

Ormanlık alanlarda toprak sıkışması sorunu

Bülent Turgut

Artvin Çoruh Üniversitesi, Orman Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Artvin

İletişim yazarı/Corresponding author: bturgut@artvin.edu.tr, Geliş tarihi/Received: 31.10.2010, Kabul tarihi/Accepted: 11.01.2012

Özet: Toprak sıkışması ormanlık alanlarda yaygın olarak görülen bir degradasyon sürecidir. Toprak sisteminin doğal durumdaki strüktürel yapısının, yağış veya mekaniksel dış kuvvetlerin etkisi altında bozulması ve toprak parçacıklarının daha sıkı bir şekilde yeniden dizilmesi toprak sıkışması olarak tanımlanabilir. Sıkışma sonucunda toprağın hacim ağırlığı başta olmak üzere birçok fiziksel özelliği bu durumdan olumsuz etkilenmekte ve toprak-bitki-su ilişkileri bu süreçten olumsuz şekilde etkilenmektedir. Sıkışma, çoğunlukla yoğun olarak kullanılan rekreasyon alanlarında, yerleşim sahalarında, orman istihsal alanlarında, meyve bahçelerinde, tarımsal ormancılık yapılan yerlerde ve fidanlıklarda görülmektedir. Sıkışma doğal olarak oluşabildiği gibi toprak işleme aletleri, ağır makineler, tekerlek trafiği, hayvanlar tarafından çiğnenme ve yangınlar gibi dış etkenler yoluyla da oluşabilmektedir. Toprak sıkışması, bitkisel üretim ortamının fiziksel ve hidrolojik özelliklerinde olumsuzluklara yol açtığı gibi, bitkilerde fizyolojik bozulmalara neden olabilmekte, bitkide büyüme hormonlarının dengesinde ve miktarında değişikliklere yol açabilmekte ve besin elementi alımını da sınırlandırabilmektedir. Bu çalışmada orman örtüsü altındaki topraklarda görülen sıkışma sorununun nedenleri, toprakların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri ile bitkilerin fizyolojisinde ortaya çıkardığı olumsuzluklar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Toprak sıkışması, Kütle yoğunluğu, Orman, Toprak

Soil compaction in forest soils

Abstract: Soil compaction is a widespread degradation process in forest sites. Soil degradation occurring on the structural formation of a natural soil system by rainfall or mechanical outer forces generally results in soil particles to be rearranged tighter than its previous status. In this case, soil compaction -defined as the increase in bulk density of soil- develops with negative effects on soil-plant-water relations. With the compaction, the density of soil increases while the porosity rate decreases, creating a harder formation in soil and consequently lower degree of hydraulic conductivity. Higher soil compaction usually occurs in densely used places including recreational areas, settlements, logged forests, fruit gardens, agro-forestry systems and nurseries. The compaction may occur naturally, but it can also be started by outer factors such as soil preparation tools, heavy equipments, tire traffic, livestock grazing or fires. Besides causing deterioration on physical and hydrological features in growing environments of plants, soil compaction may also lead to physiological degradation of plants and changes on the balance and amount of growth hormones of plants, which, in turn, may limit nutrient uptake. In this study, possible reasons for compaction problem observed in forested soils and its negative effects on soil physical, chemical and microbiological characteristics as well as on the physiology of plants were evaluated.

Keywords: Soil compaction, Bulk density, Forest, Soil

1. Giriş

Toprak sisteminin doğal durumdaki strüktürel yapısının yağış ve mekaniksel dış kuvvetlerin etkisi altında bozulması, buna bağlı olarak toprak parçacıklarının daha sıkı bir şekilde yeniden dizilmesi sonucu hacim ağırlığındaki artış toprak sıkışması olarak tanımlanmaktadır. Toprak sıkışması en sık rastlanılan ve zararlı etkileri oldukça fazla hissedilen bir degradasyon sürecidir, öyle ki Avrupa birliği ülkelerinde toprak sıkışması, toprak koruma bakımından öncelikli araştırma alanı olarak gösterilmektedir (Van-Camp vd., 2004). Toprak sıkışmasını bu kadar önemli kılan nedenler arasında kütle yoğunluğunun artması, gözenekliliğin bozulması, hidrolik iletkenliğin ve hava geçirgenliğinin değişmesi, bitki köklerinin mekaniksel bir dirençle karşılaşması gelmektedir. Bu olumsuzlukların tamamı bitki büyümesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Tarımsal üretim alanlarında olduğu gibi ormancılık faaliyetlerinin yürütüldüğü alanlarda da toprak sıkışması önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Frey vd.,

2009). Bunun ana nedenlerinden biri ormancılık üretim faaliyetlerinde kullanılan alet ve makinelerin boyutlarında ve ağırlıklarındaki sürekli artıştır. Bu artış orman ekosistemlerinde toprak degradasyonuna neden olmakta, söz konusu alet ve makinelerin geçiş sayılarına bağlı olarak toprak strüktür özelliklerinde önemli seviyede değişiklikler meydana gelmektedir (Ampoorter vd., 2007). Bitki kök gelişmesini ve toprağın hidrolojik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen toprak sıkışması toprakta kütle yoğunluğu değişimi, makro porozite ölçümleri, penetrasyon testleri ve iletkenlik ölçümleri yoluyla belirlenebilmektedir.

Ormanlık alanlarda ve tarımsal alanlarda yetiştirilen bitki türlerinin ağırlıkları ve boyutları gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra yetiştirme sürelerindeki farklılıklardan dolayı bu iki alanda görülen sıkışma sorunu birbirlerinden farklılık göstermektedir (Greacen ve Sands, 1980). Ayrıca tarımsal alanlarda toprak sıkışmasının ana nedeni tarla trafiği iken orman örtüsü altındaki topraklarda istihsal (üretim/hasat) ve mekanik alan hazırlığı gibi orman yönetim uygulamalarıdır (Tan vd., 2005).

İnsan faaliyetlerinin toprak sıkışmasındaki rolü elbette çok önemlidir, fakat bunun yanında toprak sıkışmasının doğal olarak ta gerçekleşebildiği ve bu sıkışmanın farklı derecelerde karşımıza çıkabildiği göz ardı edilmemelidir. Doğal sıkışmanın ana nedeni toprağın oturması ya da yığılması olarak gösterilmektedir (Kozłowski, 1999). Oturma toprağın ıslanma ve kuruma süreçleri ile ilişkili bir durumdur, bu yüzden toprağın şişmesi ve büzülmesi agregatların daha sıkı bir şekilde yeniden paketlenmesine neden olmaktadır. ıslanmanın bir sonucu olarak toprak agregatlarının zayıflaması ile meydana gelen çökme ve temas noktalarındaki parçalanma, toprak parçacıklarının daha sıkı bir şekilde yeniden paketlenmesine neden olmaktadır (Bullock ve Gregory, 1991). Doğal sıkışmaya neden olan başka bir etken ise ağaçlardır. Ağaçların büyümesi ile birlikte ağırlıkları da artmakta ve bu ağırlık kökler vasıtasıyla toprağa aktarılmakta ve ağırlığın meydana getirdiği yük ise kaçınılmaz olarak toprağın sıkışmasına neden olmaktadır (Wright ve Bailey, 1982).

Toprak sıkışmasının doğurduğu olumsuzluklar; toprak tekstürüne, makine faaliyetlerine, üretim faaliyetlerinin yapıldığı andaki toprağın su içeriğine ve diğer toprak koşullarına bağlı olarak değişmekte, uzun yıllar etkili olabilmekte ve bu olumsuz etkiler uzun dönemlerde orman üretkenliğinde azalmalara neden olabilmektedir (Kozłowski, 1999).

Toprak sıkışmasının derecesi, toprağın tekstürüne, pH'sına, kation değişim kapasitesine, kil tipine, nem içeriğine, organik madde miktarına, demir oksit ve serbest alüminyum hidroksitlerin varlığına bağlıdır (Assouline vd., 1997).

Değişebilir Ca içeriği yüksek olan killi topraklar özellikle nemli durumlarda doğal olarak sıkışma eğilimi gösterirken kaba bünyeli kuru topraklar daha az sıkışma eğilimi göstermektedirler (Kozłowski vd., 1991). Kuru topraklar, parçacıkların birbirlerine tutunma kuvvetlerinin yüksek oluşundan ve deformasyona karşı direnç gösterdiklerinden sıkışmaya karşı dayanıklıdırlar. Suya doymun halde olmayan toprakta nem miktarı arttıkça, su film tabakası parçacıklar arasındaki bağı zayıflatmakta, sürtünmeyi azaltmakta ve sonuç olarak sıkışmayı arttırmaktadır. Bunun yanında toprak suya doymun duruma yaklaştıkça gözeneklerdeki hava ortamı terk etmekte ve uygulanan harici basınç beklenildiği şekilde toprağı sıkıştırılmamaktadır. Bu nedenle toprak nemliliğindeki aşırı artış toprağın sıkışabilirliğini azaltmaktadır (Hillel 1982).

Sıkışmış toprak katmanları genellikle farklı derinliklerde karşımıza çıkmaktadır. Sıkışmaya çiğnenme neden olmuşsa sıkışmış katman yüzeyde, araç trafiği neden olmuşsa orta derinlikte, sürekli ağır araç trafiği neden olmuşsa da derinlerde oluşmaktadır (Rolf 1994).

Kuzey enlemlerde yer alan toprakların özellikleri üzerine orman yönetimi uygulamalarının etkileri, diğer bölgelerden farklılık göstermektedir. İstihsal alanlarında hem besin elementi miktarında bir kayıp, hem de bitkiler için yararlı besin elementi dengesinde bir bozulma söz konusudur. Üretim sürecinde ortamdan gölge oluşturan bitkilerin uzaklaştırılması toprak sıcaklığını ve nem içeriğini önemli derecelerde etkilemektedir. Bölmeden çıkarma işlemleri esnasında ağaçların sürütülerek alandan çıkarılmasının fiziksel etkileri arasında toprağın strüktüründeki değişimler, toprağın su tutma kapasitesi ve yüzey akıştaki değişimler ve havalanma ve kök

penetrasyonundaki değişimler yer almaktadır (Ballard, 2000).

Yüksek seviyede sıkışmış toprakların eski halini alması uzun yıllar gerektirmektedir. Örneğin, ağır araçlar nedeniyle sıkışmış topraklar bu durumlarını 4 yıldan daha fazla bir süre devam ettirmektedirler (Lowery ve Schuler, 1991). Araştırmacılar Avustralya orman topraklarında sıkışma sonucu oluşan bozulmanın, yedi yıl sonunda çok az bir iyileşme gösterdiğini (Cheatle, 1991), benzer olarak Kanada'nın kuzey ormanlarında bu sürenin onlarca yıl sürdüğünü (Corns, 1988) bildirmişlerdir. Donma-çözülme süreçlerinin az gerçekleştiği sıcak bölgelerdeki sıkışmış toprakların doğal olarak tekrar eski halini alması 60 yıl gibi daha uzun süreler gerektirmektedir (Mitchell vd., 1982). Sıkışmış toprağın yeniden eski halini alması sıkışmış katmanın kalınlığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin kumlu tın tekstürlü bir toprakta 0-0.75 cm kalınlığındaki bir yüzey sıkışmasının doğal olarak giderilebilmesi için 5-9 yıl gerekirken, 23-30 cm kalınlığındaki sıkışma katmanının eski haline dönmesi için 9 yıl bile yetmemektedir (Thorud ve Frissell, 1976).

2. Toprak sıkışmasının nedenleri

2.1 Üretim alanlarında ağır makine kullanımı

Ormancılıkta üretim faaliyetleri, kesim ve hazırlama (istihsal), tali nakliyat (sürütme veya bölmeden çıkarma) ve ana nakliyat aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalar arasında en zor basamağı oluşturan bölmeden çıkarma, ürünlerin ve ağaçların kesildiği yerden en yakın orman yolu kenarına kadar değişik teknik ve uygulamalarla taşınması olarak tanımlanır. Odun hammaddesi üretimi faaliyetlerinin bölmeden çıkarma aşamasında insan gücüne, hayvan gücüne ve makine gücüne dayalı teknikler kullanılmaktadır (Eroğlu vd., 2009).

Üretim ve buna bağlı ormancılık etkinlikleri, toprakların fiziksel yapısını ve hidrolojik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle yoğun ormancılık uygulamalarında ağır ekipmanların uygun olmayan zamanlarda kullanılması, toprak strüktüründe telafisi zor zararlara ve toprak sıkışmasına neden olarak üretkenliğin azalmasına yol açmaktadır (Kozłowski, 1999; Ampoorter vd., 2007).

Son yıllarda hafif el aletleri ile ağaç kesimi ve hayvanlar yardımıyla bölmeden çıkarma işlemleri yerini ağır traktörlere, kesim aletlerine ve bölmeden çıkarma makinelerine bırakmıştır (Ampoorter vd., 2010). Ormancılıkta kullanılan modern üretim makineleri toprağı ağır bir yük uygulamaktadır. Uygun olmayan nem ve toprak koşullarında bu makinelerin kullanılması ve yüksek maliyetten dolayı yıl boyunca uygulamaya devam edilmesi sonucu toprak strüktürü bu durumdaki olumsuz şekilde etkilenmekte ve sıkışma sorunu ortaya çıkmaktadır. Özellikle üretim uygulamalarında tekerlekli traktörlerin kullanılması sonucu toprakların fiziksel özelliklerinde meydana gelen olumsuz değişiklikler ve toprakların hava ve su geçirgenliklerindeki azalma, hem alanda bulunan mevcut ağaçların hem de daha sonra dikilecek olanların büyümesini engellemektedir. Fakat bitki büyümesinde meydana gelebilecek bu olumsuzlukların boyutlarını tahmin etmek etkileşimlerin çok karmaşık olmasından dolayı oldukça güçtür (Greacen ve Sands, 1980; Stone ve Eliofoff, 2000; Frey vd., 2009).

Mekanik bölmeden çıkarma işlemleri geleneksel sistemlerden daha güvenli uygulama ortamları sağlamaktadırlar. Ancak lastik tekerlekli ağır bölmeden çıkarma araçları orman toprağı üzerinde derin tekerlek izleri oluşturmakta, uygulamalarda aşırı gecikmeler meydana gelmekte, orman topraklarının fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve ağaç köklerinde hasarlar oluşturmaktadır (Akay ve Erdaş, 2007).

Üretim sonrasında bölmeden çıkarma ve buna bağlı uygulamalar nedeniyle çalışma alanının büyük bir kısmında toprağın kütle yoğunluğu artmakta ve buna bağlı olarak hidrolik iletkenlik de azalmaktadır, meydana gelen sıkışmaya ise toprak gözenek boyutlarının özellikle 3mm'den daha büyük gözeneklerin miktarındaki azalma neden olmaktadır. Makro gözeneklilikte ortaya çıkan azalma beraberinde havalanmada bir azalmayı ve toprağın su tutma özelliklerinde de bir değişimi beraberinde getirmektedir (Huang vd., 1996).

Ormanlarda üretim işlemleri boyunca hasat makineleri aynı noktadan defalarca geçmekte ve toprak sıkışmasına neden olmaktadır. Toprak sıkışmasının derecesi bu makinelerin geçiş sayısına ve ağaçların ağırlığına bağlıdır (da Silva vd., 2008).

Ampoorter vd. (2007) kumlu toprakta paletli ve tekerlekli hasat makinelerinin ve taşıyıcı aracın farklı geçiş sayıları karşısında kütle yoğunluğundaki ve penetrasyon direncindeki değişiklikleri incelemişlerdir. Hiçbir araç geçişi olmayan alanla karşılaştırıldığında sadece paletli hasat makinesinin bir defa geçişinde toprağın ilk 30cm'lik kısmında kütle yoğunluğunda önemli bir artış meydana gelmiştir. Paletli hasat makinesi ve taşıyıcı aracın birçok defa geçişi sonrasında ölçülen kütle yoğunluğu değeri, bir defa paletli aracın geçişi sonrasında ölçülen değerden belirli ölçüde yüksek olmuştur, fakat penetrasyon direnç değeri önemli seviyede farklılık göstermiştir. Tekerlekli hasat makinesinin geçişi sonrasında ölçülen kütle yoğunluğu ve penetrasyon direnç değerleri, araç trafiğı olmayan şahit alandaki değerleri ile paletli hasat makinesinin uygulandığı alan değerleri arasında yer almıştır. Çalışmada dikkat çeken bir diğer nokta ise kök gelişiminin bu durumdan çok fazla etkilenmemesidir. Sıkışma sonrasında kumlu toprağın kısa zaman içerisinde tekrar eski halini alması nedeniyle bitki kök gelişimi bu durumdan fazla etkilenmemiştir.

Ağaçların üretim alanlarından sürütülerek çıkarılması, bölmeden çıkarma işlemlerinde önemli bir izlektir. Ağaçların sürütülerek çıkarılmasında kullanılan tekerlekli araçlar toprak sıkışmasına neden olarak penetrasyon direncini ve kütle yoğunluğunu arttırmaktadırlar. Üretim faaliyetleri sonrasında ortaya çıkan ve tomruk olarak değerlendirilmeyen yan dallar ve uç sürgünler ile talaş ve yonga, toprak sıkışmasını engellemek için araç geçişlerinin olduğu yollara serilmektedir. Bahsedilen bu iki materyalin toprak sıkışmasını ne derecede önlediğini ortaya koymak amacıyla yürütülen çalışmada, yan dallar ve uç sürgünlerin sıkışmanın şiddetini azaltmada talaş ve yongadan daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca toprak sıkışmasının göstergeleri olan penetrasyon direnci ve kütle yoğunluğunun makine geçiş sayısına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir (Akay vd., 2007)

Toprağın nem içeriğinin uygun olmadığı durumlarda üretim faaliyetlerinin devam etmesi, toprak sıkışmasında önemli bir faktördür. Nem içeriğinin yüksek olduğu alanlarda üretim faaliyetlerinin yüzey toprağında önemli derecede bozulmalara neden olduğu, nem içeriğindeki

azalmaya bağlı olarak toprak bozulma derecesinde de bir düşüş meydana geldiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir (Carter vd., 2007).

Doğal gençleştirmeyi teşvik etmek amacıyla alt tabaka bitkilerinin temizlenmesi esnasında ağır makineler kullanılmaktadır, bu makineler de toprağın kütle yoğunluğunda önemli derecede artışa neden olmaktadır (Yıldız vd., 2010). Ağır makinelerin kullanılmasının yanında ormanlık alanlarda makine trafiğinin de fazla olması toprak sıkışmasına neden olmaktadır (Akay vd., 2007).

Üretimde makine kullanımı sonucu meydana gelen toprak sıkışmasının derecesi toprak tekstürü, organik madde miktarı ve eğim gibi alan özelliklerine, toprağın su içeriğı ve toprak sıcaklığı gibi iklimsel faktörlere ve makine tipi, makine ağırlığı, kesilen ağaçların sayısı ve trafik yoğunluğu gibi üretim işlemlerinin bizzat kendisine bağlıdır. Yoğun makine trafiğinin mevcut olduğu alanlar içerisinde killi toprakların en yüksek kütle yoğunluğuna ve en düşük poroziteye sahip olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmektedir (Ampoorter vd., 2010).

2.2 Rekreatyonal alan kullanımı

Kırsal rekreasyon alanları, günümüzde insanların rekreasyon ihtiyaçlarını karşılayan en önemli yerlerden biridir. Kent yakınında bulunan ve orman rejimine giren, halkın rekreasyon ihtiyacını karşılamak üzere ayrılmış olan "orman içi dinlenme yerleri" ise önemli kırsal rekreasyon alanlarıdır (Korkmaz ve Karadeniz, 2002). Günümüzde insan yerleşimlerinin kırsaldan kentsele doğru hızlı değişim göstermesi sonucu kentlerde meydana gelen nüfus artışı ve hızlı kentleşme, insanların kentlerin fiziksel ve psikolojik açıdan baskısı altında bulunmasına yol açmaktadır. Bu nedenle insanlar yoğun kent yaşamı içerisinde rekreasyon ihtiyacını yoğun bir şekilde hissetmektedirler (Uzun ve Müderrisoğlu, 2010).

Rekreasyon faaliyetleri doğal çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Doğa ziyaretlerinin gerçekleştiği bütün alanlarda kaçınılmaz olarak ortaya çıkan çığnenme bu etkilerden biridir. Diğer yandan rekreasyonel çığnenme etkisi çoğu zaman çevre koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterirken doğal bitki örtüsü, rekreasyon faaliyetleri de dahil olmak üzere insan-doğa arasındaki ilişkilerin şekli ve düzeyini ortaya koyan önemli bir göstergedir (Atik vd., 2008).

Rekreasyonel alanlarda kaçınılmaz olan yaya trafiğı, toprağın kütle yoğunluğunu önemli seviyede artırarak toprak sıkışmasına, bitki kaplılık oranında ve bitkisel çeşitlilikte azalmaya ve bitki boyunda kısalmaya neden olabilmektedir (Mingyu, 2009; Kissling vd., 2009). Kamp alanı olarak kullanılan alanlarda toprak sıkışmasının ve kütle yoğunluğunun arttığı, boşluk oranının ve organik madde miktarının azaldığı da bilinmektedir (Jim, 1987).

Yürüyüş, binicilik ve dağ bisikleti, korunan alanlarda en fazla yapılan spor dallarıdır. Bu üç spor etkinliğinin korunan alanlarda yapılıp yapılmaması tartışma konusudur. Aslında bu üç etkinlik yapılış şekilleri bakımından birbirinden farklı olsa da toprak üzerindeki etkileri büyük oranda benzerlik göstermektedir. Mevcut patikalara zarar verme, erozyona ve sıkışmaya neden olma gibi zararları içeren bu etkiler, toprakta su hareketini etkilemekte bunun yanında köklerin ve ana kayanın yüzeye çıkmasına neden olmaktadır. Tüm bu olumsuzluklar ise bitkilerin boylarında kısalmaya,

biomaslarında azalmaya, tür kompozisyonunda değişikliğe, planlanan haricinde yeni yolların ortaya çıkmasına ve bitki patojenlerinin ve tohumların yayılmasına yol açmaktadır (Pickering vd., 2010).

Rekreasyonel alan kullanımının ortaya çıkardığı olumsuz etkilerin incelendiği bir çalışmada bitki kaplılık oranının ve bitki boyunun bu durumdan olumsuz şekilde etkilendiği, fakat tür çeşitliliğinin Akdeniz bölgesinin çevre koşulları ve yürüyüş güzergahlarındaki ışık rekabetinden dolayı çiğnenen alanlarda daha fazla olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Atik vd., 2009).

Uzun ve kısa dönemler içinde insanlar tarafından yürüyüş parkuru olarak kullanılan alanlarda, orman vejetasyonunda, toprağın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin incelendiği bir çalışmada, her iki alanda da bitki kaplılık oranında, bitki boyunda ve tür çeşitliliğinde azalmaya karşılıklıdır. Bu değişim uzun süreli kullanılan alanda daha belirgin olmuştur. Alan kullanım süresindeki artışla beraber toprağın sıkışma derecesi artmıştır, bunun yanında toprak nemi, organik madde miktarı ve toplam organik azot içeriği bakımından alan kullanım süreleri arasında bir farklılık tespit edilememiştir (Kissling vd., 2009).

2.3 Orman yangınları

Orman yangını, doğal ya da insani sebeplerle ortaya çıkan ve ormanların kısmen veya tamamen yanması olayıdır. Orman yangınları Devonyen döneminden beri birçok orman ekosisteminde görülmekte ve bu alanlarda önemli zararlara neden olmaktadır (Schmidt ve Noack, 2000). Yangınların toprak özelliklerine etkileri yangınların şiddetine ve toprak özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Mataix-Solera vd., 2011). Diri örtü temizliği için kontrollü çıkarılan düşük şiddetli yangınların toprak sıkışmasına neden olmadığı ve hatta değişebilir katyonların oranını arttırdığı ortaya konulmuştur (Yıldız vd., 2010). Bunun yanında yüksek şiddetli yangınların ise başta besin elementi içeriği olmak üzere bir çok fiziksel ve kimyasal özelliği olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Mataix-Solera vd., 2011).

Yangınlar sonucunda esas bitki örtüsünün azalmasından dolayı toprak doğal etmenlere karşı daha açık bir hale gelmektedir. Ayrıca yangın esnasında orman ölü örtüsü tamamen yanmayarak yarı kömürleşmiş bir hale gelmekte ve böylece toprak yüzeyinde koyu renkli bir tabaka oluşmaktadır. Bitki örtüsünden yoksun ve koyu renkli toprak daha fazla ısınmakta, daha çok sıkışmakta ve bunlara bağlı olarak toprağın nem içeriği düşmekte ve geçirgenliği de azalmaktadır (Snyman, 2003). Kurak ve yarı kurak alanlarda bitki büyümesini sınırlandıran en önemli etken toprağın nem içeriğidir. Yangın sonrasında alanda vejetasyonun yeniden canlanabilmesi için toprak neminin yeterli seviyelerde olması gerekmektedir.

Mineral toprak horizonlarında ağaç örtüsünün oranı ile $\text{NH}_4\text{-N}$ 'u arasında doğrusal bir ilişki vardır, bunun yanında otsu bitkiler ile $\text{NO}_3\text{-N}$ 'u arasında da benzer bir ilişki söz konusudur (Driscoll vd., 1999). Yangın sonrasında kaybolan bitki örtüsüne bağlı olarak toprak organik madde miktarında ve bitki besin elementlerinin yayırlılığında ve özellikle azot yayırlılığında olumsuz değişikliklerin meydana geldiği bilinmektedir (Driscoll vd., 1999; Snyman, 2003). Yarıyışlı azot eksikliği ise hem otsu bitkilerin hem de çalı ve ağaç formundaki bitkilerin gelişmelerini olumsuz

etkilemektedir. Bitki gelişimindeki bu olumsuzluklar toprak yüzeyinin kaplılık oranının azalmasına ve yine buna bağlı olarak hidrolojik döngüde ve toprak strüktüründe bozulmalara neden olmaktadır.

3. Toprak sıkışmasının toprak özellikleri üzerine etkisi

3.1 Fiziksel özellikler üzerine etkisi

Penetrasyon direnci, toprağın kendisine uygulanan güç karşısında gösterdiği dirençtir. Toprak sıkışma derecesinin ifade edilmesinde penetrasyon direnç değeri kullanılmaktadır. Toprak taneciklerinin daha sıkı bir şekilde paketlenmesi sonucu, toprağın kendisine uygulanan harici kuvvete karşı göstereceği direnç daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle toprak sıkışmasına bağlı olarak toprağın penetrasyon direnç değerlerinde bir artış söz konusudur (Nugent vd., 2003; Amboorter vd., 2007; Amboorter vd., 2010; Turgut vd., 2010). Başta ölçüm esnasındaki toprak nemi olmak üzere toprak tekstürü, agregat stabilitesi, ortalama ağırlık çap değerleri gibi toprak özellikleri penetrasyon direnç değerlerini etkilemektedir (Turgut vd., 2008).

Ormancılıkta uygulanan tıraşlama yöntemi organik madde ve azot içeriğinde azalmaya, penetrasyon direncinde ise önemli seviyede artışa neden olmaktadır (Closa and Goicoechea, 2010). Bunun yanında üretim işlemlerinde ağır makinelerin kullanılması, araç trafiğinin yoğun olması da penetrasyon direnç değerlerinde artışa neden olmaktadır (da Silva vd., 2008; Han vd., 2009).

Sıkışma sorununun varlığına işaret eden diğer bir toprak özelliği ise kütle yoğunludur. Kütle yoğunluğu birim hacim içerisindeki toprak katı parçacıklarının kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Sıkışma sonunda toprak taneciklerinin daha sıkı bir şekilde yeniden paketlenmesi nedeniyle birim hacimde daha fazla toprak katı parçacığı yer almakta ve kütle yoğunluğu da buna paralel olarak artmaktadır. Sıkışmanın doğrudan etkisi olarak görülen kütle yoğunluğundaki artış, bu konuda çalışan araştırmacılar tarafından yaygın olarak ortaya konulmuştur .

Toprak sıkışmasının etkilediği diğer bir toprak özelliği ise agregat stabilitesidir. Agregat, toprak taneciklerinin çeşitli yapıştırıcı unsurlar ile bir araya gelerek oluşturdukları yapıdır. Agregat stabilitesi ise oluşan bu yapının parçalayıcı etkilere karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sıkışmaya neden olan uygulamalar esnasında agregatlar parçalanmakta ve buna bağlı olarak toprak strüktürü de bozulmaktadır (Kozłowski, 1999).

Sıkışmanın toprak hidroloji üzerinde de olumsuz etkileri söz konusudur. Toprak gözenekliliğindeki azalmayla beraber infiltrasyon kapasitesinde de bir azalma meydana gelmektedir (Price vd., 2010). Toprağın infiltrasyon kapasitesindeki azalma sonucu yüzey akış miktarında ve erozyon ile toprak kaybında bir artış görülmektedir (Greacen ve Sands, 1980; Kozłowski ve Pallardy 1997; Croke vd., 2001).

Toprak sıkışmasına bağlı olarak mikro gözeneklerin miktarının artması ve hidrolojik dengenin bozulması sonucunda toprak sıcaklığında bir azalma söz konusu olmaktadır (Gomez vd., 2002; Li vd., 2003; Tan vd, 2005). Toprak sıcaklığı özellikle erken ilkbaharda tohum çimlenmesinde ve mikrobiyolojik aktivitede kritik öneme sahiptir.

Hasat makinesinin geçiş sayısının ve tomruk taşıyan araçta bulunan tomrukların ağırlıklarının toprak sıkışmasına ve okalptusun gelişimine etkilerinin incelendiği çalışmada araştırmacılar, taşıyıcının geçiş sayısına bağlı olarak sıkışmanın, penetrasyon direncinin ve mikrogözenekliliğin arttığını, bunun yanında geometrik ortalama çapın, toplam gözenekliliğin, makrogözenekliliğin ve infiltrasyon oranının düştüğünü belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada, taşıyıcının aynı noktadan iki defa geçmesinin toprağın en yüksek derecede bozulması için yeterli olduğu ve 441 gün sonra bile sıkışmanın etkilerinin devam ettiği vurgulanmıştır (da Silva vd., 2008).

3.2 Kimyasal özellikler üzerine etkisi

Sıkışma toprakların kimyasal özelliklerini dolaylı olarak etkilemektedir. Toprak sıkışması sonucu makro porozitedeki azalmayla beraber oksijen noksanlığı ortaya çıkmaktadır. Toprak havasının bileşiminde oksijen oranının azalması sonucu organik materyalin ve mikrobiyal biyokütle mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılması engellenmektedir. Bu nedenle sıkışmış topraklarda azot mineralizasyonunda bir azalma meydana gelmekte ve azotun gaz halinde kaybı söz konusu olmaktadır (Arocena, 2000; Breland and Hansen, 1996; Closa and Goicoechea, 2010). Azot mineralizasyonu üzerine sıkışmanın olumsuz etkileri en fazla yüksek nem içeriklerinde görülmektedir (Breland and Hansen, 1996)

Toprak sıkışmasına neden olan yönetim uygulamaları ve toprak profili boyunca organik madde miktarındaki azalmalar, karbon ve azot dinamiklerini olumsuz yönde etkilemektedirler. Bu olumsuzluk toprakta bulunan karbon ve azot miktarlarını, yarıyışlılığını, nitrifikasyon oranını, elverişli azot miktarını ve mikrobiyal C:N oranını azaltmaktadır (Li vd., 2004; Tan vd., 2005; Tan ve Chang, 2007).

Sıkışma sorununun ihmal edilebilecek düzeylerde görüldüğü alanlarda bile gözenek devamlılığında bir bozulma meydana gelmekte, buna bağlı olarak toprak CO₂ miktarında artış (Amboorter vd., 2010) ve toprak pH'sında ise bir düşüş (Demir vd., 2007) meydana gelmektedir.

Toprak sıkışması sonucu makro gözeneklerde meydana gelen tahribat neticesinde toprağın havalanmasında aksaklıklar meydana gelmektedir. Özellikle toprak pH'sının çok düşük olmadığı alanlarda toprak havası ve atmosfer arasındaki gaz değişiminde meydana gelen bozulma sonucu katyonların topraktan yıkanarak uzaklaşması söz konusudur (Ballard, 2000). Ölü örtünün ortamdaki uzaklaştırılması ve yıkanma sonucu toprak çözeltisindeki Ca, Mg, K ve Al miktarlarında bir azalma ortaya çıkmaktadır (Arocena, 2000). Gaz değişiminde meydana gelen bozulma oksijen aleyhine geliyorsa, oksijensiz bir ortamın oluşması kaçınılmazdır, bu ortamlarda ise denitrifikasyon, demir, sülfat ve manganezin indirgenmesi gibi süreçler meydana gelmektedir (Ballard, 2000).

3.3 Mikrobiyolojik özellikleri üzerine etkisi

Mikrobiyal biyokütle, organik maddenin en değişken parçasıdır ve topraktaki karbon ve azot döngüsünde önemli bir role sahiptir (Jenkinson ve Rayner, 1977). Bunun yanında mikrobiyal biyokütle orman yönetim uygulamalarının meydana getirdiği değişikliklerin hassas bir indikatördür (Sparling, 1992).

Toprak içerisinde bulunan bakteriler, karbon mineralizasyonu, azot fiksasyonu, nitrifikasyon, gaz üretim ve tüketim silsilesi gibi birçok biyokimyasal sürece aracılık etmektedirler. Ormancılık uygulamalarının neden olduğu sıkışmanın hava ve su iletkenliğini olumsuz etkilediği daha önce belirtilmişti. Hava ve su iletkenliğindeki azalma ile beraber kötü drenaj koşulları ortaya çıkmakta, toprak havası ile atmosfer arasında gaz değişimi azalmakta ve tüm bu olumsuzluklar karşısında topraktaki bakteri birlikleri ve yapıları zarar görmektedir (Frey vd., 2009).

Sıkışmış topraklarda kütle yoğunluğu değerlerinin 1.40-1.55 mg m⁻³ arasında olması sonucunda toprakların biyolojik özellikleri olumsuz etkilenmekte ve buna bağlı olarak toprağın üretkenliği de düşmektedir. Yine sıkışmış topraklarda hava dolu gözeneklerin miktarının toplam toprak hacminin %10'unun altına düşmesi durumunda çoğu nemli topraklarda mikrobiyal aktivite düşmekte ve bitki büyümesi sınırlanmaktadır (Brady ve Weil, 2002).

Toprak sıkışması aerobik mikrobiyal aktiviteyi azaltarak denitrifikasyonun yükselmesine neden olmaktadır. Toprak sıkışmasının artmasına bağlı olarak makro gözeneklerde de aşamalı bir şekilde azalma meydana gelmekte ve bu da anaerobik şartların oluşmasına neden olmaktadır (Torbert ve Wood, 1992). Toprak sıkışmasının yüksek olduğu durumlarda azotun gaz halinde kaybı oldukça sık rastlanan bir durumdur (Douglas ve Crawford, 1993).

Sıkışma sonucu toprakların mikrobiyolojik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin incelendiği bir çalışmada, Actinobacteria ve Arthrobacter türüne ait bakterilerin sıkışma sorunu görülen alanlarda daha yüksek oranda bulunduğu tespit edilmiştir (Axelrood vd., 2002). Yapılan başka bir çalışmada ise sıkışmış topraktaki Gymnamoebae sayısının orta derecede sıkışmış ve sıkışmamış topraklardan daha düşük sayıda olduğu bildirilmiştir (Bass and Bischoff, 2001).

4. Toprak sıkışmasının ağaçların fizyolojilerinde ortaya çıkardığı olumsuzluklar

Toprak horizonlarında sıkışma problemi başladığı andan itibaren kök büyümesi mekanik bir dirençle karşılaşmakta, su ve besin elementlerinin alımı engellenmekte ve bitkisel üretkenlik (artım) düşmektedir (Soane ve Van Ouwerkerk, 1994; Whalley vd., 1995; Gomez vd., 2002).

Orta ve hafif tekstürlü topraklarda 1.40 ile 1.55 mg m⁻³ arasındaki kütle yoğunluğu değerleri kritik seviye olarak değerlendirilmektedir, bu değerlere sahip topraklarda bitki köklerinin toprak içerisinde ilerlemesi zorlaşmaktadır (Kozłowski, 1999). Tekstürleri farklı olan toprakların fiziksel özellikleri bakımından sıkışma karşısında gösterdikleri tepkilerin farklılık gösterdiği daha önce vurgulanmıştı. Benzer olarak farklı tekstür sınıflarında yer alan topraklar üzerinde yetişen ağaçların da sıkışma karşısında gösterdiği tepkiler de farklı olmaktadır. Gomez vd (2002) yaptıkları çalışmada killi, tınlı ve kumlu tınlı topraklar üzerinde yetişen *Pinus ponderosa*'da gelişim farklılıklarını incelemişler, gün ortasında yapraklarda görülen su stresinin killi ve tınlı topraklarda daha yüksek oranlarda gerçekleştiğini fakat kumlu tınlı topraklarda istatistikî anlamda bir farklılığın olmadığını ortaya koymuşlardır. İstatistikî anlamda önemli olmasa da killi topraklarda sıkışmanın bitki büyümesini olumsuz etkilediği, tınlı topraklarda etkilemediği ve kumlu tınlı topraklarda ise olumsuz etkilediği çalışma sonunda vurgulanmıştır.

Araştırmacılar sonuç olarak toprak sıkışmasının zararlı etkilerinin tekstüre ve toprak su rejimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Toprak sıkışmasına bağlı olarak artan kütle yoğunluğu, bitkilerin artımlarında önemli gerilemelere neden olmaktadır (Froehlich vd., 1986).

İleri derecede toprak sıkışması bitkilerde fizyolojik işlev bozukluğuna yol açarak su ve bitki besin elementlerinin alımında, meristem dokular için gerekli olan büyüme hormonları ve karbonhidrat sentezinde olumsuzluklar meydana getirebilmektedir. Bitki köklerinin iyi nüfuz edemediği topraklardaki sular bitkiler için elverişli olamamaktadır (Kozłowski, 1982). Suyun nemli ortamlardan kuru ortamlara kapillar hareketi çok yavaşlamakta, suyun bitki kökleri tarafından alımı azalmakta ve bunlara bağlı olarak yapraklardaki su içeriğinde de bir azalma görülmektedir. Buradan yola çıkarak toprak sıkışmasının seviyesindeki artışa bağlı olarak bitkilerin suyu absorbe gücünde bir azalmanın meydana geleceği söylenebilir (Arvidsson ve Jokela, 1995). Bu nedenle ileri derecede toprak sıkışması, bitki fizyolojisinde ve toprağın fiziksel özelliklerinde meydana getirdiği olumsuzluklar nedeniyle bitki büyümesini olumsuz yönde etkilemektedir (Soane ve Ouwerkerk, 1994).

Her ne kadar farklı ağaç türlerinin toprak sıkışmasına farklı tepkiler gösterdiği bildirilse de toprak sıkışmasına bağlı olarak bitki gelişiminde meydana gelen olumsuzlukların incelendiği çalışmalarda dal ve kök gelişiminin, bitki biyomasının ve boyunun bu durumdan önemli derecede etkilendiği vurgulanmaktadır. (Kozłowski, 1999; Bassett vd., 2005; Tan vd., 2006). Örneğin, Bassett vd. (2005), *Cordyline australis* ile yaptığı çalışmada dal ve kök gelişiminin toprak sıkışmasından olumsuz yönde etkilendiğini ve Bejarano vd. (2010) da *Quercus pyrenaica*'nın kök uzunluğunun toprak sıkışmasındaki artışa bağlı olarak azaldığını bildirmişlerdir. Bunun yanında Conlin ve van den Driessche (1996), toprak sıkışmasındaki artışın iğne yapraklı ağaçlarda yaprak uzunluğunu, kuru kök ağırlığını ve net fotosentezi olumsuz yönde etkilediğini belirlemiştir. Ayrıca Verdú ve Garcia-Fayos (1996) da *Pistacia lentiscus*'un kök yayılmasının toprak sıkışmasından olumsuz etkilendiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalardan yola çıkarak toprak suyunun eksikliği durumunda bitki kök dağılım oranının düşebileceği yada önemli derecede su noksanlığında daha kısa köklerin oluşabileceği ve bunun da fidan gelişimini önemli derecede engelleyebileceği söylenebilir.

Toprak sıkışması, bitkilerdeki hormonal büyüme düzenleyicilerinin miktarını ve dengesini değiştirerek ksilem dokularında absisik asit ve etilen miktarında artışa neden olmaktadır (Tardieu, 1994, Liang vd. 1996). Gelişen bitki kökleri toprakta mekanik bir engelleme ile karşılaştığında, bitkiler bu duruma etilen üretmekle tepki göstermekte ve dokulardaki etilen miktarı olması gerekenin üzerine çıkmaktadır (Osborne, 1976). Bu anlamda yapılmış bir çalışmada kütle yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda absisik asit miktarındaki artış ile stomatal iletkenlikteki azalış arasında bir korelasyon olduğu belirlenmiştir (Mulholland vd., 1996).

Toprak sıkışmasının fotosentez oranında azalmaya neden olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Wieniarska vd., 1987; Conlin ve van den Driessche 1996). Fotosentez oranındaki bu azalmaya ise yapraklardaki su

miktarında ortaya çıkan azalmanın neden olduğu bilinmektedir (Kozłowski, 1972).

Toprak sıkışması ile birlikte topraktan mineral madde alımı azalmakta, köklerin besin elementlerine ulaşması zorlaşmakta ve köklerin mineral madde alımı düşmektedir, bu nedenle ileri derecede toprak sıkışması bitkiler tarafından N, P ve K alımını güçleştirmektedir (Lal ve Russel, 1981; Kozłowski ve Pallardy 1997). Sıkışmış topraklardan besin elementi alımındaki düşüş birçok orman ağacının filizlerindeki besin elementi konsantrasyonunu da düşürmektedir (Conlin ve van den Driessche 1996).

5. Sonuç

Ormanlık alanlarda araç trafiğinin fazla olması, üretim, bölmeden çıkarma ve mekanik hazırlık gibi ormancılık uygulamaları, yoğun rekreasyonel alan kullanımları ve hayvan baskıları gibi nedenlerden dolayı orman örtüsü altındaki topraklarda sıkışma problemi önemli derecede kendini göstermektedir. Önemli seviyede toprak sıkışması başta toprağın fiziksel özellikleri olmak üzere kimyasal ve biyolojik özelliklerini de olumsuz yönde etkilemekte ve bu olumsuz toprak koşulları ise bitki gelişimini engellemektedir.

Önemli miktarlardaki sıkışma bitkilerde fizyolojik bozuklukları da beraberinde getirmektedir, örneğin sürekli olmamakla birlikte su adsorpsiyonunda ve yapraklardaki su bütçesinde azalma toprak sıkışması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Toprak sıkışması ayrıca bitkilerde büyüme hormonlarının (absisik asit ve etilen gibi) miktar ve dengesinde de olumsuz değişikliklere neden olmakta ve bitkiler için hayati öneme sahip besin elementlerinin hem yüzey katmanlarda hem de alt katmanlarda alımını engelleyebilmektedir. Sıkışma sorununun görüldüğü alanlarda yetiştirilen bitkilerde yaprak alanlarındaki daralmadan dolayı fotosentez oranlarında da bir azalma tespit edilmiştir. Toprak sıkışmasının ileri aşamalarında aerobik kök solunumunun yerini anaerobik solunum almaktadır.

Toprak sıkışması probleminin ortadan kaldırılması veya toprakların eski durumlarına kavuşması toprak özelliklerine ve sıkışmış katmanın kalınlığına bağlı olarak uzun yıllar alabilmektedir. Topraklarda görülen diğer degradasyon tiplerinde olduğu gibi sıkışmada da, sorunun başlamasından önce alınacak önlemler, hem daha az para hem de daha az zaman istemektedir. Sorun oluşuktan sonra sorununu giderilmesi için harcanacak paranın ve zamanın boyutları artmaktadır. Bu nedenle ormancılık faaliyetlerinin yürütüldüğü alanlarda sürdürülebilir arazi yönetimi uygulamalarının gerekliliği bu çalışmada bir kez daha vurgulanmak istenmiştir.

Kaynaklar

- Akay, A.E., Erdaş, O., 2007. Orman traktörü ile sürütme sırasında oluşan tekerlek izi derinliğinin hesaplanması. Süleyman Demirel Üniv. Orman Fak. Dergisi, seri:A, sayı:1, s:49-57.
- Akay, A.E., Yüksel, A., Reis, M., Tutus, A., 2007. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. Polish Journal of Environmental Studies, 16 (3):371-376.
- Ampoorter, E., Goris, R., Cornelis, W.M., Verheyen, K., 2007. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils, For. Ecol. Manag. 241 162-174.
- Ampoorter, E., Van Nevel, L., De Vos, B., Hermy, M., Verheyen, K., 2010. Assessing the effects of initial soil characteristics,

- machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, 260, 1664-1676
- Arocena J.M., 2000. Cations in solution from forest soils subjected to forest floor removal and compaction treatments. *Forest Ecol Manag*, 133:71-80.
- Arvidsson, J., Jokela, W.E., 1995. A lysimeter study of soil compaction effects on evapotranspiration in a barley crop. *Swed. J. Agric. Res.* 25: 109–118.
- Assouline, S., Tavares-Filho, J., Tessier, D., 1997. Effect of soil compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 390–398.
- Atik, M., Sayan, S., Karagüzel, O., 2009. Impact of recreational trampling on the natural vegetation in Termessos National Park, Antalya-Turkey. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 15 (3):249-258
- Axelrod P.E., Chow M.L., Arnold C.S., Lu K., McDermott J.M., Davies J., 2002. Cultivation-dependent characterization of bacterial diversity from British Columbia forest soils subjected to disturbance. *Can J Microbiol* 48:643-654.
- Ballard, T.M., 2000. Impacts of soil management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133 (1-2): 37-42.
- Bass P., Bischoff P.J., 2001. Seasonal variability in abundance and diversity of soil gymnamoebae along a short transect in southeastern USA. *J Eukaryot Microbiol* 48:475-479.
- Bassett, I.E., Simcock, R.C., Mitchell, N.D., 2005. Consequences of soil compaction for seedling establishment: implications for natural regeneration and restoration, *Austral. Ecol.* **30** (2005), pp. 827–833.
- Bejarano, M.D., Villar, R., Murillo, A.M., Quero, J.L., 2010. Effects of Soil Compaction and Light on Growth of *Quercus Pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings. *Soil&Tillage Research*, 110 (1):108-114..
- Brady, N.C., Weil, R.R., 2002. *Elements of the Nature and Properties of Soils*, Upper Saddle River, New Jersey pp. 202–212.
- Breland, T.A., Hansen, S., 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction, *Soil Biol. Biochem.* **28**, pp. 655–663
- Bullock, P., Gregory, P.J., 1991. *Soils in the Urban Environment*. Blackwell, Oxford.
- Carter E.A., Aust W.M., Burger J.A., 2007. Soil strength response of select soil disturbance classes on a wet pine flat in South Carolina. *Forest Ecol Manag.* 247:131-139.
- Cheatle, R.J. 1991. Tree growth on compacted Oxisol. *Soil Tillage Res.* 19: 331–344.
- Closa I., Goicoechea, N., 2010 Seasonal dynamics of the physicochemical and biological properties of soils in naturally regenerating, unmanaged and clear-cut beech stands in northern Spain. *Eur J Soil Biol* 46:190-199.
- Conlin, T.S.S., Van Den Driesche, R., 1996. Short-term effects of soil compaction on growth of *Pinus contorta* seedlings. *Can. J. For. Res.* 26:727–739.
- Corns, I.G.W., 1988, Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills, *Can. J. For. Res.* **18**, pp. 75–84.
- Croke, J., Hairsine, P., Fogarty, P., 2001. Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management* 143: 3-12
- da Silva S.R., de Barros, N.F., da Costa, L.M., Leite, F.P., 2008. Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. *Rev Bras Cienc Solo* 32:921-932.
- Demir, M., Makineci, E., Yilmaz, E., 2007. Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an oak (*Quercus petraea* L.) stand. *Building and Environment* 42 1194–1199.
- Douglas, J. T., Crawford, C.E., 1993. The response of a ryegrass sward to wheel traffic and applied nitrogen. *Grass Forage Sci.* 49: 99–100.
- Driscoll, K.G., Arocena, J.M., Massicotte, H.B., 2009. Post-fire soil nitrogen content and vegetation composition in sub-boreal spruce forests of British Columbia's central interior, Canada. *Forest Ecology and Management*, Vol: 121 3:227-237.
- Eroğlu, H., Sarıyıldız, T., Acar, H.H. Tilki, F., Akkuzu, E., Küçük, M., Yolasığmaz, H.A., Sönmez, T., Özkaya, M.S., 2009. Artvin Yöresi Ormanlarında Gerçekleştirilen Bölmeden Çıkarma ve Yol Yapımı Çalışmalarından Kaynaklanan Zararların Belirlenmesi Üzerine Araştırmalar. TÜBİTAK 106 O 054 nolu proje sonuç raporu. S:14-15
- Frey, B., Kremer, J., Rüdter, A., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 45, 312-320.
- Froehlich, H.A., D.W.R., Miles, R.W. Robbins, 1986. Growth of young *Pinus ponderosa* and *Pinus contorta* on compacted soil in central Washington. *For. Ecol. Manage.* **15**, pp. 285–294
- Gomez, A., Powers, R.F., Singer, M.J., Horwath, W.R., 2002. Soil compaction effects on growth of young Ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **66**, pp. 1334–1343.
- Greacen, E.L., Sands, R., 1980. Compaction of forest soils: a review. *Aust. J. Soil Res.* **18**, pp. 163–189.
- Han S.K., Han, H.S., Page-Dumroese D.S., Johnson L.R., 2009. Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Can J Forest Res* 39:976-989.
- Hillel, D.L. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Huang, J., Lacey, S.T., Ryan, P.J., 1996. Impact of forest harvesting on the hydraulic properties of surface soil, *Soil Sci.* 161, pp
- Jenkinson, D.S., Rayner, J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classic experiments, *Soil Sci.* pp. 298–305.
- Jim, C.Y., 1987. Camping impacts on vegetation and soil in a Hong Kong country park. *Applied Geography*, 7,
- Kissling, M., Hegetschweiler, K.T., Rusterholz, H.P., Baur, B., 2009. Short-term and long-term effects of human trampling on above-ground vegetation, soil density, soil organic matter and soil microbial processes in suburban beech forests. *Applied Soil Ecology* 42 303–314
- Korkmaz, N., Karadeniz, N., 2004. Nallıhan-Hoşbebe Orman İç Dinlenme Yerinin Rekreasyon Kaynaklarının Geliştirilmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi* 10 (1) 24-30
- Kozłowski, T.T., 1972. *Water Deficits and Plant Growth*, Vol. III, pp.1–64. Academic Press, New York.
- Kozłowski, T. T. 1982. Water supply and tree growth. Part II. Flooding. *For. Abstr.* 43: 145–161.
- Kozłowski, T.T., Kramer, P.J., Pallardy, S.G., 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press, San Diego, CA.
- Kozłowski, T.T., 1999. Soil compaction and growth of woody plants, *Scand. J. For. Res.* 14, pp. 596–619
- Kozłowski, T.T., Pallardy, S.G., 1997. *Growth Control in Woody Plants*. Academic Press, San Diego, CA
- Lal, R., Russel, E.W., 1981. *Tropical Agricultural Hydrology*, pp. 153–161. Wiley, New York.
- Li, Q., Allen, H.L., Wilson, C.A., 2003. Nitrogen mineralization dynamics following the establishment of a loblolly pine plantation, *Can. J. For. Res.* **33**, pp. 364–374
- Li, Q., Allen, H.L., Wollum II, A.G., 2004. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 571–579.
- Liang, J., Zhang, J., Wong, M.H., 1996. Stomatal conductance in relation to abscisic acid concentrations in two tropical trees, *Acacia confusa* and *Litsea glutinosa*. *Plant Cell Environ.* 19: 93–100.
- Lowery, B., Schuler, R.T., 1991. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 216–223.

- Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, Jordán A, Zavala LM., 2011. Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews* 109:44-60.
- Mingyu, Y., Hens, L., Xiaokun, O., De Wulf, R., 2009. Impacts of recreational trampling on sub-alpine vegetation and soils in Northwest Yunnan, China *Acta Ecologica Sinica* 29 171–175
- Mitchell, M.L., Hassan, A.E., Davey, C.B., Gregory, J.D., 1982. Loblolly pine growth in compacted greenhouse soils. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 25: 304–307, 312.
- Mulholland, B. J., Black, C.R., Taylor, I.B., Roberts, J.A., Lenton, J.R., 1996. Effect of soil compaction on barley (*Hordeum vulgare*) growth. I. A possible role for ABA as a root sourced chemical signal. *J. Exp. Bot.* 47: 539–549.
- Nugent, C., Kanali, C., Owende, P.M.O., Nieuwenhuis, M., Ward, S., 2003. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *Forest Ecology and Management*, Vol:180 (1-2), pp:85-98.
- Osborne, D.J. 1976. Control of cell shape and cell size by the dual regulation of auxin and ethylene. In *Sunderland, Perspectives in Experimental Botany*, pp. 89–102. Pergamon Press, Oxford
- Pickering, C.M., Hill, W., Newsome, D., Leung, Y.F., 2010. Comparing hiking, mountain biking and horse riding impacts on vegetation and soils in Australia and the United States of America. *Journal of Environmental Management* 91: 551–562
- Price K., Jackson, C.R., Parker, A.J., 2010. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. *J Hydrol* 383:256-268.
- Rolf, R.K., 1994. A review of preventative and loosening measures to alleviate soil compaction in tree planting areas. *Arboricult. J.* 18: 431–448.
- Schmidt, M.W., Noack, A.G., 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14: pp. 777–793.
- Snyman, H.A., 2003. Short-term response of rangeland following an unplanned fire in terms of soil characteristics in a semi-arid climate of South Africa. *J. Arid Environ.* 55 (1), 160–180.
- Soane, B.D., Van Ouwerkerk, C., 1994. *Soil compaction in crop production*. Elsevier, London.
- Sparling, G.P., 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust. J. Soil Res.* 30, pp. 195–207
- Stone, D.M., Elioff, J.D., 2000. Soil disturbance and aspen regeneration on clay soils: three case histories. *Forest Chron.* 76, 747–752.
- Tan, X., Chang, S.X., Kabzems, R., 2005. Effects of soil compaction and forest floor removal on soil microbial properties and N transformations in a boreal forest long-term soil productivity study. *Forest Ecology and Management* Volume 217, Issues 2-3, p: 158-170
- Tan, X., Kabzems, R., Chang, S.X., 2006. Response of forest vegetation and foliar $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ to soil compaction and forest floor removal in boreal aspen forest. *Forest Ecology and Management* 222, 450-458.
- Tan, X., Chang, S.X., 2007. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil & Tillage Research* 93 77–86.
- Tardieu, F., 1994. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signalling. *Soil Tillage Res.* 30: 217–243.
- Thorud, D.B. Frissell, S.S., 1976. Time changes in soil density following compaction under an oak forest. *Minnesota Forestry Research Note* 257.
- Torbert, H.A., Wood, C.W., 1992. Effects of soil compaction and water-filled porespace on soil microbial activity and N losses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23: 1321–1331.
- Turgut, B., Aksakal, E.L., Öztaş, T., Babagil, G.E., 2008. Penetrasyon direncine etki eden toprak özelliklerine ait etki katsayılarının çoklu regresyon analizi ile belirlenmesi. *Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Dergisi*, 39(1), 115-121
- Turgut, B., Aksakal, E.L., Öztaş, T., 2010. Toprak sıkışmasına bağlı fiziksel ortam özelliklerindeki etkileşimler. III. Ulusal Karadeniz Ormanlık Kongresi, cilt:4, s:1439-1446.
- Uzun, S., Müderrisoğlu, H., 2010. Kırsal rekreasyon alanlarında kullanıcı memnuniyeti: Bolu gölcük ormanı için dinlenme yeri örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, Seri:A, Sayı:1, s:67-82.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selavradjou, S.K., 2004. Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection EUR 21319 EN/6, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg, 872.
- Verdú, M., Garcia-Fayos, P., 1996. Nucleation processes in a Mediterranean bird-dispersed plant, *Funct. Ecol.* 10 , pp. 275–280
- Whalley, W.R., Dumitru, E., Dexter, A.R., 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil Tillage Res.* 35:53–68.
- Wieniarska, J., Lipiecki, J., Stanek, R., Kesik, T., 1987. The effects of soil compaction due to machinery operation on a raspberry plantation. *Fruit Sci. Rep. (Skierniewice)* 14 (2): 71–78.
- Yıldız, A., Esen, D., Karaoz, Ö.M., Sarginci, M., Topraka, B., Soysal, Y., 2010. Effects of different site preparation methods on soil carbon and nutrient removal from Eastern beech regeneration sites in Turkey's Black Sea region. *Applied Soil Ecology* 45, 49–5.