruyemih sred. Moskova, İzdatelstvo MİEM, 162 s.
- Qi, P., Hou, Y.J., 2006. Mud mass transport due to waves based on an empirical rheology model featured by hysteresis loop. Ocean Engineering, 33: 2195-2208.
- Shibayama, T., Okuno, M., Sato, S., 1990. Mud transport rate in mud layer due to wave action. In: Proceedings of the 22nd Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 3037-3048.
- Selivanov, V.V., 1999. Mehanika razruşeniya deformiruyemogo tela (Prikladnaya mehanika sploşnih sred, T.2). İzdatelstvo MGTU im. H.E. Baumana, 420 s.
- Şein, Y.V., Karpaçevskiy, L.O., 2007. Teori i metodı fiziki počv (in Russian). "Grif i K" Publishing House, Tula, 614 p (464-530 pp).
- Trien, H. N., 1991. Study on mud transport in coastal waters. Ph.D. Thesis, University of Tokyo, Japan.
- Tsytoovich, N.A., 1983. Soil mechanics (in Russian). Vysshaya Şkola Publishing House, Moscow, 288 p.
- Turcotte, D.L., Schubert, G., 1985. Geodynamics. Applications of Continuum Physics to Geological Problems, Volume 2 (pp. 488-573). Moscow, Press Mir.
- Ün, H., 2007. http://hun.pamukkale.edu.tr/ders_notlari/malzeme_bilgisi/Malzeme_ders_6_Reoloji.pdf. Erisim Tarihi: 15.03.2009.
- Vyalov, S.S., 1978. Reolojiçeskiye osnovı mehaniki gruntov. Moskova, Vysshaya Şkola, 447 s.
- Vyalov, S.S., 1986. Rheological Fundamentals of Soil Mechanics. Elsevier, Amsterdam.
- Zolotarevskaya, D.I., 1998. Zakonomernosti deformirovaniya počv i ix matematiçeskoye modelirovaniye. Pochvovedeniye, 1: 110-120.
- Zolotarevskaya, D.I., 2003a. Mathematical modeling of relaxation processes in soils. Pochvovedeniye, 4: 429-440.
- Zolotarevskaya D.I., 2003b. Mathematical modeling of the processes of deformation of soils with time. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 76(3): 632-639.
- Zolotarevskaya, D.I., 2007. Mathematical Modeling of the Processes of Soil Deformation and Soil Compaction. Pochvovedeniye, 1: 44-54.