

Sediment üretimini en aza indiren orman yolu güzergahının seçiminde CBS ve optimizasyon tekniklerinin kullanılması

Abdullah E. AKAY^{1*}; Orhan ERDAŞ¹; İsmail R. KARAS²

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 46060 Kahramanmaraş.

²Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 41400 Gebze, Kocaeli.

Özet

Topografik haritalar kullanan geleneksel orman yolu planlama metodları, çevre zararını en aza indiren yol güzergahını araştırma yeteneğinde değildir. Yol yapım aktiviteleri, orman yönetimindeki diğer aktivitelerden daha fazla oranda, özellikle aşırı miktarda sediment üretimi gibi, çevresel etkilere neden olmaktadır. Çevresel kısıtlayıcıları dikkate alan bir optimum yol güzergahı seçmek için orman mühendisleri tarafından yeterli sayıda alternatifin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sediment üretimi en az olan optimum orman yolu güzergahını seçmek için modern optimizasyon teknikleri ve CBS teknikleri gibi ileri teknolojilerle bütünleşen yeni bir metodoloji geliştirilmiştir. Yol seksiyonlarından kaynaklanan sediment üretiminin hesaplanmasında, CBS tabanlı sediment tahmin modeli kullanılmıştır. Her bir yol seksiyonu için ortalama sediment üretimi belirlendikten sonra kullanıcı tarafından belirlenen yol planlama kısıtlayıcılarına bağlı olarak, optimum yol güzergahının bulunmasında ağ analizi metodu kullanılmıştır. Ayrıca, birim maliyetler ve topografik koşulları temel alarak yol güzergahının toplam yapım maliyeti hesaplanmıştır. Metodoloji, KSÜ Başkonuş Araştırma ve Uygulama Ormanı'nda örnek bir yol güzergahının seçilmesinde kullanılmıştır. Bu basit uygulamadan elde edilen ön sonuçlar, metodolojinin çevresel etkisi en az olan orman yolu güzergahının seçilmesinde çok kullanışlı ve etkin olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Orman yolları, CBS, en kısa yol, sediment üretimi.

Using GIS and optimization techniques in selecting forest road alignment with minimum sediment yield

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Abdullah E. AKAY. akay@ksu.edu.tr; Tel: (344) 223 7666/453.

Abstract

Traditional method of designing forest road using topographic maps is not capable of searching for a road alignment with minimum environmental damage. Road construction activities cause more environmental impacts, especially excessive amount of sediment production, than any other activities in forest management. In order to select an optimum road alignment considering environmental constraints, sufficient alternatives must be evaluated by the forest engineers. In this study, a new methodology, integrated with advanced technologies including modern optimizations and GIS techniques, was developed to select an optimum forest road alignment with minimum sediment yield. GIS based sediment prediction model was used in estimating the sediment yield from the road sections. After determining average sediment yield for each road section, network analysis method was used to find the optimum road alignment, subject to user-defined road design constraints. Besides, the total construction cost for the road alignment was computed based on the unit costs and topographic conditions. The methodology was implemented in selecting a sample road alignment in KSU Baskonus Research and Application Forest. The preliminary results from the simple application indicated that this methodology can be very useful and efficient in selecting a forest road alignment with minimum environmental impact.

Keywords: *Forest roads, GIS, shortest path, sediment yield.*

Giriş

Bir orman yolu ağının planlanması ekonomik ve çevresel kısıtlayıcılar nedeni ile çok zaman alıcı ve karmaşık bir işdir. Orman yollarının yapımı ve bakımı, orman ürünlerinin üretimi sürecinde en yüksek maliyete sahip aktivitelerdir (Akay ve Sessions, 2005). Ayrıca, yol güzergahından vejetasyonun kaldırılması nedeniyle, orman yolu yapımı orman yönetiminde yer alan diğer aktivitelerden daha fazla çevresel etkiye sebep olmaktadır (Grace, 2002). Orman yollarından akarsulara ulaşan sediment üretimi, su kaynakları ve suda yaşayan canlılar üzerinde dramatik zararlara neden olabilmektedir (Taylor vd., 1999; Wing vd., 2001). Bu nedenle, orman mühendisleri sadece yol yapım maliyetini en aza indiren değil aynı zamanda toplam sediment üretimini de azaltan yol güzergahları planlamalıdır.

Topografik haritalara dayalı geleneksel yol planlama yöntemleri, orman mühendislerinin yeterli sayıda alternatif yol güzergahlarını oluşturmasına izin vermemektedir (Chung ve Sessions, 2001). Optimum güzergahın seçilmesi sürecinde alternatifler değerlendirilemezse, mühendisler seçilen güzergahın çevresel etkileri en aza indiren en iyi yol olduğunu garanti edemezler. Ayrıca, yetersiz olarak planlanan yol güzergahları orman örtüsü ve toprak yapısı üzerinde zararlara neden olmakta ve bu durum akarsulara ulaşan potansiyel sediment üretimini arttırmaktadır (Grace, 2002).

Alternatif yol ağlarının planlamasında ve optimum güzergahın seçilmesinde, orman mühendislerine yardım etmek için modern optimizasyon tekniklerini ve CBS teknolojisinin ileri özelliklerini kullanan bilgisayar destekli çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Douglas ve Henderson (1987), yol yapım ve transport maliyetlerini dikkate alarak orman yolu ağı planlamak için bir model geliştirmiştir. Bu modelde, çalışma alanı eşit boyutlarda gridlere ayrılmış ve her bir gride kullanıcı tarafından belirlenmiş verilere (topografya, meşçere özellikleri, arazi mülkiyeti ve estetik) ait ağırlık değerleri atanmıştır. Daha sonra, grid değerleri kullanılarak yol yapım ve transport maliyetleri hesaplanmıştır. Ancak, yol ağının planlanmasında sediment üretimi gibi çevresel etkiler dikkate alınmamıştır.

Yol ağı alternatiflerini üretmek için, Tan (1999) tarafından bilgisayar destekli bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, transport ve yol yapım maliyetleri en az olan en iyi alternatifini seçmek

için En Kısa Yol algoritmasını (Shortest Path) ve CBS tekniklerini kullanmaktadır. Matematiksel optimizasyon tekniklerinden biri olan en kısa yol algoritmasında, bir ağdaki linklere uzaklık, maliyet ve zaman gibi değişik parametreler atanabilmektedir. Daha sonra, her bir linkin ağırlıklı değerinin toplamını en aza indiren yol linklerinin bulunması ile en kısa yol güzergahı araştırılmaktadır (Zhan, 1997). Sistemde, ormanlık alanlar aynı boyuttaki grid hücreler ile konumsal olarak temsil edilmiştir ve her bir hücreye transport ve yol yapım maliyetlerinin değerleri atanmıştır. Bu modelde, çevresel etkiler göz önüne alınmamıştır.

Chung ve Sessions (2001), alternatif güzergahların optimizasyon teknikleri ve CBS teknolojisi kullanarak üretildiği bir orman yolu ağı modeli geliştirmiştir. Model optimum yol ağını yol standartları, yol yapım ve transport maliyetleri, orman ürünü hacmi, üretim maliyeti ve arazi koşulları gibi çeşitli parametreleri dikkate alarak araştırmaktadır. Öncelikle ana ulaşım yolları, 25 m'ye 25 m Sayısal Arazi Modeli (SAM)'ne bağlı olarak, Genetik Algoritma yöntemi ile optimize edildikten sonra, tali yollar bu ana ulaşım yolları temel alınarak tasarlanmıştır. Genetik algoritmanın teorisi doğal seleksiyon mekanizmasına dayanmaktadır ve bu mekanizmada iyi çözümler kabul edilebilir çözümler (populasyon) arasından seçilerek yeni alternatif çözümler üretmek için "üstüne çaprazlama" ve "rastlantısal mutasyon faktörleri" yardımı ile bu iyi çözümler birleştirilmiştir (Beasley vd., 1993). Modern optimizasyon teknikleri ile CBS teknolojisini bütünleştiren bu modelde de yol ağının çevresel etkilerini en aza indirmek veya azaltmak amaçlanmamıştır.

Anderson ve Nelson (2004) da orman yolu ağları üreten bilgisayar destekli bir sistem geliştirmek için En Kısa Yol algoritmasını kullanmıştır. Bu sistem, önceden belirlenmiş yol planlama kısıtlayıcılarına bağlı olarak, rampa ile mevcut yol ağı arasındaki mesafeyi en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Sistemin performansını değerlendirmek için, bir test gerçekleştirilmiş ve yol uzunluğu, rampa aralığı ve yol eğimi gibi çeşitli kısıtlayıcıların etkisini incelemek için de duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar, rampalar arasındaki mesafelerin arttırılması ile yol ağının toplam uzunluğunun ve rampa sayısının azaldığını göstermiştir. Ancak, daha geniş rampa aralıkları sistemin toplam işlem zamanını arttırmıştır.

Yukarıda sunulan çalışmalar, çeşitli yol planlama ve üretim aktivitelerinin maliyetlerini en aza indirmek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Orman mühendislerine, orman yollarının çevresel etkilerini en aza indiren veya azaltan yol ağı alternatifini sağlamak amaçlanmamıştır. Ancak, son yıllarda, çevre dostu orman yollarının planlanmasına yönelik kamusal ve kurumsal platformlardan artan miktarda talepler gelmektedir. Bu çalışmada, söz konusu taleplere cevap vermek için, orman yollarının en önemli çevresel etkilerden biri olan sediment üretimi dikkate alınmıştır. Buna göre, yol planlama kısıtlayıcılarını dikkate alarak, yol ağından kaynaklanan toplam sediment üretimini en aza indiren optimum güzergahı bulmak amacı ile En Kısa Yol algoritmasını ve CBS tekniklerini uygulayan ağ analizi metodu kullanılmıştır. Metodun performansını göstermek için örnek bir çalışma bölgesinde basit bir yol ağı planı geliştirilmiştir.

Materyal ve Metodlar

Çalışma Alanı

10.8 ha büyüklüğünde bir çalışma alanı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Başkonuş Araştırma ve Uygulama Ormanından seçilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanının boyutları 240 m'ye 450 m'dir. Ortalama arazi yüksekliği ve yamaç eğimi sırası ile 962.9 m ve % 38.88'dir. Çalışma alanının konumsal veritabanı, 30 m grid hücreler esas alınmak üzere, yaygın bir CBS yazılımı olan Ilwis 3.2 Akademik (ITC, Enschede, Hollanda) kullanılarak üretilmiştir. Her bir grid hücresi, yol ağındaki bir tek yol seksiyonunu temsil etmektedir. Yıllık ortalama sediment ve yol maliyeti her bir grid hücresi için belirlenmiştir ve bu grid hücresi içinde yer alan yol seksiyonuna atanmıştır.

Araştırma ormanında genel olarak ilçeler arası yollar, ana orman yolları ve tali orman yolları ile ana ve yan akarsular vardır. Araştırma ormanında bulunan ağaç türleri *Pinus brutia*, *Pinus nigra*, *Cedrus libani*, and *Abies cilicica*'dır.

Sediment Tahmin Metodu

Yol ağından oluşan sediment üretimini hesaplamak için CBS tabanlı bir sediment tahmin modeli olan SEDMODL'in metodolojisi kullanılmıştır (Boise Cascade Corporation, 1999). Model, belirli erozyon faktörleri arasındaki deneysel ilişkilere ve Amerika Birleşik Devletleri'nin Washington, Oregon ve Idaho eyaletlerinde yer alan orman havzalarından seçilen orman yollarında yapılan arazi ölçümlerine bağlı olarak geliştirilmiştir (WDNR 1995). Bu nedenle, değişik iklim rejimlerine, topografik özelliklere ve toprak karakterlerine sahip diğer alanlarda modeli kullanırken, modelden elde edilen sonuçlar lokal şartlarla karşılaştırılmalıdır.

Modelde, her bir yol seksiyonundan oluşan toplam sediment üretimi yol yüzeyi sedimenti ve kazı şevi sedimenti dikkate alınarak tahmin edilmektedir. Yol yüzeyinden oluşan sediment; jeolojik erozyon oranı, yol yüzey kaplaması faktörü, trafik faktörü, yol uzunluğu, yol genişliği, yol eğimi faktörü, yağış faktörü ve sediment ulaştırma faktörü gibi erozyon faktörlerinin değerlerinin birbirleri ile çarpılması ile hesaplanmaktadır. Kazı şevinden oluşan sediment; jeolojik erozyon oranına, yol uzunluğuna, sediment ulaştırma faktörüne, kazı şevi koruma örtüsü faktörüne ve kazı şevi yüksekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yolun inşa edildikten sonra geçen zamanın toplam sediment üretimi üzerindeki etkisini dikkate almak için toplam sediment miktarı zaman faktörü ile çarpılmaktadır. Modelde, yolun inşa edildiği ilk yıl için zaman faktörü değeri 10, ikinci yıl için 2 ve 2 yıldan sonrası için 1 olarak kabul edilmiştir (Luce ve Black, 1999).

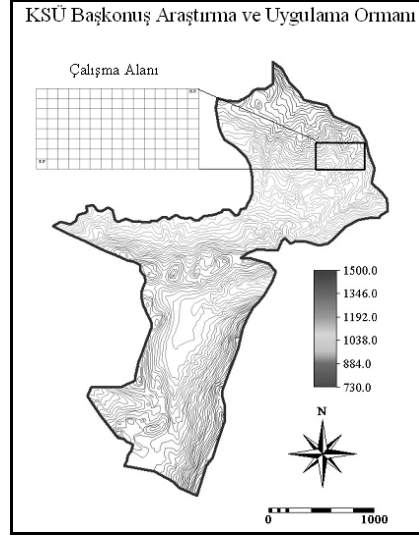
Erozyon faktörlerinin değerleri model tarafından sağlanan tablolarda verilmiştir (Boise Cascade Corporation, 1999). Ana kaya ve bölgesel yağış, bir yol seksiyonundan oluşan potansiyel sediment üretimi üzerinde çok etkili olabilmektedir (WFPB 1997; Luce ve Black 1999). Model, daha önceden gerçekleştirilen çalışmalara bağlı olarak, yaygın ana kayalar için jeolojik erozyon oranlarını sunmuştur (Foltz 1996). Reid (1981), yağış faktörünü (Y_f) hesaplamak için mm olarak yıllık ortalama yağışa (Y_{ort}) bağlı aşağıdaki formülü geliştirmiştir:

$$Y_f = \left(\frac{Y_{ort}}{1524} \right)^{0.8} \quad (1)$$

Y_f : yağış faktörü

Y_{ort} : yıllık ortalama yağış (mm)

Her bir yol seksiyonu için yıllık ortalama yağış faktörü, Kahramanmaraş şehrinde yer alan en yakındaki meteoroloji istasyonuna ait yükseklik ve meteoroloji verilerini temel alan enterpolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Özyuvacı, 1999). Bu yöntemde, yükseklikteki 100 m artış için yıllık ortalama yağış 54 mm artmaktadır. Yol yüzeyi kaplamasının kalitesi, trafik yoğunluğu ve yol



Şekil 1. Araştırma ormanının topografik haritası ve çalışma alanı

eğimi de yol seksiyonlarından akarsulara ulaşan sediment üretimini etkilemektedir (Reid ve Dunne 1984; Luce ve Black 1999). Yol yüzeyi kaplaması kalitesinin artırılması sediment üretimin azaltmaktadır (Foltz, 1999). Yaygın yol yüzeyi kaplaması tipleri için modelin elkitabında sunulan yol yüzeyi kaplaması faktörleri (Örnek olarak; asfalt kaplama için 0.03, stabilize kaplama için 0.2, ham yol için 1.0) gözleme dayalı arazi çalışmalarına bağlı olarak geliştirilmiştir (Foltz ve Burroughs 1990; WDNR, 1995). Yol kullanımının sediment üretimi üzerindeki etkisi modelde trafik faktörü olarak tanımlanmıştır (Örnek olarak; ana orman yolu için 10, tali yol için 2.0, ham yol için 1.0). Bir yol seksiyonu için trafik faktörü, yolun tipi, günlük ortalama yol kullanımı ve yolun genişliği dikkate alınarak belirlenmiştir (Boise Cascade Corporation, 1999). Yol eğiminin sediment üretimi üzerindeki etkisi eğim sınıflarına göre yol eğimi faktörü olarak belirlenmiştir. Modelin elkitabında, %5'den az, %5-10 arasında ve %10'dan daha dik yol eğimleri için yol eğimi faktörleri sırasıyla 0.2, 1.0 ve 2.5'dir (Reinig vd., 1991).

Kazı şevlerinden oluşan sediment üretimi miktarı, daha çok kazı şevi koruma örtüsüne, kazı şevi yüksekliğine ve akarsulara olan uzaklıklara göre değişmektedir. Model, kazı şevi koruma örtüsü faktörünü kazı şevlerindeki bitki örtüsü veya kaya ile kaplı alanların yüzdesine (Örnek olarak; %60 kazı şevi koruma örtüsü için 0.3116, %80 için 0.2003, %100 için 0.1023) bağlı olarak belirlemiştir (WDNR, 1995). Modelde kazı şevi yükseklikleri yamaç eğimi sınıflarının bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır (Örnek olarak; %15'den düşük yamaç eğimi için 0.75, %15-30 için 1.5, %30-60 için 3.0 ve %60'dan yüksek yamaç eğimi için 7.5). Kazı şevi yüksekliğinin artması sediment üretimi miktarını arttırmaktadır (Luce ve Black, 1999).

Yollarla akarsular arasındaki mesafe arttıkça sedimentin büyük bir kısmı orman yüzeyinde tutulmakta ve akarsulara ulaşmamaktadır (Ouyang ve Bartholic, 1997). Modelde, akarsulara olan uzaklığının sediment üretimi üzerindeki etkisi sediment ulaştırma faktörü olarak tanımlanmıştır. Sediment ulaştırma faktörünü temsil etmek için akarsulara olan uzaklıklar üç sınıfta kategorize edilmiştir (Akarsu geçişleri için sediment ulaştırma faktörü 1, akarsudan 30 m uzaklığa kadar 0.35, ve 30-60 m uzaklık için 0.10). Akarsulardan çok daha uzak mesafelerdeki (60 m'den daha fazla) yol seksiyonlarından oluşan sediment üretiminin tamamen orman yüzeyinde tutulduğu kabul edilmiştir.

Ağ Analizi Metodu

Maksimum yol eğimi kısıtlayıcısını dikkate alarak, sediment üretimi en az olan optimum orman yolu ağını seçmek için En Kısa Yol algoritmasını uygulayan ağ analizi metodu kullanılmıştır. Bu metotta, bir yol seksiyonun veya birbirini takip eden iki kesişme noktasını birleştiren yol seksiyonu kombinasyonunun eğiminin, önceden belirlenmiş “maksimum yol eğimini” aşamayacağı kabul edilmiştir. Ayrıca, yol ağı boyunca her hangi bir yol seksiyonunun uzunluğu, uygun yüzeysel drenaj sağlamak amacı ile önceden belirlenmiş “maksimum yol seksiyonu uzunluğunu” geçmemektedir. Modelde karmaşıklığı önlemek amacı ile yol ağını seçerken grid hücreleri arasında çapraz hareketler kısıtlanmıştır. Optimum yol ağı için amaç fonksiyonu aşağıdaki formülde sunulmuştur:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N S_i \quad (2)$$

Kısıtlayıcılar: $g_i \leq g_{max}$ and $L_i \leq L_{max}$

- i : Yol seksiyonu
 N : Yol seksiyonlarının sayısı
 S_i : Yol seksiyonunda oluşan sediment üretimi (ton/m²)
 g_i : Yol seksiyonunun eğimi (%)
 L_i : Yol seksiyonunun uzunluğu (m)
 g_{max} : Maksimum yol eğimi (%)
 L_{max} : Maksimum yol seksiyonu uzunluğu (m)

Sediment üretimi en az olan optimum yol ağının yapım maliyeti, birim maliyetler, yol seksiyonu uzunlukları ve yamaç eğimi gibi veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Arazi koşullarının etkisini dikkate almak için yol yapım maliyeti yamaç eğimi faktörü ile çarpılmıştır. Chung ve Sessions (2001)'in yol yapım maliyetleri için önerdiği yamaç eğimi faktörleri kullanılmıştır (Tablo 1).

Yukarda belirtilen yol planlama kısıtlayıcılarını dikkate alarak, toplam maliyeti en az olan alternatif yol ağı aşağıdaki amaç fonksiyonuna bağlı olarak belirlenmiştir:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N C_i S F_i L_i \quad (3)$$

bu formülde yer alan $S F_i$ ve C_i sırası ile yamaç eğimi faktörünü ve yol yapım maliyetini (\$/m) temsil etmektedir. Daha sonra, bir yol ağından akarsulara ulaşan sediment üretimini en aza indirmenin maliyetini belirlemek için hem optimum hem de alternatif yol ağının toplam yol maliyetleri ve toplam sediment üretimleri hesaplanmıştır.

Tablo 1. Yamaç eğimi sınıfları için yamaç eğimi faktörleri (Chung ve Sessions, 2001)

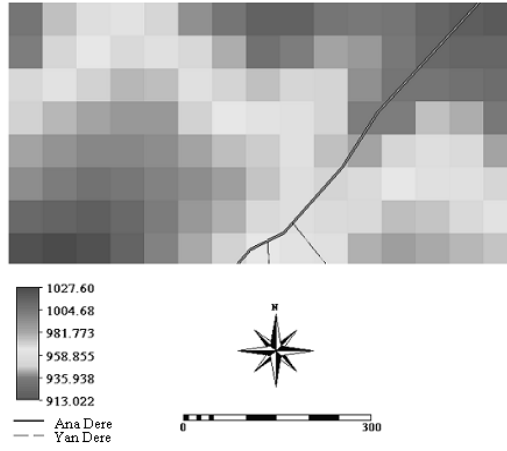
Yamaç Eğimi (%)	Yamaç Eğimi Faktörü
< 20	1.0
20 – 30	1.5
30 – 40	3.0
40 – 50	6.0
> 50	12.0

Bulgular ve Tartışma

Sediment Üretiminin Hesaplanması

Yol ağından oluşan sediment üretimini hesaplamak için, çalışma alanı için belirtilmiş erozyon faktörlerinin CBS veri katmanları (30 m'ye 30 m) geliştirilmiştir. Ilwis 3.2 Akademik'deki "Sub-map" fonksiyonu kullanılarak, çalışma alanının jeoloji veri katmanı 1:100 000 ölçekli Kahramanmaraş'ın jeoloji haritası temel alınarak sureti ile üretilmiştir. Çalışma alanındaki jeolojik çağ ve litoloji kombinasyonunun Mezozoik/Sert Sediment olduğu bulunmuştur. SEDMODL elkitabında, bu kombinasyon için jeolojik erozyon oranı hektarda 37 ton olarak sunulmuştur.

Çalışma alanının Sayısal Arazi Modeli ve akarsu katmanı araştırma ormanının 1:25 000 ölçekli topografik haritası temel alınarak geliştirilmiştir (Şekil 2). Daha sonra, yağış faktörü haritası Özyuvacı'nın (1999) enterpolasyon yönteminin Ilwis 3.2 Akademik'deki "Map Calculation" fonksiyonunda uygulanması ile üretilmiştir. Sayısal Arazi Modeli temel alınarak, grid hücreleri



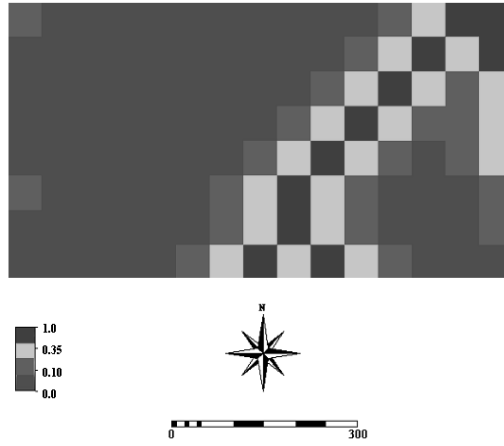
Şekil 2. Çalışma alanına ait Sayısal Arazi Modeli (m) ve dere veri katmanı

arasındaki yol eğimi "Map Calculation" fonksiyonu ile hesaplanmıştır ve daha sonra her bir grid hücresi için yol eğimi faktörünü temsil eden CBS katmanı üretilmiştir. Kazı şevi yüksekliğini belirlemek için yamaç eğimi veri katmanı, "Filtering", "Map Calculation" ve "Conditional IFF" fonksiyonları kullanılarak geliştirilmiştir. Akarsu katmanı üzerine üç ayrı tampon kuşağı (0-30 m, 30-60 m ve 60 m'den uzak) yerleştirilerek, sediment ulaştırma faktörü için ayrı bir katman üretilmiştir. Akarsu katmanı üzerinde bu tampon kuşaklarını oluşturmak için "Distance Calculation" ve "Conditional IFF" fonksiyonları kullanılmıştır (Şekil 3). Her bir erozyon faktörü için CBS veri katmanı oluşturulduktan sonra, "Map Calculation" fonksiyonunu kullanarak yol ağından oluşan ortalama sediment üretimini temsil eden bir nihai CBS katmanı üretilmiştir.

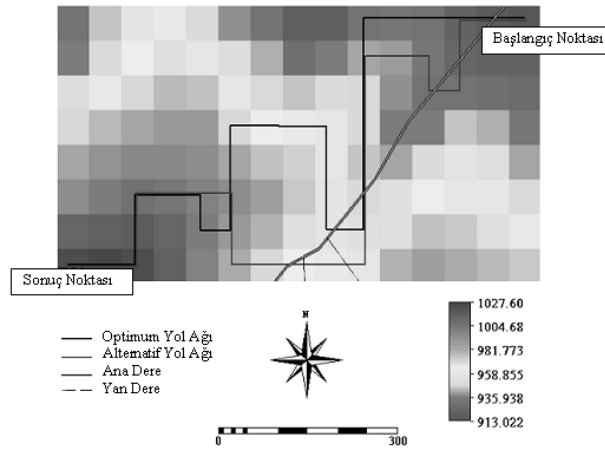
Yol Ağının Planlanması

Her bir grid hücresinden oluşan sediment üretimi hesaplandıktan sonra ağ analizi metodu kullanılarak optimum ve alternatif yol ağları belirlenmiştir (Şekil 4). Ağdaki yollar, stabilize yüzey kaplamasına ve %60 kazı şevi koruma örtüsüne sahip tali orman yollarıdır. Maksimum yol eğimi ve yol seksiyon uzunluğu sırası ile %16 ve 150 m olarak seçilmiştir. Yamaç eğimi faktörü devre dışı bırakıldığında, yol yapım aktivitelerinin birim maliyeti \$31.25/m olarak tahmin edilmiştir.

Optimum yol ağından oluşan yıllık ortalama sediment üretimi 6.93 ton (7.70 ton/km) olarak bulunmuştur. 14 yol seksiyonu ve 30 grid hücresi içeren optimum yolun uzunluğu 900 m'dir. Yol ağında, 17 grid hücresi içeren 7 yol seksiyonundan akarsulara sediment ulaşımı gerçekleşmemiştir. Yamaç eğimi faktörü dikkate alındığında, toplam yol yapım maliyeti \$83 817 olarak bulunmuştur.



Şekil 3. Dere çevresinde oluşturulan tampon kuşaklara bağlı olan sediment ulaştırma faktörleri



Şekil 4. Ağ analizi yöntemi ile geliştirilen optimum ve alternatif yol ağları

Yol yapım maliyeti en az olan alternatif yol ağı Şekil 4'te gösterilmiştir. Yol ağı boyunca yamaç eğimi faktörü dikkate alındığında, toplam yol yapım maliyeti \$61 160 olarak bulunmuştur. 14 yol seksiyonu ve 28 grid hücresi içeren alternatif yolun uzunluğu 840 m'dir. Yol ağından oluşan yıllık ortalama sediment üretimi 10.08 ton (12.00 ton/km) olarak bulunmuştur. Yol ağında, 10 grid hücresi içeren 4 yol seksiyonu akarsulara sediment ulaştırmamıştır.

Sonuçlar, alternatif yol ağının yapım maliyetinin optimum yol ağının maliyetinden %27 daha az olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, alternatif yol ağından üretilen sediment miktarı optimum yol ağından üretilen miktardan %46 daha fazladır. Aynı zamanda sediment üretimini en aza indirmenin maliyetinin \$22 657 olduğu bulunmuştur. Alternatif yol ağı ile optimum yol ağından oluşan sediment miktarı arasındaki fark yaklaşık 4.30 ton/km olduğuna göre, sediment üretiminin en aza indirmenin birim maliyeti yaklaşık \$4.72/ton-km olarak bulunmuştur.

Sediment üretimini etkileyen ana erozyon faktörleri; yol eğimi, yamaç eğimi ve sediment ulaştırma faktörleridir. Sonuçlar, ortalama yol eğiminin optimum yol ağında %9.8, alternatif yol ağında ise %10.8 olduğunu göstermiştir. Önceki çalışmalara göre yol eğiminin %10 artırılması sediment üretimini önemli derecede arttırmaktadır (Luce ve Black, 1999). Alternatif yol ağı boyunca ortalama yamaç eğimi %28.29'iken optimum yol ağı boyunca yamaç eğiminin %33.5 olduğu bulunmuştur. Ouyang ve Bartholic (1997) de yamaç eğimindeki artışın yol ağından akarsulara ulaşan sediment miktarını arttırdığını bildirmiştir. Ancak, alternatif yol ağındaki ortalama yamaç

eğiminin optimum yol ağındaki yamaç eğiminden az olduğu bulunmuştur. Bu sonucun nedeni, yamaç eğiminin yol yapım maliyeti üzerindeki en önemli faktör olmasıydı. Bu yüzden, alternatif yol ağının planlanmasında, ağ analizi metodu yamaç eğimi düşük olan grid hücrelerini seçmiştir. Ayrıca, alternatif ve optimum yol ağı için ortalama sediment ulaştırma faktörlerinin sırası ile 0.36 ve 0.24 olduğu bulunmuştur.

Sonuçlar

Ekonomik, sosyal ve güvenlik şartlarını dikkate alan bilgisayar destekli yol planlama sistemleri, orman mühendislerinin çok sayıda yol ağını süratle değerlendirmesine imkan sağlamaktadır. Ancak, bu sistemler orman yollarının neden olduğu çevresel zararları azaltmaya ve hatta en aza indirmeye yönelik artan taleplere cevap verememektedir. Bu çalışma, orman yollarının çevresel zararlarının en önemlilerinden olan sediment üretimini en aza indiren bir orman yolu ağını planlamak için bir metodoloji geliştirilmiştir. Optimum yol ağını seçmek için CBS teknikleri ile bütünleştirilen ağ analizi metodu kullanılmıştır.

Basit uygulamanın sonuçları, En Kısa Yol algoritmasını kullanan ağ analizi metodunun sediment üretiminde önemli ölçüde azalma sağladığını göstermiştir. Sediment kısıtlayıcısını dikkate almadan yol yapım maliyeti en az olan alternatif yol ağlarını planlayarak, optimum yol ağından akarsulara ulaşan sedimentin azaltılmasının maliyeti hesaplanmıştır. Sedimentteki azalmanın birim maliyetinin tahmin edilmesi, orman mühendislerinin yol ağlarının planlamasında daha etkili yönetim kararları vermesi için çok yararlı olabilir. Metodolojinin verimliliğini arttırmak için diğer bazı optimizasyon tekniklerinin performansları değerlendirilmelidir. Geliştirilecek metodoloji, grid hücreleri arasında çapraz hareketleri, ilave planlama kısıtlayıcılarını (kurlar) ve diğer maliyet bileşenlerini (ulaşım ve bakım maliyetleri) dikkate almalıdır.

Kaynaklar

- Akay, A.E. and Sessions, J., 2005. Applying The Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design. *Western Journal of Applied Forestry*. **20**(3), 184-191.
- Anderson, A.E. and Nelson, J.D., 2004. Projecting vector based road networks with a shortest path algorithm. *Can. J. For. Res.* **34**(7), 1444-1457.
- Beasley, J., Dowland, K., Glover, F., Manuel, L., Peterson, C., Reeves, C., and Soderberg, B., 1993. Modern heuristic techniques for combinatorial problems. Halsted Press, John Wiley and Sons, Inc. New York. 320 p.
- Boise Cascade Corporation, 1999. SEDMODL-Boise Cascade road erosion delivery model. Technical documentation. 19 p.
- Chung, W. and Sessions, J., 2001. Designing a forest road network using heuristic optimization techniques. *In Proceedings of the 24th Meeting of the Council of Forest Engineering*, July 15-19, Snowshoe, West Virginia.
- Douglas, R.A. and Henderson, B.S., 1987. Computer assisted forest road route location. High Technology in Forest Engineering. *Proceedings of the Council of Forest Engineering, 10th Annual Meeting*, Syracuse, New York. pp. 201-217.
- Foltz, R. B. and Burroughs, E.R. Jr., 1990. Sediment Production from Forest Roads with Wheel Ruts. In: *Watershed Planning and Analysis; Proceedings of a Symposium*, July 9-11 1989, Durango CO. ASCE, pp. 266-275.
- Foltz, R.B., 1996. Traffic and No-Traffic on an Aggregate Surfaced Road: Sediment Production Differences. Paper presented at *Food and Agriculture Organization seminar on Environmentally Sound Forest Road and Wood Transport*, Sinaia, Romania.
- Foltz, R. B., 1999. Traffic and no-traffic on an aggregate surfaced road: Sediment production-differences, paper presented at *Seminar on environmentally sound forest roads and wood transport*, Food and Agric. Organ., Rome, Italy.

- Grace, J.M., III., 2002. Control of sediment export from the forest road prism, *ASAE Annual Meeting*. Paper No. 995048. Vol. **45**(4), 1-6.
- Luce, C.H. and Black, T.A., 1999. Sediment Production from Forest Roads in Western Oregon. *Water Resources Research*. **35**(8), 2561–2570.
- Ouyang, D. and Bartholic, J., 1997. Redicting sediment delivery ratio in Saginaw Bay Watershed. *The 22nd National Association of Environmental Professionals Conference Proceedings*. May 19-23, 1997, Orlando, FL. pp. 659-671.
- Ozyuvaci, M., 1999. Meteoroloji ve Klimatoloji. İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yayın No: 460.
- Reid, L.M., 1981. Sediment Production from Gravel-surfaced Forest Roads, Clearwater Basin, Washington. M.S. Thesis, University of Washington.
- Reinig, L., Beveridge, R.L., Potyondy, J.P., and Hernandez, F.M., 1991. BOISED user's guide and program documentation. USDA Forest Service, Boise National Forest. 12 p.
- Tan, J., 1999. Locating forest roads by a spatial and heuristic procedure using microcomputers. *Journal of Forest Engineering*. **10** (2), 91-100.
- WDNR, 1995. Standard Methodology for Conducting Watershed Analysis, Version 3.0. Washington Forest Practices Board.
- WFPB, 1997. Washington Forest Practices Board Manual: Standard Methodology for Conducting Watershed Analysis Version 4.0.
- Zhan, F.B., 1997. Three fastest shortest path algorithms on real road networks: Data structures and procedures. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. **1**, 70-82.