

## Bitki kökleriyle şev stabilizasyonun sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi

Ali Kemal Arkun<sup>a,\*</sup>, Mustafa Ergen<sup>a</sup>, Ferit Çakır<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Amasya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Kentsel Tasarım ve Peyzaj Mimarisi Bölümü, Amasya

<sup>b</sup> Amasya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Amasya

\* İletişim yazarı/Corresponding author: alikemalarkun@amasya.edu.tr, Geliş tarihi/Received: 11.05.2013, Kabul tarihi/Accepted: 31.10.2013

**Özet:** Dünyada ve Türkiye’de kuraklık, erozyon, heyelan ve aşırı yağış gibi nedenlerden yapılaşmanın büyük oranlarda artması nedeniyle yapılaşmaya elverişli arazilere verilen önem artmaktadır. Özellikle eğimli arazilerin bu tür problemlerden daha kolay etkilenmesi ve bu etkiler sonucunda kullanım fonksiyonlarını kaybetmesi şev stabilizasyonun önemini arttırmıştır. Günümüzde doğal yamaçlar veya yapay yollarla elde edilen şevlerin göçme ve kayma problemleri birçok disiplin açısından oldukça önemli bir konu haline gelmiş ve bu problemin çözümü için birçok farklı güçlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada zeminlerin ve şevlerin güçlendirilmesinde önemli bir uygulama yöntemi olarak bilinen bitkilendirme çalışmaları ele alınmış ve farklı bitki türlerine dayalı şevlerin stabilizasyonu ve istinat duvarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, örnek bir şev yapısı istinat duvarıyla birlikte sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve bu model üzerinde *Juniperus horizontalis* (Yayılcı Ardıç) ve *Pittosporum tenuifolium* bitkilerinin oluşturacağı olumlu ve olumsuz etkiler gözlemlenmiştir. Sonlu eleman analizleri sonucunda bitki köklerinin şevler üzerinde yer değiştirme ve gerilme açısından iyileştirmeler sağladığı ve bitki köklerinin yüzeyel olarak yayılması durumunda bu iyileştirmelerin daha da arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Şev stabilizasyonu, Bitkilendirme, İstinat duvarı, Sonlu elemanlar yöntemi, Statik analiz

## The investigation of slope stabilization with plant roots by finite element analysis

**Abstract:** The proportion of durable soil areas is steadily decreasing for some reasons such as drought, erosion, landslide and excessive rain fall in the all world. Therefore, usable areas are steadily reducing and the significance of usable land is increasing due to the rapid increase in construction. The importance of slope stabilization is increased because sloping terrains (slope) are more easily affected by such problems and as a result of these effects they lose their use of function. Today, slump and sliding problems of human-made or natural slopes have become an important topic in many disciplines and many different strengthening methods have been developed to solve these problems. In this study, plant applications as an important method for strengthening grounds and slopes are dealt and slope stabilization based on different plant species and their effects on retaining wall are researched. For this purpose, a sample slope structure with a retaining wall is modeled by using finite element method and the positive and negative effects of *Juniperus horizontalis* and *Pittosporum tenuifolium* plants on this model are observed. Results of the finite element analyses show that plant roots on the slopes provide improvements in terms of displacement and stress and plant roots on the surface has a greater effect on the slope stabilization.

**Keywords:** Slope slope stabilization, Plant, Retaining wall, Finite element method, Static analysis

### 1.Giriş

Ekosistemdeki bozulmalar, kuraklık, erozyon, heyelan ve göçme gibi birçok problemin ortaya çıkmasına ve zeminlerin bozulmasına sebep olmaktadır. Türkiye coğrafi konumu, topoğrafik yapısı ve iklim şartları erozyon veya heyelan gibi problemleri artırmakta ve bu problemlerle mücadele edilmesini zorlaştırmaktadır. Resmi verilere göre, Türkiye’nin arazilerinin %47.98’inde eğim %20’den daha fazladır. Bununla birlikte, Türkiye’deki sorunsuz arazilerin oranı %13.86 olmasına karşın, şiddetli veya çok şiddetli erozyon etkisinin görüldüğü arazi oranı %58.74’tür (Erpul ve Saygın, 2012). Ayrıca, Türkiye topraklarının %73’ü şiddetli erozyon tehlikesine maruz olup her yıl erozyon sonucunda 500 milyon ton verimli toprak kaybedilmektedir (Anonim, 2013a). Elde edilen bu veriler Türkiye’deki arazilerin büyük bir bölümünün eğimli olduğunu ve bu eğimli arazilerin büyük oranda erozyon etkisi altında olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, Türkiye’deki

arazilerin ve erozyon tehlikesinin mevcut durumu Türkiye topraklarının büyük risk taşıdığını göstermektedir.

Şevlerin göçme problemi birçok disiplin açısından oldukça önemli bir konu olup şev stabilizasyonu konusunda birçok iyileştirme ve güçlendirme yöntemi geliştirilmiştir. Dünya üzerinde şevlerin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerden biride şev üzerinde bitkilendirme yapılmasıdır. Genel olarak, zeminin donatılabilmesi olarak adlandırılan bu sistemde, zeminle bitki köklerinin sıkışarak birlikte çalışmaları sayesinde zemin ve kökler arasındaki temas noktalarında sürtünme kuvvetleri oluşmakta ve böylece temas noktalarında kalıcı bir bileşim meydana gelmektedir. Diğer bir ifadeyle, bitki kökleri yardımıyla zemin içindeki gerilme kuvvetleri karşılanmakta ve oluşan gerilmelere karşı zemin güçlenmiş olmaktadır. Bu nedenle, şevlerin akmasını ve göçmesini engellemek ve estetik bir görünüm sağlamak amacı ile şevlerin uygun bitkilerle güçlendirilmesi oldukça etkili bir yöntemdir. Bitki kökleri zemin formasyonuna bağlı olarak farklı yönlere ve

farklı uzunluklarda büyürler. Bu gelişim bitki köklerinin zeminin içinde etkili bir şekilde yayılmasına ve zeminin daha homojen bir şekilde güçlenmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, şev üzerinde yer alan bitkiler zeminin su tutmasını engelleyerek, şevin kuru kalmasını sağlayarak transpirasyon sayesinde bitkiler zeminde bulunan suyun büyük bir kısmını buhar halinde atmosfere vererek zeminde nem dengesini oluştururlar.

Zeminlerde bitkilendirme çalışmaları, uygulamanın kısa sürede ve ekonomik çözümler sunması, uygulama kolaylığı ve çeşitliliği, özel ekipman gerektirmemesi ve çok değişik amaçlar için farklı boyut ve türlerde bitkilerin kullanılabilmesi nedeniyle şevlerin stabilizasyonu açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bitki köklerinin zemin içinde taşımak zorunda kaldıkları çekme gerilmeleri altında kolayca kopmamları ve içinde yer aldığı zeminden kolay bir şekilde sıyrılmamları bu sistemlerin en önemli avantajları arasındadır.

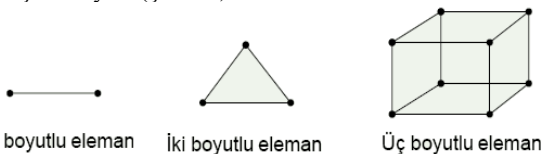
## 2. Materyal ve yöntem

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler yapıların ve zeminlerin davranışlarının nümerik olarak analiz edilmelerini kolaylaştırmıştır. Matematiksel modelleme, yapının tamamının veya belli bir bölümünün çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışının gözlenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık ve büyük geometriye sahip olan yamaç ve şevlerin sayısal ortamda modellenmesi ve modellenen sistemin statik ve dinamik yükler etkisi altındaki davranışın belirlenmesinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

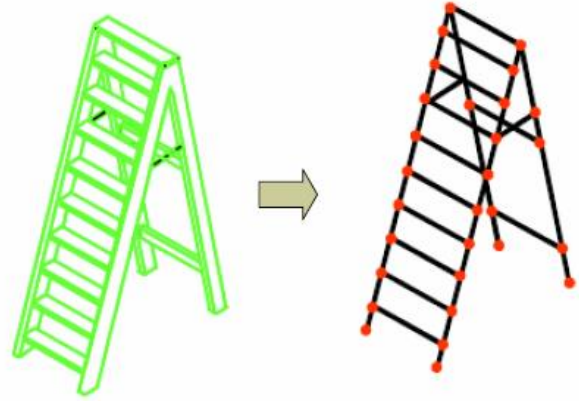
### 2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi fiziksel bir yapının matematiksel olarak tanımlanmasıdır. Diğer bir ifadeyle, çeşitli mühendislik problemlerine çözüm arayan sayısal (nümerik) bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminin temeli, karmaşık problemleri basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Bu yaklaşımda, karmaşık problemler farklı büyüklükteki basit parçalara ayrılarak matematiksel olarak ifade edilir. Eleman olarak adlandırılan bu parçalar, köşelerini oluşturan düğüm noktalarıyla birbirine bağlanarak süreklilik sağlanır. Çözüm aşamasında ise her bir parça ayrı ayrı ele alınarak matematiksel denklemler yazılır ve problemin bütünü için çözüm üretilir.

Sonlu elemanlar yönteminde en temel kavramlar "eleman ve düğüm noktaları" dır. Eleman, belli bir fiziksel yapıyı sayısal ortama aktarmada kullanılan tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu parçalardır (Şekil 1). Düğüm noktası ise bir elemanın köşe noktalarını tanımlayan ve farklı elemanların birleşerek sürekli hale gelmesini sağlayan noktalar dır. Bu nedenle, elemanlar ve düğüm noktaları kullanılarak fiziksel bir yapıyı bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar kullanarak sayısal ortamda modellemek oldukça kolaydır (Şekil 2).



Şekil 1. Sonlu eleman örnekleri ve düğüm noktaları (Fahjan, 2013)



Şekil 2. Fiziksel bir yapının sonlu eleman modeli (Fahjan, 2013)

Sonlu elemanlar yönteminin teorisi ilk olarak 1900'li yılların başlarına dayanmaktadır. Özellikle 1943'te Courant'ın kısmi diferansiyel denklemlerin çözümüne ilişkin yaptığı çalışmalar ve 1950'lerde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bugünkü şeklini almış ve geliştirilmiştir (Wait ve Mitchell, 1985). Günümüzdeki şekliyle ilk kullanımı 1950'li yıllarda İnşaat Mühendisliği'nde (Fahjan, 2013) olan bu yöntem günümüzde farklı alanlarda karşılaşılan problemlerin çözümü için oldukça önemli bir yaklaşım haline gelmiştir. Bu yöntemin en önemli avantajı karmaşık problemleri sayısal ortama aktararak problemin çözümüne yönelik yaklaşımları etkili bir şekilde araştırmaya yardımcı olmasıdır.

### 2.2. Şevlerin göçme mekanizmaları

Güçlendirme ve iyileştirme adına düzgün bir plan oluşturabilmek için şevlerin göçme mekanizmalarını anlamak oldukça önemlidir. Şevlerin göçme mekanizması yapısal davranış ve dolayısıyla da şev eğimi, şevin yüklenme durumu ve şevi oluşturan malzemeye bağlı olarak değişmektedir. Ancak, şevlerde göçme mekanizması genellikle yer çekimi vb. etkiler altında kayma gerilmelerinin artması ve zeminin kayma direncinin azalması sonucunda kayma yüzeyi boyunca zeminin kütle halinde aşağı doğru hareket etmesi şeklinde meydana gelmektedir. Şevin üst yüzeyinin yüklenmesi, şev eğiminin artması, şev burnunda aşınmaların olması ve ayrıca kar ile yağmur sularının şev içine sızması gibi etmenler (Şekil 3) kayma gerilmelerinin artmasına neden olurken zeminde meydana gelen titreşimler (depremler, araç etkileri, patlamalar vb.) ve boşluk suyu basıncının artması gibi nedenler zeminin kayma direncini azaltmaktadır (Uzuner, 2007). Şevleri oluşturan gerilme dağılımını aktif bölge, kayma bölgesi ve pasif bölge olmak üzere üç genel bölgeye ayırmak mümkündür. Bu bölgeler şevin kayma yüzeyini oluşturarak şevin göçme şeklinde ve mekanizmasında etkili olurlar.

Günümüzde şevlerin göçmemesi amacıyla alınan en basit yöntem şev burnuna rijit bir istinat duvarı yapılmasıdır (Şekil 4). İstinat duvarları dünya üzerinde meydana gelen şev göçmeleri esnasında gösterdikleri yapısal performans ve davranım özellikleri ile birçok projede şev göçmesini önlemek için aktif olarak kullanılmaktadırlar. Taş ve benzeri malzemelerden yapılan yığma istinat duvarları klasik tipte rijit istinat sistemlerine verilebilecek en güzel örneklerden

birdir. Söz konusu sistemlerin en belirgin olumlu yönleri bu yapıların yüksek dayanıma sahip olmaları ve genel bir göçme yaşanmaması için yüksek miktarda deformasyonlara müsaade etmemeleridir. Bu nedenlerden dolayı yığma istinat duvarları özellikle dik eğime sahip arazilerde kullanım olanağına sahip ekonomik, pratik ve kolay uygulanabilir çözümlerdir. Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman yönteminde şev eğimi önüne taş bir istinat duvarı modellenerek bitkilerin istinat duvarı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

### 2.3. Şevlerde bitkilendirme

Bitkilendirme sistemiyle zemine kohezyon kazandırılmakta ve bitki kökleri sayesinde zeminin yüksek bir kayma mukavemetine ulaşılması sağlanmaktadır. Zemin ve bitki köklerinin kompozit bir malzeme olarak çalışabilmesi için bitki kökü ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı ve çekme mukavemeti yeterli büyüklükte olmalıdır. Her durumda elde edilecek sürtünme kuvvetinin değeri bitki kökünün bulunduğu derinliğe ve oluşan sürtünme katsayısına bağlıdır.

Bitkilendirme sistemlerinin, yapısal sistemlerin yerine tercih edilmelerinin en önemli nedenleri arasında;

- Doğal olmaları,
- Estetik olmaları,
- Hızlı gelişim göstermeleri,
- Ekonomik olmaları,
- Arazi kazanımı sağlamaları gibi hususlar gösterilebilir.

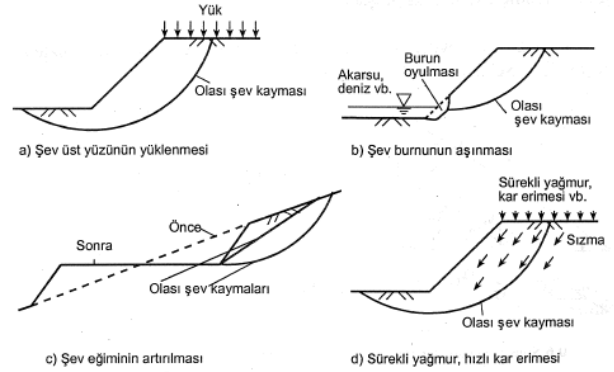
Günümüzde zayıf zeminlerin ve şevlerin kayma veya göçmeye karşı daha stabil hale getirilmesi için çok çeşitli bitki türlerine rastlamak mümkündür. Bu çalışmada şev stabilizasyonu açısından oldukça yaygın bir kullanım alanı bulabilen *Pittosporum tenuifolium* ve *Juniperus horizontalis* bitkileri ele alınmış ve bu bitkilerle yapılan güçlendirmeler üzerinde durulmuştur. Bu çalışma şev stabilizasyonunun sağlanmasında kazık kök ve yayvan kök yapan iki farklı bitki seçilmiştir. Buradaki amaç şevlerin güçlendirilmesinde hangi tür bitkinin daha kuvvetli olduğunun vurgulanmasıdır. Bu amaçla seçilen bitkilerin kök yapısı yapılan çalışma içinde bitki seçimini etkileyen en önemli etmen olarak değerlendirilmiştir.

#### 2.3.1. *Pittosporum tenuifolium*

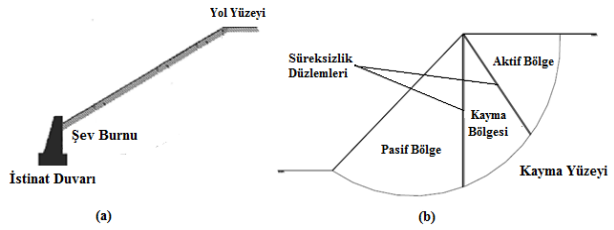
*Pittosporum tenuifolium* Pittosporaceae familyasından yer almaktadır. *Pittosporum tenuifolium* küçük herdem yeşil ağaççıktır (Şekil 5-6) (Anonim, 2013b). Özellikle tercih ettiği bir toprak bulunmamaktadır. Çok kuru alanlarda ve çok ıslak alanlarda yaşayamaz. Dona ve rüzgâra karşı dayanıklı bir bitki türüdür. Bu bitki genellikle ormanlık alanlarda, ırma kenarlarında ve fundalık arazilerde sıkça bulunur (Anonim, 2013c). Bu bitki türünün şev stabilizasyonu için seçilmesinin en önemli nedeni bitkinin ve bitki kökünün çok hızlı şekilde büyümesi yayvan kök yapısına sahip olmasıdır.

Şevlerin stabilizasyonu açısından da *Pittosporum tenuifolium* oldukça önemli ve yaygın olarak kullanılan bir bitki türüdür. Bu nedenle, bu çalışma da *Pittosporum tenuifolium* ortalama değerlerine bağlı olarak şevlerde yaptığı etkiler araştırılmıştır. Genel olarak *Pittosporum*

*tenuifolium*'un yapabileceği kök derinliği yaklaşık 1.2 m olarak alınmış ve kök genişliği 1.5 m olarak kabul edilmiştir (Marden vd., 2005).



Şekil 3. Şevlerin kayma nedenleri ve kayma şekilleri (Uzuner, 2007)



Şekil 4. Örnek bir şev yapısı (a) ve gerilme dağılımları (b) (Yılmaz vd., 2008)



Şekil 5. Beş yaşındaki *Pittosporum tenuifolium* genel görünümü ve kök yayılışı (Anonim, 2013c)



Şekil 6. *Pittosporum tenuifolium* genel görünümü (Anonim, 2013d)

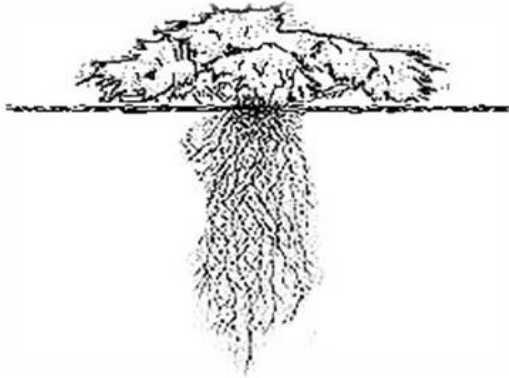
### 2.3.2. *Juniperus horizontalis*

*Juniperus horizontalis* (Yayılcı Ardıç, Sürünücü Ardıç) Servigiller (Cupressaceae) familyasında yer alan iğne yapraklı çalı formunda bitki türüdür. *Juniperus horizontalis* Kuzey Amerika'dan, Orta Amerika, Avrupa, Kuzey ve Doğu Afrika, Asya ve Himalayalar'a kadar geniş bir alanda yayılım göstermektedir (Anonim, 2013f). *Juniperus horizontalis* 10-30 cm boy ve birkaç metre genişliğinde yayılıma ulaşabilir. Sürgünleri ince ve 0.7-1.2 mm çapındadır. Ters çift çaprazlama halindeki 1-2 mm uzunluğunda ve 1-1.5 mm genişliğindeki herdemyeşil iğne yaprakları mavi-yeşil ve yeşil renktedir. İki tohumlu kozalakları loblu ve küresel ufak meyve formunda, 5-7 mm çapında, soluk mavi ile beyaz mumsu renktedir. Kavisli kazık kök yapısına sahiptir (Şekil 7). *Juniperus horizontalis* soğuğa ve kuraklığa ve susuzluğa dayanıklıdır (Anonim, 2013e).

Türkiye'nin hemen hemen her bölgesinde yetişebilen *Juniperus horizontalis* genellikle park ve bahçe tasarımlarında, şev stabilizasyonunda, erozyon kontrol çalışmalarında, bozuk ekosistemlerin yeniden kazanılmasında grup veya soliter olarak kullanılmaktadırlar (Şekil 8). Genel olarak *Juniperus horizontalis* yapabileceği kök derinliği yaklaşık 1 m olarak alınarak kök genişliği 2.5 m olarak kabul edilmiştir. Yalın ve basit bir model elde etmek için, yapıyı oluşturan malzemenin mekanik özelliklerinin uygun bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

### 2.4. Sayısal modellerin oluşturulması

Şev gibi yapıların gerçek davranışı genellikle oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, yapıyı modellemek için birçok kabulün yapılması gerekmektedir.



Şekil 7. *Juniperus horizontalis*'in kök yayılımı



Şekil 8. *Juniperus horizontalis*'in genel görünümü (Anonim, 2013e)

Modelleme sırasında şev ve istinat duvarı arasında kalan kritik bölgelerde meydana gelen etkileri daha iyi gözlemlemek amacıyla, eleman ağ yapısında (mesh) sıklaştırma yapılarak sayısal model oluşturulmuştur (Şekil 9). Çalışma kapsamında ANSYS (2012) programıyla sayısal modeller oluşturulmuş ve hazırlanan sayısal modellerde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Modellemelerde Plane42 elemanı kullanılarak iki boyutta modelleme yapılmıştır.
- Bitki türlerinin yalnızca kökleri dikkate alınarak köklerin şev içinde yayılımları modellenmiştir.
- Kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri benzer yapılar üzerine yapılan incelemeler ve bilimsel çalışmalar göz önünde bulundurularak literatürde önerilen değerlerden alınmıştır (Çizelge 1).
- Modeller zeminden ve şevin sağ bölümünden tamamen dönmeye ve ötelenmeye sınırlandırılmıştır.
- Hazırlanan tüm modellerde yalnızca statik analizler yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve tartışma

Yapılan statik analizler sonucunda elde edilen değerlerin her bir düğüm noktasında ve her bir elemanda sunulması oldukça zordur. Bu nedenle çalışma kapsamında yalnızca maksimum ve minimum değerler üzerinde durularak elde edilen değerler renkli dağılımlar yardımıyla sunulmuştur.

Yer değiştirme ve deformasyon analizleri incelendiğinde, şevde meydana gelen yer değiştirmelerin düşeyde şevin istinat duvarıyla birleştiği bölümlerde ve istinat duvarı üzerinde olduğu ve maksimum 4.18 cm değerine ulaştığı görülmektedir. Yatay yer değiştirmelerde ise, en büyük yer değiştirme değerlerin şev yüzeyinde meydana geldiği ve maksimum 0.35 mm değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 10a - 11a). *Pittosporum tenuifolium* köklerinin maksimum düşey yer değiştirmeler üzerinde %53 oranında azalma (Şekil 10b) ve yatay yer değiştirmelerde ise %21 oranında artma (Şekil 11b), *Juniperus horizontalis* köklerinin maksimum düşey yer değiştirmeler üzerinde %25 oranında azalma (Şekil 10c) ve yatay yer değiştirmelerde ise %20 (Şekil 11c) oranında artma meydana getirdiği görülmektedir.

Gerilme analizlerinde ise bütün gerilmelerin daha doğru yorumlanabilmesi açısından Von Mises gerilme dağılımları dikkate alınmış ve bu gerilme dağılımları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Şev üzerinde yapılan analizlerde maksimum gerilmelerin istinat duvarında yoğunlaştığı ve şevin orta kısımlara doğru azalarak yayıldığı görülmektedir. Bitki kökleri eklenmesi durumunda ise *Pittosporum tenuifolium* köklerinin istinat duvarı üzerindeki gerilmeleri azalttığı ve maksimum gerilmelerin istinat duvarı ile şevin birleşim noktasında oluştuğu, *Juniperus horizontalis* köklerinde ise maksimum gerilmelerin bitki köklerinde yoğunlaştığı ve istinat duvarı ile şev içerisinde gerilmelerin oldukça küçük değerlerde kaldığı ( $171.281 \text{ N/m}^2$ ) tespit edilmiştir (Şekil 12). Ayrıca gerilme analizleri kıyaslandığında *Pittosporum tenuifolium* köklerinin şev içinde oluşan minimum von mises gerilmelerini %29 ve *Juniperus horizontalis* köklerinin ise %4 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

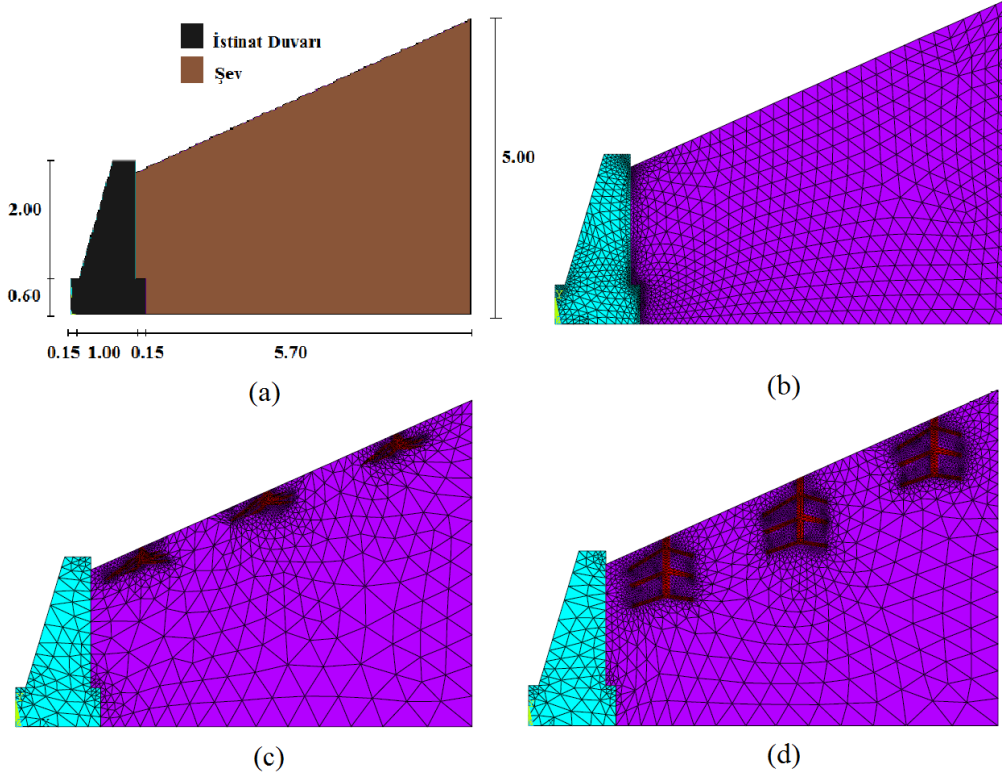
Çizelge 1. Kullanılan malzemelerin mühendislik özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Şev Zemini	3.00E+7	0.30	1750
İstinat Duvarı	8.00E+9	0.28	2550
Bitki Kökleri	1.00E+9	-	500

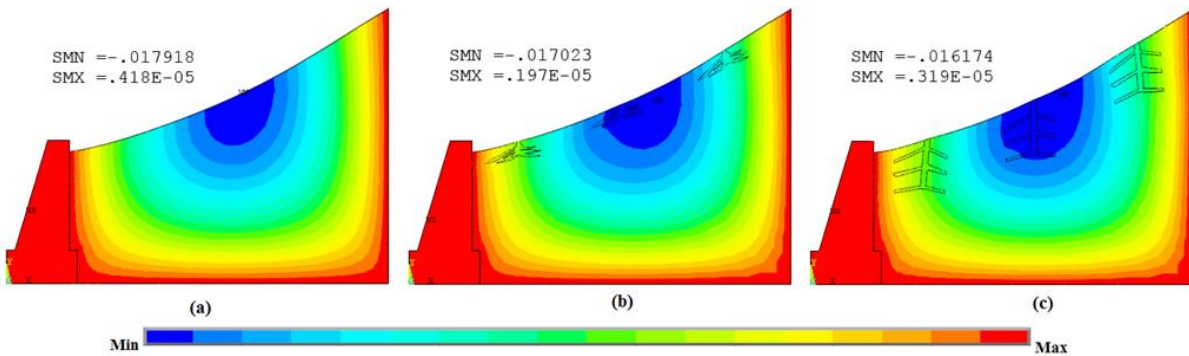
Kazık köklüler toprak kaymalarında sığ köklüler erozyon tehlikesi gösteren eğimli alanlarda kullanılan bitki kökü sistemini oluşturur (Yavuzşefik, 1998). Yaptığımız çalışma Yavuzşefik'in çalışmasında ortaya konulduğu gibi sığ köklü bitkilerin erozyonu tehlikesine karşı ve kazık köklü bitkilerin ise toprak kaymalarına karşı daha etkili olduğunu doğrulamıştır. Bu çalışma toprak kaymalarına karşı bitkisel güçlendirmenin istinat duvarlarında etkili bir çözüm sunmuştur. Yavuzşefik (1998), yaptığı çalışmada

istinat duvarlarını toprak kaymasına karşı alınan teknik önlemler içinde değerlendirmiştir. Bu çalışma teknik önlemler ile birlikte bitkilerin şev stabilizasyonunu çalışmalarında kök yapısına göre etkili çözümler ürettiğini kanıtlamıştır.

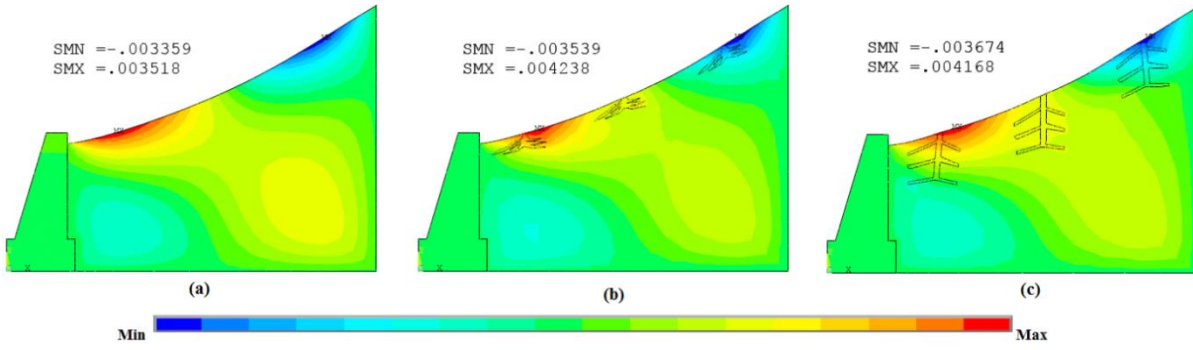
Tüm bu analizler ve değerlendirmeler ışığında, gerilmelerin şev ve istinat duvarının birleştiği ara yüzelerde farklılaştığı tespit edilmiştir. Bu ara yüzeyler genellikle malzeme farklılığından ve aşırı zorlanmadan dolayı kritik gerilmelerin olduğu bölümlerdir. Bu nedenle şev stabilizasyonu açısından istinat duvarı yapımlarında bu kritik bölgelerin daha hassas bir şekilde göz önünde bulundurulması ve yapılacak tasarımlarda bu bölümlere dikkat edilmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.



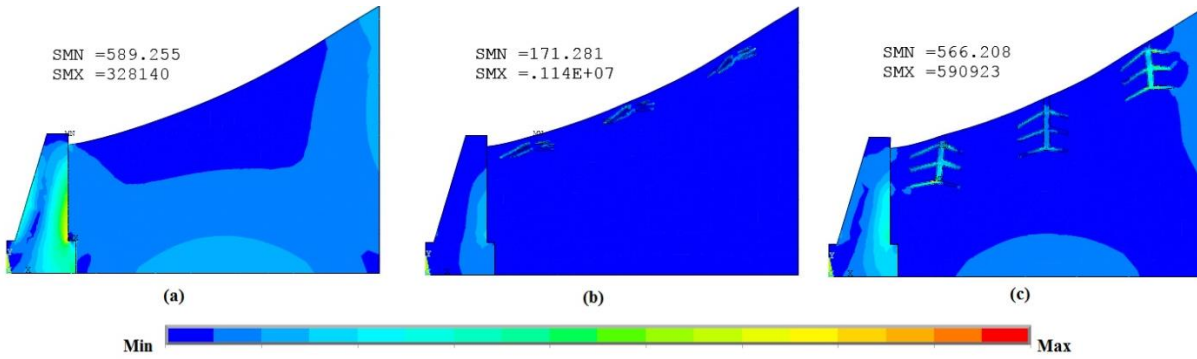
Şekil 9. (a) Şev boyutları (metre), (b) şevin sonlu eleman modeli, (c) *Pittosporum tenuifolium* köklerinin sonlu eleman modeli, (d) *Juniperus horizontalis* köklerinin sonlu eleman modeli



Şekil 10. Düşey yer değiştirmeler (m)



Şekil 11. Yatay yer değiştirmeler (m)

Şekil 12. Von mises gerilmeleri (N/m<sup>2</sup>)

#### 4. Sonuçlar ve öneriler

Kullanılabilir arazileri erozyon, heyelan veya göçme problemlerine karşı en uygun şekilde korumak ve uygun formlarda kullanımlarını sağlayarak yok olmalarını önlemek günümüzde oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında şevlerde meydana gelen göçme problemlerinin çözülmesi açısından bitkilendirme çalışmalarının önemi araştırılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle *Pittosporum tenuifolium* ve *Juniperus horizontalis* bitki köklerinin şev stabilizasyonuna katkısı incelenmiştir. Yapılan bütün modeller ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Farklı bitkilerin kullanıldığı şev yapılarının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmeleri sonucunda, bitki köklerinin şev stabilizasyonu açısından güvenli çözümler sunduğu tespit edilmiştir.
2. Bitkilendirme yapılan alanlarda ciddi derecede yer tasarrufu sağlanacağı ve bunun özellikle kentsel alanlarda efektif çözümler sunacağı düşünülmektedir.
3. Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda bitki köklerinin şevler üzerinde yer değiştirme ve gerilme açısından iyileştirmeler sağladığı ve bitki köklerinin yüzeyel olarak yayılması durumunda bu iyileştirmelerin daha da arttığı tespit edilmiştir.
4. Bitkilendirme çalışmaları, tamamen doğal bir sistem olması nedeniyle ekolojik dengeye uygun sistemler olması ve çevre kirliliğini ortadan kaldırarak doğal yaşam alanlarının sürekliliğini sağlamaları nedeniyle diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha uygun olacağı düşünülmektedir.
5. Biyolojik onarımın bir parçası olan şev bitkilendirme çalışmaları toprak drenajı, bitki kökleri tarafından mekanik toprak ıslahı, toprakta besin içeriğini

iyileştirilmesi, yaban hayatı habitatının sürdürülebilirliği gibi ekolojik avantajların yanı sıra toprak aşınma yüzeyinin korunması, kıyıda akış hızının azaltılması yüzey veya derin toprak bağlılığını sağlanması, yapısal uygulamalara nazaran maliyetinin düşük olması gibi teknik avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir.

6. Karşılaşılabilecek zorluklar ve yapılacak hataları en aza indirmek için, bitkilendirme çalışması yapılmadan önce iyi bir zemin etüdünün yapılması ve proje amaçlarına uygun bitki türlerinin ve bitki sayılarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak seçilmesinin oldukça önemli olacağı düşünülmektedir.
7. Şev stabilizasyonu açısından zemin durumuna bağlı olarak yapılacak bitkilendirme çalışmalarında sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak yapılacak uygulamaların sayısal ortamda modellenmesi ve uygulama sonrasında oluşacak olumlu ve olumsuz etkilerin gözlemlenmesi önerilmektedir.
8. Karmaşık problemlerin çözümü aşamasında oldukça önemli bir kullanım alanına sahip olan sonlu elemanlar yönteminin, şev stabilizasyonu, erozyon koruması ve toprak kaymalarının önlenmesi gibi doğal problemlerde de etkili bir şekilde kullanılabileceği düşünülmektedir.
9. Çalışma kapsamında yapılan analizler ve elde edilen analiz sonuçlarının ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı ve değişik şevler üzerinde farklı bitkilerin etkilerinin de araştırılmasının oldukça önemli ve gerekli olduğu düşünülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma ile ilgili katkı ve desteklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Mehmet Ilgar KIRZIOĞLU'na teşekkür ederiz.

**Kaynaklar**

- Anonim, 2013a. [http://aris.ormansu.gov.tr/index.php?q=tr/toprak/turkiyede\\_erozyon](http://aris.ormansu.gov.tr/index.php?q=tr/toprak/turkiyede_erozyon) (Ziyaret Tarihi: 15.01.2013)
- Anonim, 2013b. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pittosporum\\_tenuifolium](http://en.wikipedia.org/wiki/Pittosporum_tenuifolium) (Ziyaret tarihi: 24.10.2013)
- Anonim, 2013c. <http://icm.landcareresearch.co.nz/research/freshwater/documents/Kohuhu.pdf> (Ziyaret Tarihi: 13.01.2013)
- Anonim, 2013d. Photo by Phil Bendle, <http://www.terrain.net.nz/friends-of-te-henui-group/table-1/kohuhu.html> (Ziyaret tarihi: 24.10.2013)
- Anonim, 2013e. [http://en.wikipedia.org/wiki/Juniperus\\_horizontalis](http://en.wikipedia.org/wiki/Juniperus_horizontalis) (Ziyaret tarihi: 24.10.2013)
- Anonim, 2013f. [www.wikipedia.org/wiki/Juniper](http://www.wikipedia.org/wiki/Juniper) (Ziyaret Tarihi: 22.01.2013)
- ANSYS, 2012. Finite Element Analysis Software Version 14.0. USA.
- Erpul, G., Saygın, S.D., 2012. Ülkemizdeki toprak erozyonu sorunu üzerine: Ne yapmalı? Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi, 1(1): 26-32.
- Fahjan, Y., 2013. Sonlu Elemanlar Yöntemi. Teknik Not, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Deprem ve Yapı Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye.
- Marden, M., Rowan, D., Philips, C., 2005. Stabilising characterising of New Zealand indigenous riparian colonising plants. Journal of Plant and Soil, India, 278: 1-2.
- Uzuner, B.A., 2007. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekanikliği. Derya Kitapevi, Trabzon, Türkiye.
- Wait, R., Mitchell, A.R., 1985. Finite Element Analysis and Applications. J. Wiley Inc., Liverpool, England.
- Yavuzşefik, Y., 1998. Peyzaj Onarım Tekniği. Teknik Not. Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Orman Fakültesi, Düzce.
- Yılmaz, G., Tutuk, T., Özsoy, E.A., 2008. Kayma dairesi göçme mekanizması için plastik stabilite çözümü. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Dergisi, 21(2): 75-84.