



Karayolu Mühendisliği: Bir Tasarım Yolculuğu

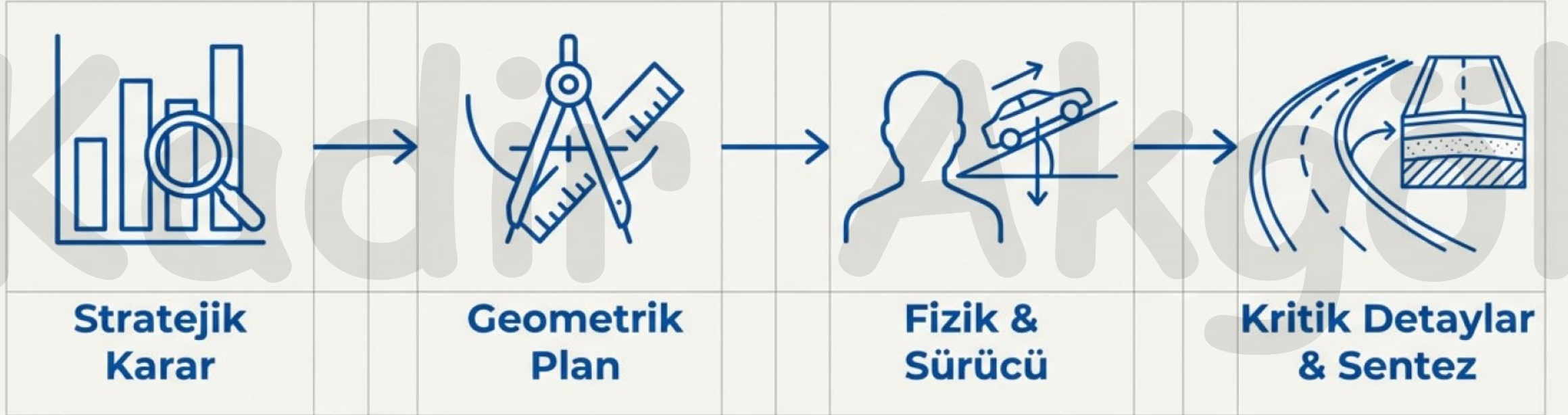
Fikirden Gerçeğe Bir Mühendisin Proje Rehberi



Dr. Öğr. Üyesi Kadir AKGÖL

Tasarım Yolculuğumuzun Aşamaları

Bir karayolu projesi, bir dizi temel mühendislik sorusuna cevap vererek katman katman inşa edilir. Bu sunumda, bir fikrin nasıl somut bir yola dönüştüğünü dört ana aşamada inceleyeceğiz.



Nereden Geçmeli?

3 Boyutlu Yol Nasıl Çizilir?

Tasarımda Neler Dikkate Alınır?

Güvenli Sürüş Nasıl Sağlanır?

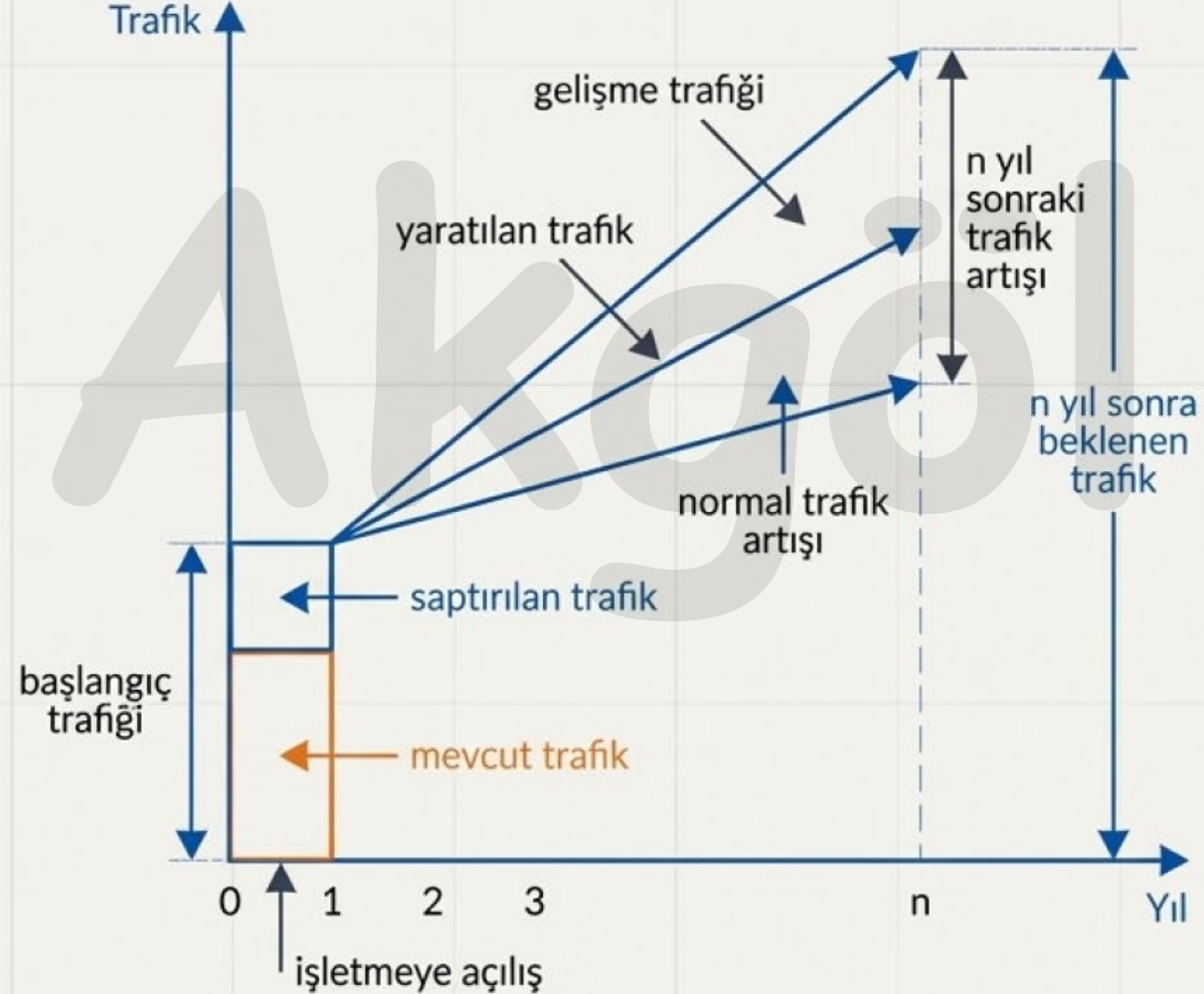
1. Aşama: Bu Yola Neden İhtiyaç Var?

Trafik Tahmini

Her karayolu projesi bir ihtiyaçla başlar. Temel amaç, mevcut ve gelecekteki trafik talebini karşılamaktır. "Beklenen Trafik", projenin hizmet vereceği gelecekteki (genellikle 20 yıl sonraki) talebi ifade eder ve projenin geometrik standartlarını belirler.

Beklenen Trafik Bileşenleri

- **Başlangıç Trafığı:** Yolun açıldığı ilk gün oluşacak trafik.
 - **Mevcut Trafik:** İyileştirme öncesi var olan trafik.
 - **Saptırılan Trafik:** Çevredeki yollardan yeni yola kayan trafik.
- **Trafik Artışı:** Zamanla oluşacak ek trafik.
 - **Normal Trafik Artışı:** Nüfus ve taşıt sahipliğindeki artıştan kaynaklanır.
 - **Yaratılan Trafik:** Yolun sağladığı kolaylık sayesinde yeni yolculukların ortaya çıkması.
 - **Gelişme Trafığı:** Yolun geçtiği bölgedeki sanayi ve ticaret gelişiminin tetiklediği trafik.



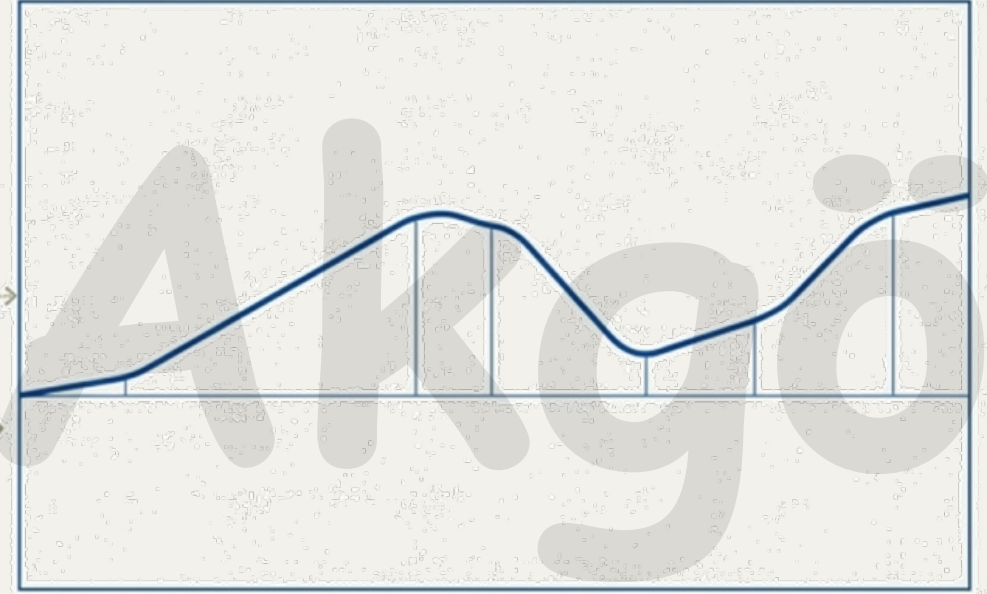
2. Aşama: Yolun 3 Boyutlu İskeletini Tanımlamak

Bir karayolunun tasarımı, onun arazideki üç boyutlu konumunu tanımlamakla başlar. Bu, iki temel çizimle ifade edilir: Plan ve Boykesit. Bu iki görünüm, yolun geometrik iskeletini oluşturur.



Kuşbakışı
Görünüş

Yandan
Görünüş



Plan (Yatay İzdüşüm): Yolun kuşbakışı görünümüdür.

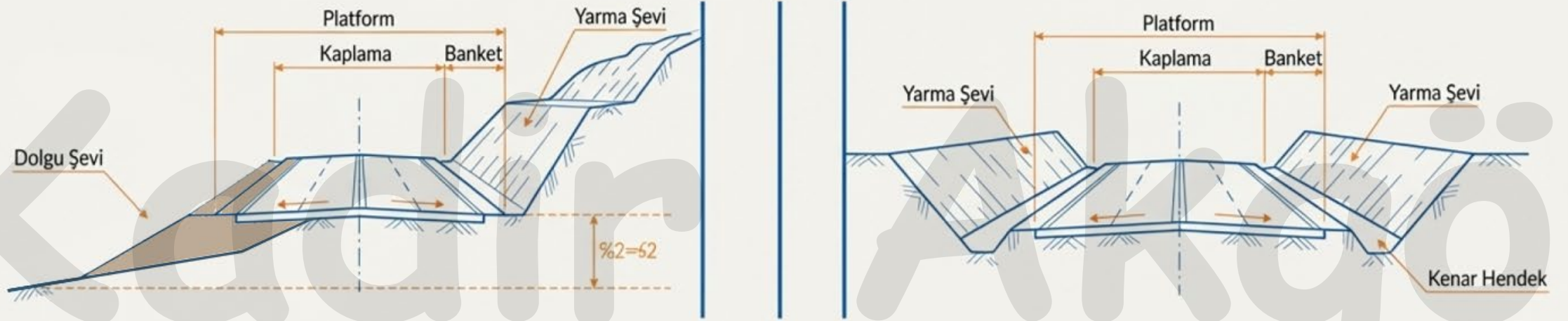
- Ariyman: Plandaki düz kısımlar.
- Yatay Kurp: Plandaki virajlar (dönemeçler).

Boykesit (Düşey İzdüşüm): Yolun yandan görünümüdür. Yükseklik değişimlerini gösterir.

- Rampa: Boykesitteki belirli bir eğime sahip düz kısımlar.
- Düşey Kurp: Farklı eğimdeki rampaları birleştiren eğriler.

Sentez: Tüm Kararların Enkesitte Buluştuğu An

Başlangıçtaki trafik tahmininden, en karmaşık kurp hesaplarına kadar aldığımız her mühendislik kararı, yolun nihai fiziksel formu olan 'Enkesit'te hayat bulur. Enkesit, yolun belirli bir noktadaki karşıdan görünümüdür ve projenin tüm DNA'sını içerir.



Enkesit Neleri Yansıtır?

- **Platform Genişliği:** Trafik hacmi ve yol sınıfı belirler.
- **Kaplama ve Banketler:** Üstyapı tasarımı ve güvenlik standartlarını yansıtır.
- **Enine Eğim (Dever):** Yatay kurp tasarımının bir sonucudur. Aliymanda %2 çatı eğimi, kurpta ise hesaplanan dever değeri görülür.
- **Yarma/Dolgu Şevleri:** Yolun kırmızı kotunun doğal araziye (siyah kot) göre konumunu ve toprak işleri miktarını belirler.
- **Hendekler:** Drenaj tasarımını gösterir.

Bir karayolu, sadece bir asfalt şeridi değil; fizik, geometri, ekonomi ve insan faktörlerinin dikkatli bir senteziyle oluşturulmuş, yaşayan bir mühendislik yapısıdır.

3. Aşama: Tasarımı Şekillendiren Gerçekler - Sürücü ve Fizik

Geometrik iskelet, gerçek dünya fiziği ve insan faktörleri ile şekillendirilir. Tasarımın en önemli amacı, sürücülerin ve araçların fiziksel sınırları içinde güvenli ve konforlu bir yolculuk sağlamaktır.

İnsan Faktörü: İntikal (Reaksiyon) Süresi

Tanım: Bir sürücünün tehlikeli bir durumu fark etmesi, karar vermesi ve harekete geçmesi (örneğin frene basması) arasında geçen süredir. Genellikle 1-2.5 saniye arasında değişir ve güvenli mesafelerin hesaplanmasında kritik bir rol oynar.

Problem: Hareket halindeki bir araç anında duramaz.

Çözüm: Duruş Görüş Uzunluğu (DGU)

- **Amaç:** Bir sürücünün, yol üzerindeki bir engeli fark edip, ona çarpmadan güvenli bir şekilde durabilmesi için gereken minimum mesafeyi sağlamak.
- **Bileşenleri:** Reaksiyon Uzunluğu (L_r) + Fren Uzunluğu (L_f)

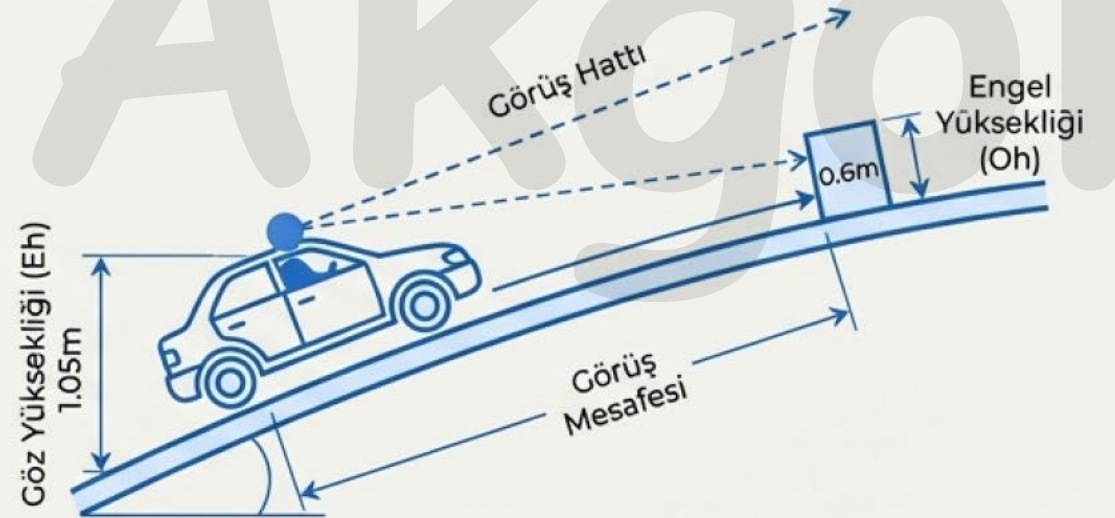
$$L_{dd} = L_r + L_f = 0,278 \cdot V \cdot t_r + \frac{0,00394 \cdot V^2}{f \mp s}$$

V: Hız (km/sa)

t_r : İntikal süresi (sn)

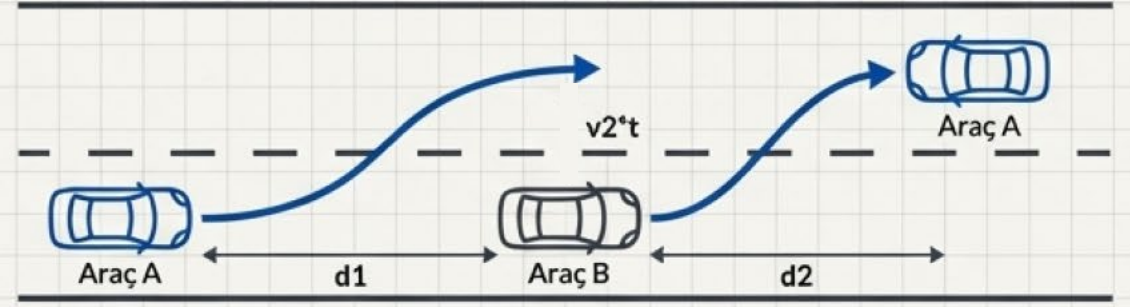
f: Sürtünme katsayısı

s: Eğim (%)



İleri Seviye Güvenlik: Sollama İçin Geçiş Görüş Uzunluğu

Bölünmemiş yollarda güvenliğin en kritik unsurlarından biri, sürücülerin önlerindeki yavaş araçları karşıdan gelen trafiği tehlikeye atmadan sollayabilmesidir. Bu senaryo için gereken mesafe “Geçiş Görüş Uzunluğu” olarak adlandırılır.



Amaç:

Bir aracın, önündeki daha yavaş bir aracı güvenli sollayıp kendi şeridine dönmesi için gereken toplam yol mesafesini hesaplamak.

Temel Formülasyon (Karşıdan Araç Gelmemesi Durumu)

$$l_g = \frac{v_1 \cdot (d_1 + d_2)}{v_1 - v_2}$$

v1: Sollayan aracın hızı (m/sn)

v2: Sollanan aracın hızı (m/sn)

d1, d2: Araçlar arası takip mesafeleri (m)

Uygulama: Pratikte Nasıl Çalışır?

Senaryo: 90 km/sa hızla giden A aracı, 60 km/sa hızla giden B aracını sollamak istiyor.

Takip Mesafeleri: $d_1 = 35\text{m}$, $d_2 = 26\text{m}$

Gerekten Güvenli Mesafe: $l_g = \frac{90 \cdot (35 + 26)}{90 - 60} = 183 \text{ m}$

Sollama Süresi: $t_s = 7,32 \text{ sn}$

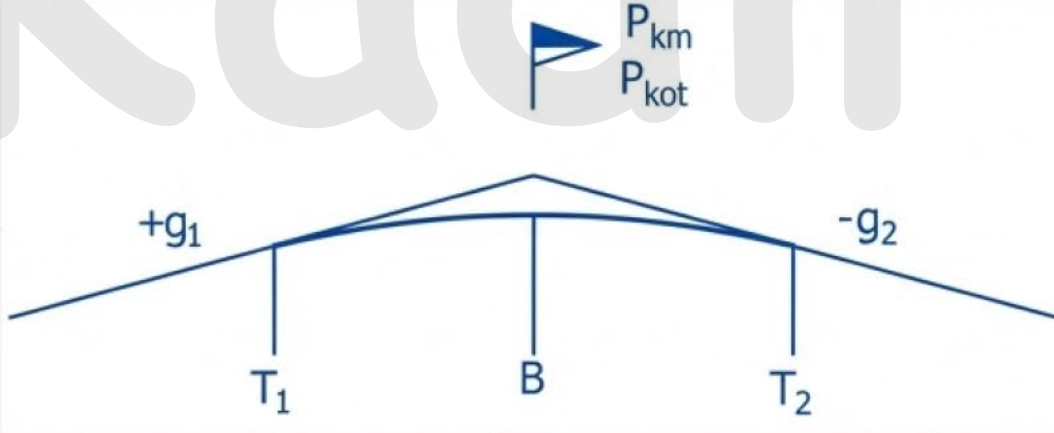
4. Aşama: Düşeyde Akıcılık Sanatı - Tepe ve Dere Kurpları

Yolun boykesitinde farklı eğimlere sahip rampalar keskin bir şekilde birleşemez. Bu, hem sürüş konforunu bozar hem de tepe noktalarında görüşü engelleyerek tehlike yaratır. Çözüm, bu birleşim noktalarına '**Düşey Kurp**' adı verilen parabolik eğriler yerleştirmektir.

Amaç: Taşıtların ani düşey ivmelere maruz kalmasını önlemek ve özellikle tepe noktalarında yeterli görüş mesafesini sağlamak.

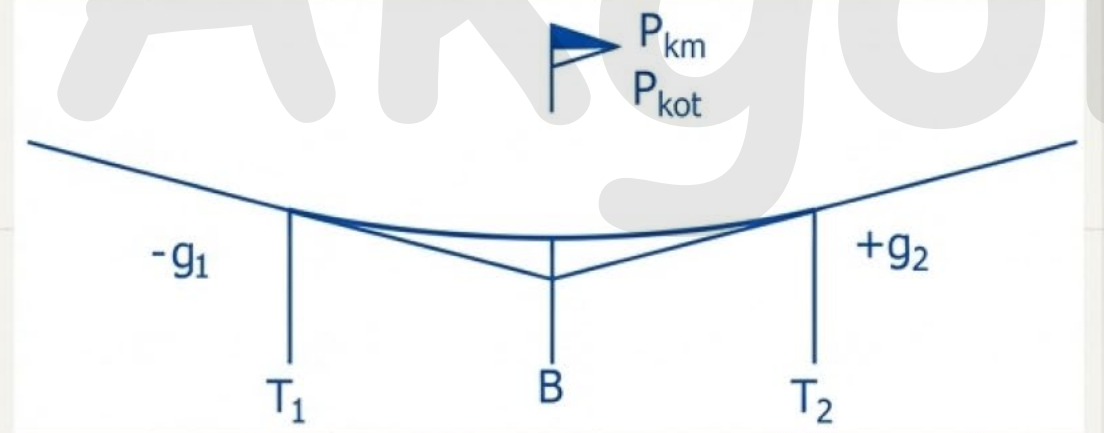
1. Tepe (Kapalı) Düşey Kurp

Some noktası eğrinin üzerindedir. Temel tasarım kriteri **görüş uzunluğudur**. Sürücünün tepenin ardını görebilmesi gerekir.



2. Dere (Açık) Düşey Kurp

Some noktası eğrinin altındadır. Temel tasarım kriterleri **konfor, estetik ve drenajdır**.



Tasarım Prensipleri

Birbirini izleyen iki kolun eğimleri arasındaki cebirsel fark belirli bir limiti (örneğin %0,5) aşıyorsa düşey kurp uygulaması zorunludur.

Tepe Kurplarının Tasarımı: Her Şey Görüş Mesafesi İçin

Tepe düşey kurplarının tasarımında en kritik parametre, kurp boyudur (L). “L” değeri, sürücüye sağlanması gereken **minimum görüş uzunluğuna** (S) bağlı olarak hesaplanır. “S” değeri, bölünmüş yollarda “**Duruş Görüş Uzunluğu**”, bölünmemiş yollarda ise daha uzun olan “**Geçiş Görüş Uzunluğu**” olarak alınır.

Hesaplama (Bölünmemiş Yollar İçin)

Durum 1: $S < L$ (Görüş mesafesi kurp içinde kalıyorsa)

$$L = \frac{G \cdot S^2}{10}$$

Durum 2: $S > L$ (Görüş mesafesi kurptan taşıyorsa)

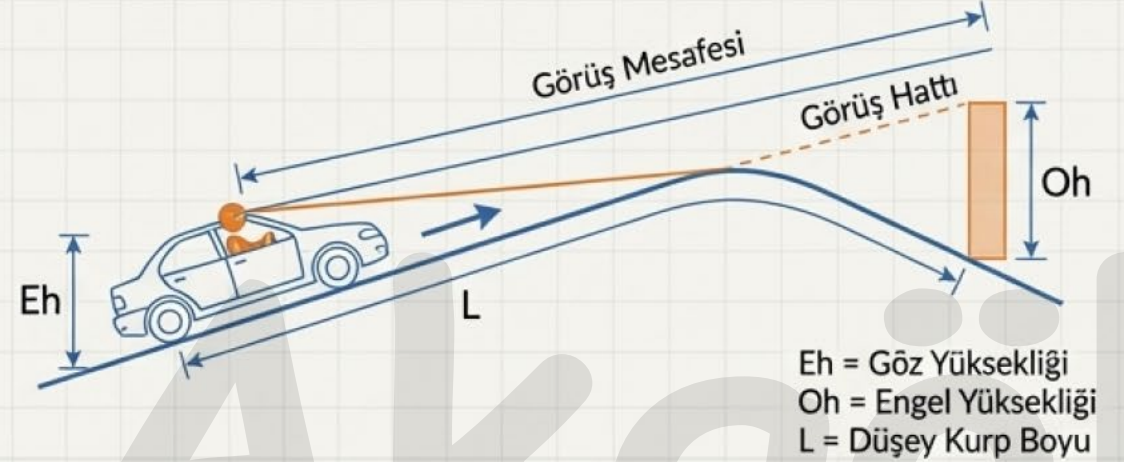
$$L = 2S - \frac{10}{G}$$

L: Düşey kurp boyu (m)

S: Gerekli görüş uzunluğu (m)

G: İki kolun eğimleri arasındaki cebirsel fark (örneğin, $g_1 - g_2$)

Pratik Not: Hesaplanan L değeri, yolun sınıfına göre belirlenen minimum değerlerden (örn: Devlet yollarında 120m) küçük olamaz. Bu, güvenliği her zaman önceliklendirir.

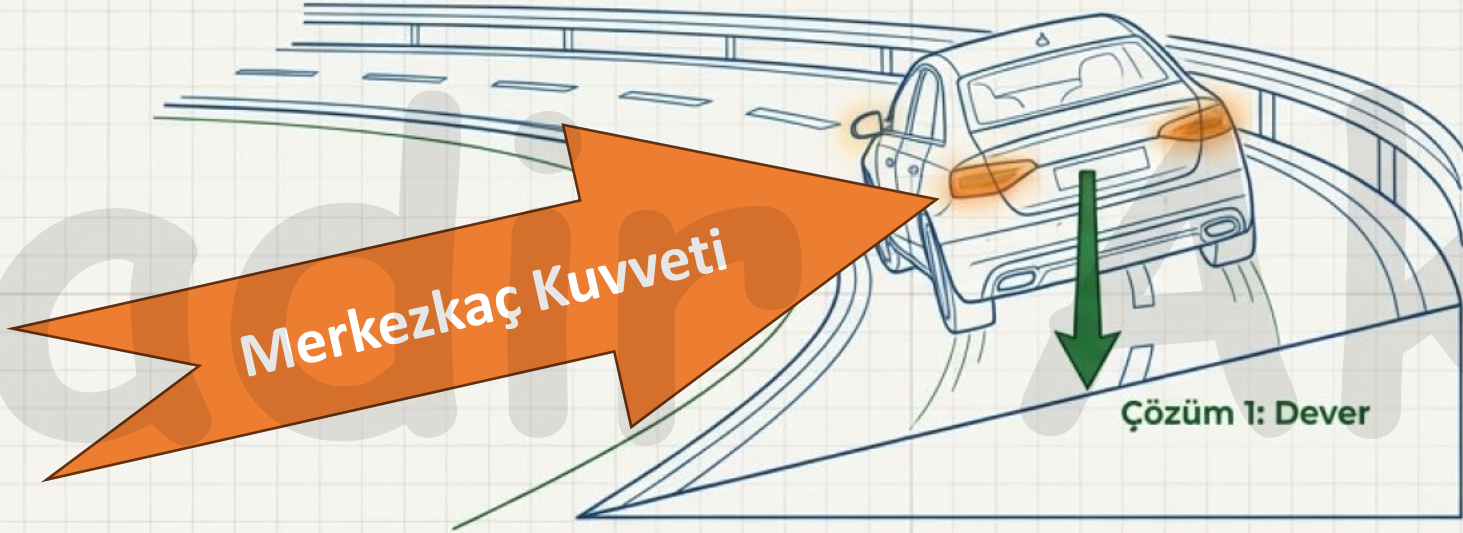


Amaç:

Minimum kurp boyunu (L) belirleyerek, gerekli görüş mesafesini (S) sağlamak.

Yatayda Güvenlik ve Konfor: Virajlarla Başa Çıkmak

Düz bir yoldan (aliyman) viraja (yatay kurp) giren araç, **merkezkaç kuvvetinin** etkisiyle dışarı doğru savrulma eğilimi gösterir. Mühendisliğin görevi, bu kuvveti dengeleyerek aracı yolda güvenli ve konforlu bir şekilde tutmaktır. Bunun için iki temel çözüm uygulanır.



Problem: Merkezkaç Kuvveti

Araçlar virajda savrulur veya devrilme riskiyle karşı karşıya kalır.

Çözüm 1: Dever (Enine Eğim)

- **Nedir?:** Yol yüzeyinin virajın içine doğru eğimli hale getirilmesidir.
- **Amacı:** Aracın ağırlığının bir bileşenini merkezkaç kuvvetine karşı koymak için kullanır, böylece savrulmayı azaltır.
- **Uygulama:** Aliymandaki normal %2'lik çatı eğiminden, kurp içinde %8-10'a varan bir enine eğime kademeli olarak geçilir.

Çözüm 2: Genişletme

- **Nedir?:** Viraj içindeki şerit genişliğini artırmaktır.
- **Amacı:** Özellikle uzun araçların (kamyon, otobüs) arka tekerlekleri ön tekerleklerden daha dar bir yörünge izler. Genişletme, bu araçların şerit içinde güvenle kalması için ek alan sağlar.

Yumuşak Dönüşlerin Sırrı: Geçiş Eğrileri (Klotoid)

Aliymandan (yarıçap sonsuz) dairesel bir kurba (sabit R yarıçapı) ani bir geçiş, hem sürücü konforunu bozar (ani sademe) hem de direksiyon hareketini zorlaştırır. İdeal çözüm, bu iki geometri arasına yarıçapı kademeli olarak değişen bir 'Geçiş Eğrisi' yerleştirmektir. Türkiye'de en yaygın kullanılan geçiş eğrisi 'Klotoid'dir.

Klotoid'in Amacı

- Merkezkaç kuvvetini ve direksiyon çevirme hareketini sıfırdan başlayarak kademeli olarak artırmak.
- Deverin aliymandaki normal eğimden kurptaki maksimum değere yumuşak bir şekilde uygulanması için gerekli uzunluğu sağlamak.

Temel Formüller

Geçiş Eğrisi Boyu (L_g): Konfor kriterine (sademe) göre hesaplanır.

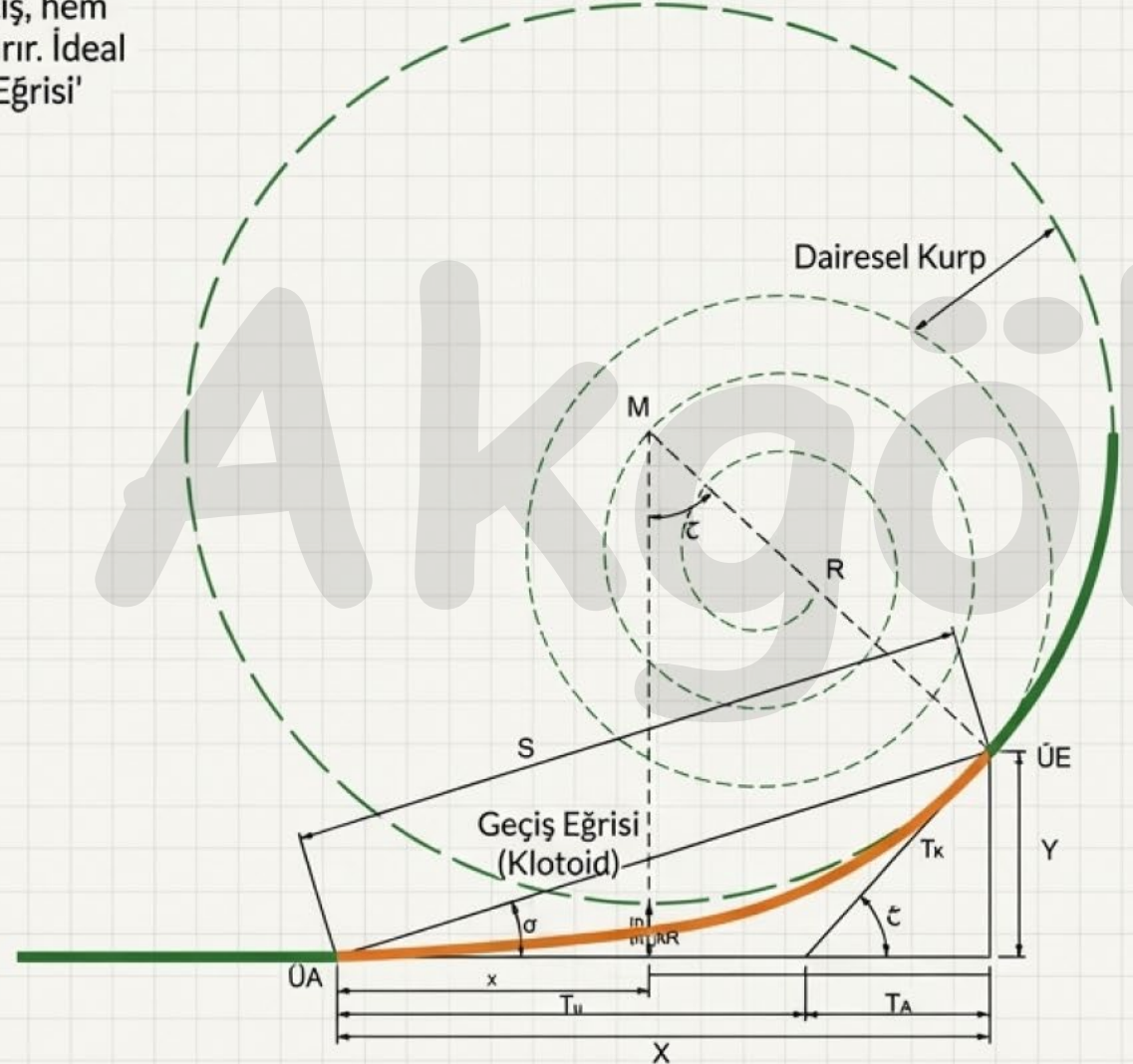
$$L_g = \frac{V_t^3}{18,7 \cdot R}$$

Klotoid Parametresi (A): Eğrinin geometrisini tanımlar.

$$A^2 = R \cdot L$$

Tasarım Kriterleri

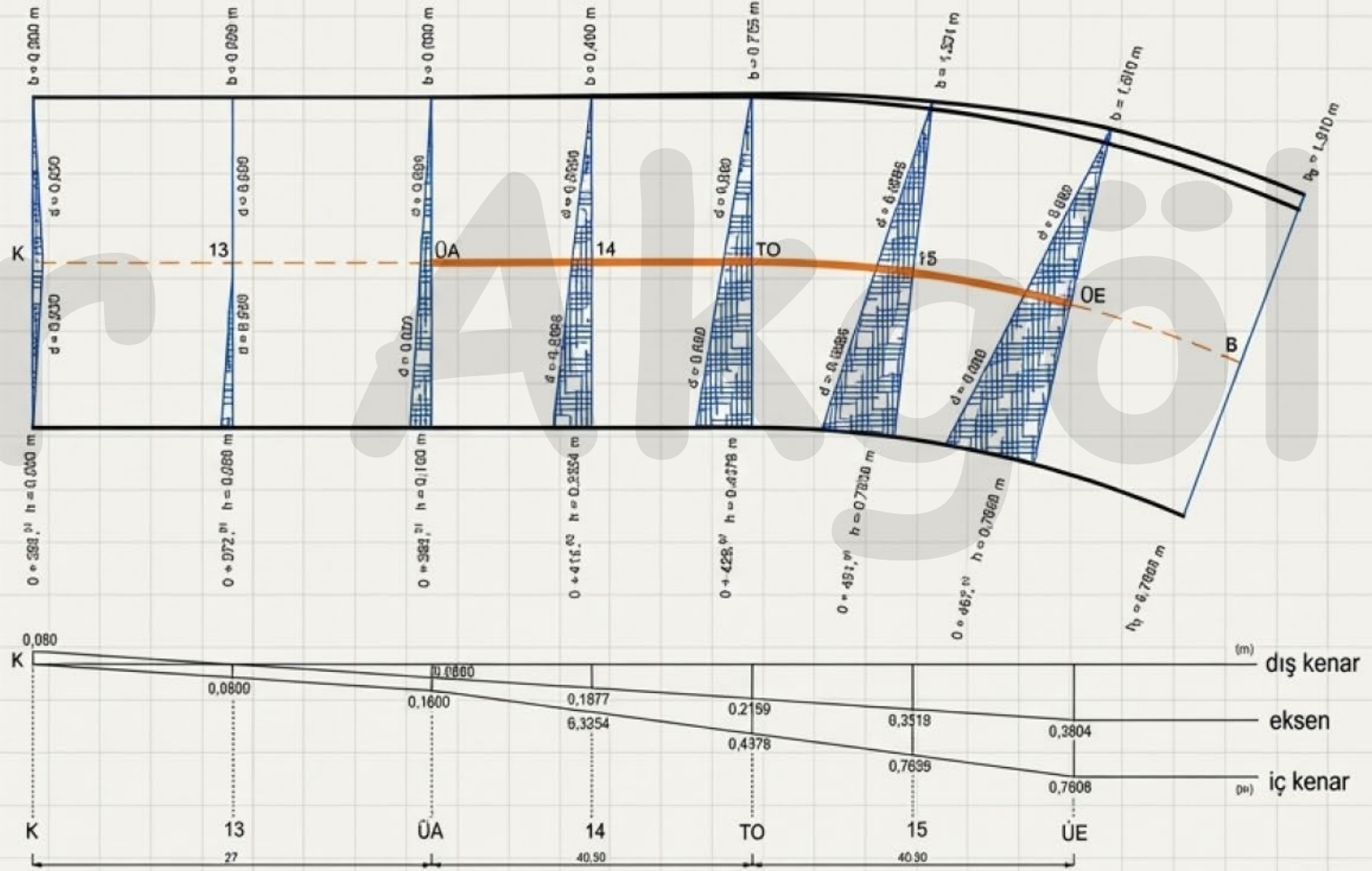
'A' parametresi seçilirken Optik, Dinamik ve Dever uygunluk kısıtları göz önünde bulundurulur, bu da tasarımın çok yönlü bir optimizasyon olduğunu gösterir.



Uygulama: Geçiş Eğrili Bir Kurpta Dever ve Genişletme Adımları

Tüm teorik bileşenler, yolun her noktasında güvenliği ve konforu sağlamak için hassas bir şekilde koordine edilir. İşte tipik bir uygulama süreci:

1. **Aliyman (A Noktası):** Yol normal %2'lik çatı eğimine sahiptir. Genişletme yoktur.
2. **Rampa Boyu (A'dan ÜA'ya):** Çatı eğimi, dış kenarın yükseltilmesiyle kademeli olarak ortadan kaldırılır. İç kenar sabit kalır (iç kenardan deverli uygulamada).
3. **Geçiş Eğrisi Başlangıcı (ÜA):** Yol tamamen düz bir enine eğime (%0) ulaşır. Bu noktadan itibaren dever ve genişletme birlikte artmaya başlar.
4. **Geçiş Eğrisi İçi (ÜA'dan TO'ya):** Dever ve genişletme, geçiş eğrisi boyunca lineer olarak artar.
5. **Dairesel Kurp Başlangıcı (TO):** Dever ve genişletme, daireysel kurp için gereken maksimum değerlere ulaşır. Bu değerler daireysel kurp boyunca sabit kalır.



Yolun Performansı: Trafik Akımının Temel İlişkileri

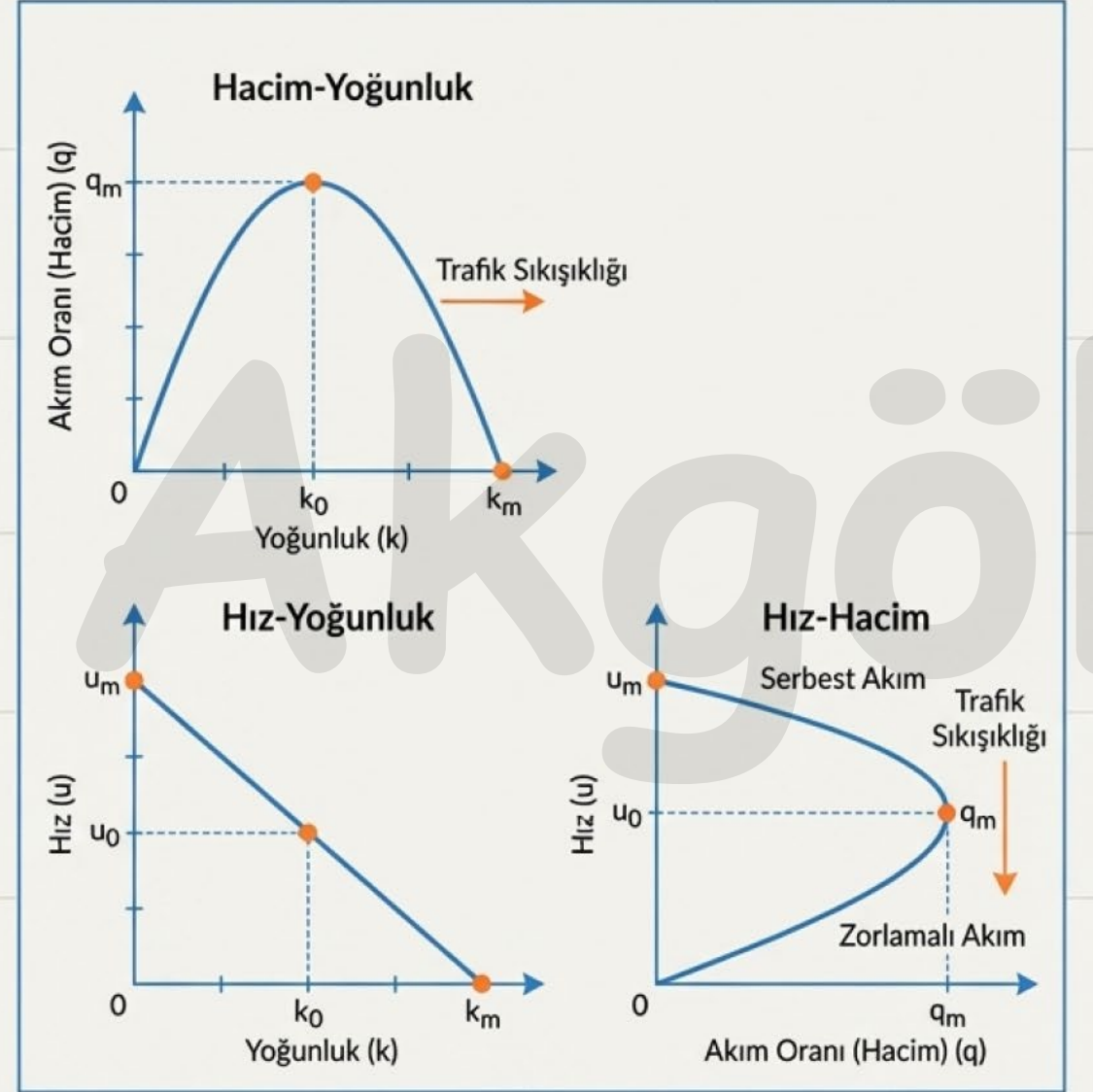
Bir yolun geometrisi tasarlandıktan sonra, üzerindeki trafik akışının nasıl davranacağını anlamak önemlidir. Trafik akımı üç temel değişken arasındaki ilişkiyle tanımlanır: Hız (u), Yoğunluk (k) ve Hacim (q).

$$q = u \cdot k$$

Hacim (q): Bir noktadan birim zamanda geçen araç sayısı (taşıt/saat). Yolun 'kapasitesi' bu değer maksimumudur.

Yoğunluk (k): Birim yol uzunluğundaki araç sayısı (taşıt/km).

Hız (u): Ortalama seyahat hızı (km/sa).



Pratikte Trafik Analizi: Bir Yolun Kapasitesini Hesaplamak

Trafik akımının temel ilişkilerini kullanarak bir yolun performans limitlerini hesaplayabiliriz. Hız ve yoğunluk arasındaki doğrusal bir ilişki varsayımıyla, yolun maksimum taşıma kapasitesini bulalım.

Senaryo: Bir yolda hız-yoğunluk ilişkisi $u = 70 - 0,5 \cdot k$ olarak verilmiştir.

1. Hacim-Yoğunluk İlişkisini Bulmak

- $q = u \cdot k = (70 - 0,5 \cdot k) \cdot k = 70k - 0,5k^2$
- Bu, tepe noktası yolun kapasitesini veren bir paraboldür.

2. Optimum Yoğunluğu Bulmak

- Maksimum hacim için, hacim denkleminin yoğunluğa göre türevi sıfıra eşitlenir:

$$\frac{dq}{dk} = 70 - k = 0 \Rightarrow k_0 = 70 \text{ taşıt/km}$$

3. Optimum Hızı Bulmak

- Optimum yoğunluk değeri hız denklemine yerleştirilir:

$$u_0 = 70 - 0,5 \cdot (70) = 35 \text{ km/sa}$$

4. Kapasiteyi Hesaplamak

- $q_{\max} = u_0 \cdot k_0 = 35 \cdot 70 = 2450 \text{ taşıt/saat}$

Sonuç

Bu yol, saatte maksimum 2450 araç taşıyabilir. Bu durumda, trafikteki araçların ortalama hızı 35 km/sa olacaktır.



En İyi Güzergah Hangisi? Ekonomik Karşılaştırma

Bir yol projesinde genellikle birden fazla güzergah (geçki) alternatifi bulunur. Sadece en kısa veya en ucuz inşa edilen değil, uzun vadede topluma en çok faydayı sağlayan seçeneği bulmak hedeflenir. Bu, yatırım, işletme ve bakım maliyetlerini içeren kapsamlı bir ekonomik analizle yapılır.

Analiz Adımları:

- 1. Yatırım Maliyetlerinin Hesaplanması:** Kamulaştırma, proje, toprak işleri, sanat yapıları, üstyapı gibi tüm yapım maliyetleri her bir alternatif için hesaplanır ve inşaat yıllarına göre bugünkü değere güncellenir.
- 2. İşletme Giderlerinin Tahmini:** Her bir alternatifin uzunluğu, eğimleri ve virajları, taşıtların yakıt ve zaman maliyetlerini etkiler. Bu "eşdeğer uzunluklar" üzerinden 20 yıllık toplam işletme giderleri tahmin edilir ve bugünkü değere indirgenir.
- 3. Bakım Giderlerinin Hesaplanması:** Yolun bakımı, personel ve ekipman giderleri her yıl için hesaplanır ve bugünkü değere indirgenir.

Karar Kriteri:

Fayda/Maliyet Oranı (N): Toplam işletme giderlerindeki tasarrufun, toplam yatırım ve bakım maliyetlerine oranını gösterir. Oranı daha yüksek olan seçenek ekonomik olarak daha üstündür.

$$N = \frac{\text{Aktüalize İşletme Giderleri}}{\text{Aktüalize Yatırım} + \text{Aktüalize Bakım Giderleri}}$$

N1 (1. Geçki) = 0.2894

N2 (2. Geçki) = 0.2883

Sonuç: N1 > N2 olduğundan, birinci geçki ekonomik olarak daha avantajlıdır.

