

Araştırma Makalesi

Türkiye’de Yenilikçi Bir Adım: Aksaray CFI Kavşak Tasarımı

Sefa Gündoğdu^{1*}, Cemal Önal²

^{1,2} Karayolları Genel Müdürlüğü, Etüt, Proje ve Çevre Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye

*Correspondence: sefa.gundogdu@kgm.gov.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1509023

Özet Karayolları, tarih boyunca yerleşim alanlarını birbirine bağlayarak bilim, kültür ve ticaretin gelişimine katkı sağlamıştır. Ancak artan nüfus ve araç sahipliği ile birlikte geleneksel kavşaklar, yoğun trafik talebine yanıt vermekte yetersiz kalmaktadır. Bu durum, seyahat sürelerini uzatırken yakıt tüketimi ve çevresel etkileri artırmaktadır. Son yıllarda bu sorunlara çözüm olarak alternatif yenilikçi kavşak tasarımları öne çıkmaktadır. Türkiye’de ilk kez Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından uygulanan Sürekli Akış Kavşağı (CFI - Continuous Flow Intersection), bu kapsamda önemli bir örnek oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Aksaray Küçük Sanayi Sitesi girişinde yer alan CFI kavşağının mikro simülasyon tabanlı analizi gerçekleştirilmiş, farklı trafik senaryoları altında kapasite ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, mevcut durumda kavşağın hizmet seviyesi (LOS) B olup, ortalama gecikme süresi 12,44 saniyedir. Trafik hacminin %50 artması durumunda gecikme süresi 15,99 saniyeye çıkarken, hizmet seviyesi B olarak kalmıştır. %100 artış senaryosunda ise gecikme süresi 21,72 saniyeye ulaşarak hizmet seviyesi C’ye düşmüştür. Yakıt tüketimi mevcut durumda 121 litre iken, %50 ve %100 trafik artışında sırasıyla 196 litre ve 308 litreye yükselmiştir. Karbon monoksit (CO) emisyonu da mevcut 2231 g seviyesinden %100 artış durumunda 5697 g seviyesine çıkmıştır. Sonuçlar, CFI kavşak tasarımının yüksek hacimli sola dönüş taleplerini daha etkin yönettiğini ve trafik akışını iyileştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, Türkiye’de ilk defa uygulanan bir CFI kavşağının performans analizini sunarak literatürde önemli bir boşluğu doldurmakta ve gelecekte benzer kavşak uygulamaları için bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hemzemin kavşak, sürekli akış kavşağı, kapasite, trafik yönetimi, trafik simülasyonu

Innovative Step in Türkiye: Aksaray CFI Intersection Design

Abstract: Highways have contributed to the development of science, culture and commerce by connecting settlements throughout history. However, with increasing population and vehicle ownership, traditional intersections are inadequate to respond to heavy traffic demand. This increases travel times, fuel consumption and environmental impacts. In recent years, alternative innovative intersection designs have come to the forefront as a solution to these problems. The Continuous Flow Intersection (CFI), implemented for the first time in Turkey by the General Directorate of Highways (KGM), constitutes an important example in this context. In this study, a microsimulation-based analysis of the CFI intersection located at the entrance of Aksaray Small Industrial Zone was carried out, and capacity and performance evaluations were carried out under different traffic scenarios. According to the findings, the current level of service (LOS) of the intersection is B and the average delay is 12.44 seconds. In the case of a 50% increase in traffic volume, the delay increases to 15.99 seconds, while the level of service remains at B. In the 100% increase scenario, the delay increases to 21.72 seconds and the level of service drops to C. Fuel consumption increased from 121 liters in the current case to 196 liters and 308 liters in the 50% and 100% traffic increase scenarios, respectively. Carbon monoxide (CO) emissions also increased from the current level of 2231 g to 5697 g with a 100% increase. The results show that the CFI intersection design manages high-volume left-turn demands more effectively and improves traffic flow. This study fills an important gap in the literature by presenting the performance analysis of a CFI intersection implemented for the first time in Turkey and provides a scientific basis for similar intersection applications in the future.

Keywords: Grade intersection, continuous flow intersection, capacity, traffic management, traffic simulation

1. Giriş

Trafik, yayaların, hayvanların ve motorlu taşıtların karayolları üzerindeki hareket ve davranışlarını ifade etmektedir (Aydın, 2017). Kamunun kullanımına açık olan yollar, köprüler ve alanlar karayolu olarak tanımlanmaktadır. İki yönlü ve tek yönlü yollar, bölünmüş yollar, erişim kontrollü yollar, geçiş yolları, bağlantı yolları, ana yollar, tali yollar, taşıt yolları, yaya yolları, bisiklet yolları ve yaya geçitleri gibi çeşitli bileşenlerin kesiştiği yerlerde kavşak gereksinimi ortaya çıkmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 1983). Kavşak iki veya daha fazla yolun kesişmesinden meydana gelen ve trafik hareketleri için gerekli şartları kapsayan bir alanı ifade etmektedir. Kavşakların temel işlevi, trafiğin yön değiştirmesini sağlamaktır. Bir yolun en önemli kısmını teşkil eden kavşaklar, yolun emniyetine, hızına, işletme maliyetlerine ve kapasitesine doğrudan etki etmektedirler. Bu nedenle kavşakların projelendirilmeleri, yolun ekonomik çalışmasını temin edecek şekilde yapılmalıdır (Yaman & Kaman, 1979). Bir kavşak genel olarak, onun fiziksel ve işlevsel alanlarıyla belirlenmektedir. Kavşak tasarımında yolların kesiştiği nokta fiziksel alanı tanımlamaktadır. İşlevsel alan ise bu fiziksel bölgeyi içine almakta ve kavşak sebebiyle yol platformunun değiştiği, giriş ve çıkış arasındaki tüm alanları (örneğin, ek şeritler, adalar) kapsamaktadır. Kavşakların işlevsel alanları temel olarak üç ana kısma ayrılmaktadır: algı-tepki mesafesi, manevra mesafesi ve bekleme mesafesi (Koç, 2010).

Kavşak tasarımı yapılırken hızın kontrol edilmesi, sürekliliğin sağlanması, güvenliğin artırılması, gecikmelerin azaltılması, hizmet seviyesinin iyileştirilmesi ve taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir. Söz konusu amaçlara ulaşmak için ekonomik ve fiziksel sınırlar çerçevesinde tasarımlar oluşturulmaktadır. Kavşaklar, tasarım özelliklerine göre eş düzey kavşaklar ve katlı (farklı seviyeli) kavşaklar olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Bu ayrım, kavşakların fiziksel yapısına dayanmaktadır. Eş düzey kavşaklar, kendi içinde kontrolsüz kavşaklar, sinyalizasyon kavşaklar ve dönel kavşaklar olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (Koç, 2010). Sinyalizasyon kavşaklarında kullanılan kontrol teknikleri, temel olarak iki ana başlıkta toplanmaktadır: izole kontrol sistemleri ve koordineli kontrol sistemleri. İzole sinyalizasyon kontrol sistemleri; sabit zamanlı kontrol, trafik uyarmalı kontrol, yaya uyarmalı kontrol ve adaptif kontrol sistemlerinden oluşmakta, koordineli kontrol sistemleri ise; senkronize, alternatif ve progresif kontrol sistemlerinden oluşmaktadır (KGM, 2019).

Etkili trafik yönetimi için sinyal sistemlerinin doğru planlanması ve işletilmesi büyük önem taşımaktadır. Projenin geçerliliği ve sürdürülebilirliği açısından, tasarım aşamasında kullanılan yöntemlerin ve onaylanan parametrelerin ülke koşullarını tanımlaması ve sürücü ile yolcu profilini doğru temsil etmesi gerekmektedir. Değişken trafik taleplerini yönetebilmek amacıyla, akıllı ulaşım sistemlerinin gelişmesiyle birlikte trafik uyarmalı sinyalizasyon yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sinyalizasyon kavşağın optimize edilmesi, anlık verilere dayalı olarak faz düzenini belirlenmesi gibi parametreler; taşıt gecikme süresini, seyahat süresini, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltırken, kavşağın hizmet seviyesini yükseltmektedir. Tali yol trafik taleplerinin düşük olduğu bölgelerde, yarı uyarmalı sinyalizasyon sistemleri kullanılarak kavşakların yönetimi sağlanmaktadır. Bu bölgelerde ana yol, sürekli yeşil ışık ile planlanmakta olup tali yollar, sensörlerden alınan taleplere bağlı olarak yeşil faza geçebilmekte ve talep yoğunluğuna göre maksimum minimum sınırlar çerçevesinde faz süresi uzatılabilmektedir (KGM, 2019).

Ulaştırma sistemlerinin analiz edilmesi, tasarlanması ve iyileştirilmesi amacıyla sanal ikiz ve simülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Sanal ikiz olarak tanımlanabilecek modellerin oluşturulması sayesinde projelere ait senaryolar test edilebilmekte, mevcut problemler tespit edilmekte, çözüm önerileri geliştirilebilmekte ve gerekli değişiklikler yapılabilmektedir. Performans kriterleri mukayese edilerek kapsamlı değerlendirmeler gerçekleştirilmekte ve bu doğrultuda karar alma süreçleri kolaylaştırılmaktadır. Bu yöntem ile geri dönüşü mümkün olmayan ya da yüksek maliyetli hataların sahada ortaya çıkmasının önüne geçilerek, olası sorunların en aza indirilmesi sağlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019).

Trafik akımlarının modellenmesinde genel olarak analitik, makroskobik, mikroskobik ve mezoskobik benzetim teknikleri kullanılmaktadır. Otoyol ve kent içi ulaşım sistemlerinde, mevcut trafik koşullarının ve önerilen projelerin performansını değerlendirmek amacıyla mikro simülasyon teknikleri uygulanabilmektedir. Bu teknikler, saniyeden daha kısa zaman dilimlerinde bireysel araç hareketlerini modelleyerek kapsamlı analizler gerçekleştirilmektedir. Bir aracın hareketinin tahmin edilmesi sürecinde,

sürücünün farklı davranış modellerinden kaynaklanan çeşitli değişkenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Söz konusu değişkenler arasında ön önemli parameter, birbirini takip eden araçlar arasında süredir. Ardışık araçlar arasındaki aralık, mesafe ve zaman cinsinden olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Güler, 2016).

Çalışma kapsamında, birden fazla karayolunun kesişmesi, birleşmesi veya ayrılması sonucu oluşan kavşak alanları incelenmiştir. Hız kontrolünün sağlanması, güvenliğin artırılması ve hizmet seviyesinin yükseltilmesi gibi amaçlarla düzenlenen kavşaklarda, tasarımı etkileyen faktörler detaylı olarak ele alınmıştır. İnsan, trafik, fiziksel, ekonomik ve sosyal faktörler ölçeğinde tasarlanan geleneksel kavşak uygulamalarının yetersiz kaldığı durumlarda kullanılacak yenilikçi alternatif hemzemin kavşak tasarımlarına yönelik literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Akıllı ulaşım sistemlerinin sinyalizasyon alanındaki gelişmeleri takip edilerek, trafik uyarımlı sinyalizasyon sistemlerinin kullanımı incelenmiştir. Benzetim modeli ve ilgili modüller kullanılarak kavşak ve sinyalizasyon sistemi modellenmiş olup, modellenen kavşak bölgesindeki trafik hacimleri %50 ve %100 oranında artırılarak kavşağın kapasitesi analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden ayrılan yönleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Trafik yoğunluğunun, özellikle de sola dönüş hacimlerinin yüksek olduğu bölgelerde, farklı seviyeli kavşaklardan önce uygulanabilecek yenilikçi hemzemin kavşak tasarımlarının etüt edilmesi,
- Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) değerleri referans alınarak tercih edilebilecek alternatif kavşak türlerinin belirlenmesi,
- Türkiye’de ilk kez oluşturulan bir kavşak tasarımı ile uygulanabilirliğin ortaya konulması ve bu doğrultuda farkındalık sağlanması,
- Optimize edilmiş ve koordine şekilde işletilen sinyalizasyon sistemleri ile elde edilen kazanımların bütüncül olarak değerlendirilmesi,
- Simülasyon tekniklerinin kullanımıyla, karar alma süreçlerinde hız ve doğruluk unsurlarının önemine vurgu yapılması.

Bu çalışmanın kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, alternatif yenilikçi kavşak tasarımları ve uyarımlı sinyalizasyon sistemlerine ilişkin literatür araştırması sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan materyal ve metotlar özetlenmiş olup bu kapsamda çalışma alanı, veri toplama süreci, benzetim modelinin geliştirilmesi ve kalibrasyon aşamaları detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, analiz sonuçları ve bulgular yer almaktadır. Beşinci ve son bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile birlikte öneriler sunulmuştur.

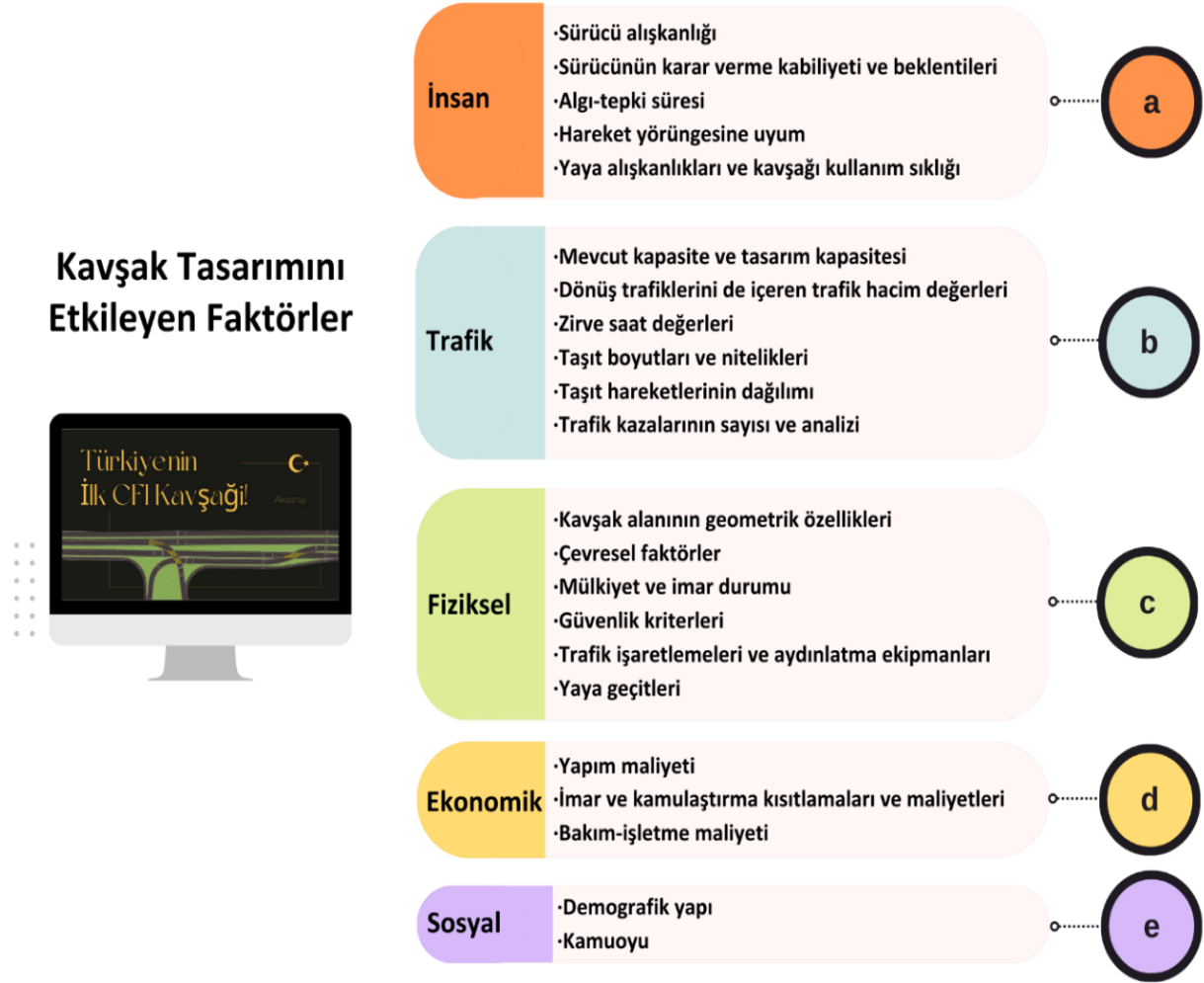
2. Literatür Taraması

2.1. Kavşak tasarımı

Yayla (2015), farklı yönlerde akan trafiğin ortak olarak kullandığı yol alanlarının hemzemin (eş düzey) kavşaklar olarak tanımlandığını ifade etmiştir. Yapılan istatistiksel analizlere göre, neredeyse tüm ülkelerde şehir içi ve kırsal yollarda meydana gelen trafik kazalarının %40 ila 60'ının, birden fazla yolun birleştiği veya kesiştiği hemzemin kavşaklarda gerçekleştiği belirtmiştir. Öte yandan, özellikle şehir içi trafik akışında yaşanan gecikmelerin yüzde 70'ten fazlasının, bu kavşak bölgelerindeki duraklamalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu iki temel husus, hemzemin kavşakların dikkatle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Kazalara ve gecikmelere neden olan bu noktaların, titizlikle planlanması ve kapsamlı teknik analizlere dayalı olarak tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü (2022), kavşak bölgelerinin yol altyapısının en önemli bileşenlerinden biri olduğunu belirtmiştir. Bunun temel nedeni, yolun verimliliği, güvenliği, hızı, işletme maliyetleri ve kapasitesi gibi kritik unsurların kavşak tasarımına doğrudan bağlı olmasıdır. Kavşaklar, iki veya daha fazla yol üzerindeki doğrusal veya kesişen trafik akışlarını ve bu yollar arasındaki dönüş hareketlerini içermektedir. Bu hareketler, kavşak türüne bağlı olarak farklı geometrik düzenlemeler ve trafik yönetimi uygulamaları ile gerçekleştirilmektedir. KGM Karayolu Tasarım El Kitabı'na göre, kavşak tasarımını

etkileyen faktörler beş ana başlık altında sınıflandırılmıştır: insan, trafik, fiziksel, ekonomik ve sosyal faktörler. Bu faktörlerin detaylı sınıflandırması Şekil 1’de sunulmaktadır.



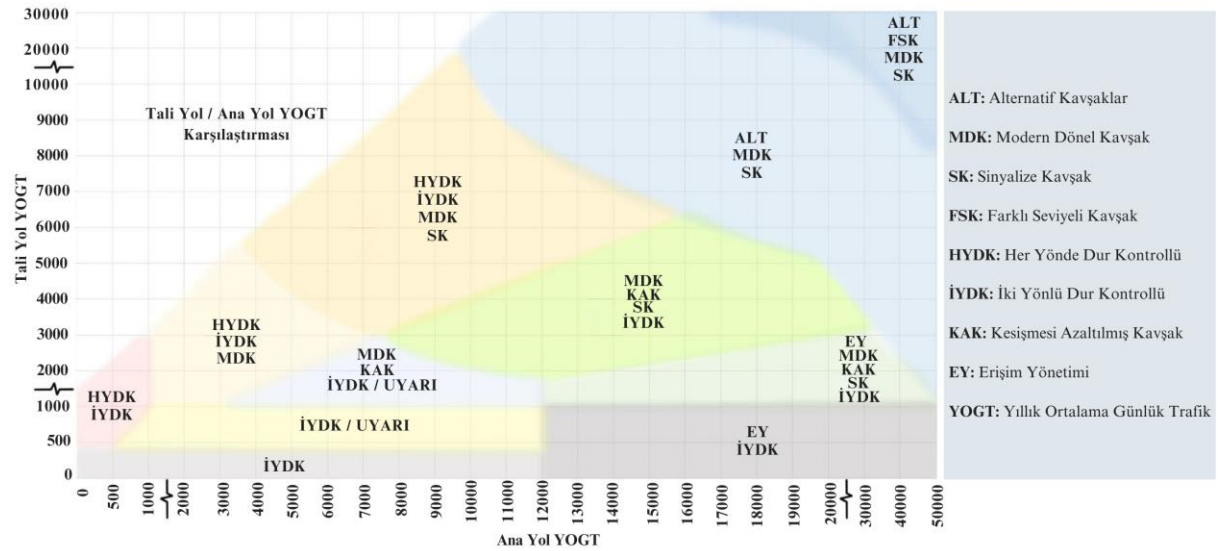
Şekil 1. Kavşak tasarımını etkileyen faktörler.

Sesli (2017), kent içi kavşak düzenleme çalışmalarında taşıt ve yaya trafiği ihtiyaçlarına cevap verilmesini amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaç doğrultusunda, bölgesel faktörler (sosyo-ekonomik, kültürel, demografik) dikkate alınarak saha verileri ile mevcut durum simülasyonu yapmış ve kaza envanterleri incelemiştir. Çalışmada, kontrol ve kavşak sayımları, mevcut trafik akışının analizi, yol sınıflandırmaları, yaya yollarının incelenmesi, otopark analizleri, sinyalizasyon sistemlerinin değerlendirilmesi, kaza envanterlerinin analizi ve toplu taşıma verilerinin incelenmesi gibi yöntemler kullanılmıştır. Kastamonu ilindeki 25 kavşak incelenmiş olup, özellikle Cumhuriyet Meydanı ve Sunta Kavşağı detaylı analizlere tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, kavşaklardaki sorunların belirlenmesinde geniş alanlı incelemelerin önemi vurgulanmış ve tasarımın uzun vadeli planlamalarla uyumlu olması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, kavşak sayımları, sinyalizasyon analizleri ve kaza değerlendirmeleri ile toplu taşıma araçlarının da göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir.

FHWA (2010), tarafından yapılan gözleme göre, günümüz ulaştırma uzmanları, sınırlı kaynaklarla artan nüfusun hareketlilik ihtiyaçlarını karşılamakta zorluk yaşamaktadır. Birçok karayolu kavşağındaki trafik sıkışıklığı giderek artmaktadır. Sürücüler, yayalar ve bisikletliler, bu artan gecikmeler nedeniyle daha fazla riskle karşı karşıya kalmaktadır. Günümüzün trafik hacimleri ve seyahat talepleri genellikle geleneksel kavşak tasarımlarının etkişi bir şekilde ele alamayacağı kadar karmaşık güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle, daha fazla mühendis bu karmaşık sorunlara çözüm ararken, çeşitli yenilikçi uygulamaları göz önünde bulundurmaktadır.

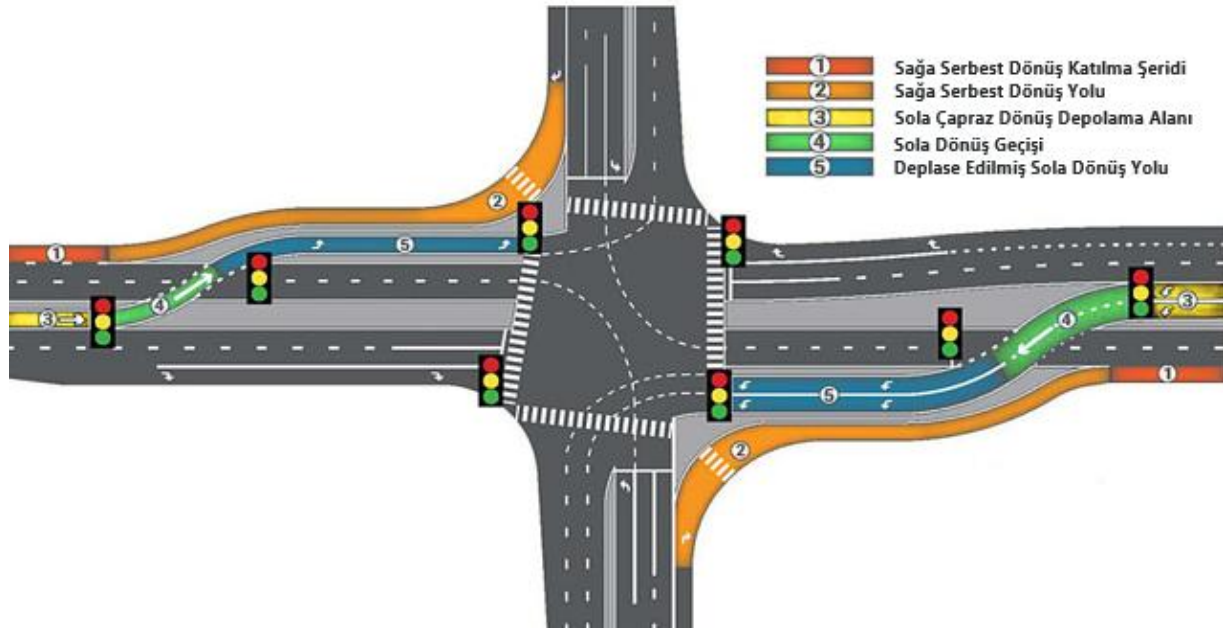
Alternatif kavşak tasarımları, trafik güvenliğini ve işleyişini aynı anda iyileştirmesi beklenen şekilde tasarlanmış ve uygulanmıştır. Trafik hareketlerinin yeniden dağıtılması (özellikle ana kavşaktaki sola dönüş hareketlerinin yasaklanması veya yer değiştirilmesi yoluyla) iki fazlı bir sinyal işletimine olanak sağlarken, çakışma noktalarını azaltmaktadır. Sinyal fazlarının sayısının azalması, döngü uzunluğunu ve gecikmeyi azaltırken, çakışma noktalarının sayısının azalması da bu kavşak tasarımlarında potansiyel olarak daha az sayıda çarpışma yaşanacağına işaret etmektedir. Günümüze kadar trafik güvenliğini ve işleyişini artırmak için birçok alternatif kavşak tasarımı önerilmiştir. Ancak, bunlardan yalnızca çok azı yaygın olarak benimsenmiş, diğerleri ise ABD'de yalnızca birkaç noktada uygulanmıştır. Papyon kavşağı, yerinden sola dönüşlü kavşak, paralel akışlı kavşak, medyan U dönüşlü kavşak, kısıtlı geçişli U dönüşlü kavşak, çeyrek yol kavşağı, Jughandle kavşağı, bölünmüş fazlı kavşak, yukarı akış sinyalize kavşak, simetrik kavşak, hamburger veya geçişli kavşak ve senkronize bölünmüş fazlı kavşak gibi 4 fazlı geleneksel kavşaklara alternatif olarak çeşitli kavşak tasarımları önerilmiştir (Al-Omari, 2021).

Kuzey Dakota Ulaştırma Departmanı (NDDOT; North Dakota Department of Transportation) ana ve tali yollardaki YOGT değerlerini kullanarak incelemeye tabi tutulacak kavşağın türünü belirlemek için başlangıç noktası olarak bir sınıflandırma yapmıştır. Ana ve tali yolda taşıt hacimlerinin yüksek olduğu durumlarda, CFI gibi alternatif kavşaklar, modern dönel kavşaklar ve sinyalize kavşakların uygulanabileceği belirtilmiştir (Şekil 2). YOGT değerlerinin tali yolda 15.000, ana yolda ise 25.000'i geçtiği durumlarda, farklı seviyeli kavşaklarla birlikte alternatif, modern dönel ve sinyalize kavşak tiplerinin de kullanılabileceği öngörülmektedir (NDDOT, 2023).



Şekil 2. Kavşak tipi seçimi (NDDOT, 2023)

Dünyada, özellikle Amerika'da inşa edilen CFI kavşaklarının, katlı kavşaktan önceki son hemzemin çözüm olarak ele alındığı gözlemlenmektedir. Zaman zaman farklı isimlerle adlandırılmalarına karşın, aynı amaca hizmet eden kavşak tasarımları, sola dönüş hareketlerini ana kavşak bölgesine gelmeden diğer yöne aktarma prensibiyle çalışmakta ve dolayısıyla kesişmeleri azaltmaktadır (Şekil 3). CFI, ilk olarak Francisco Mieras tarafından, yüksek hacimli sola dönüş hareketlerindeki tıkanıklığı iyileştirmek amacıyla alternatif bir tasarım olarak tanıtılmıştır. CFI kavşak tasarımı, sola dönüş cebini ana kavşak alanından farklı bir noktada yeniden konumlandırarak, bu hareket için yeni bir geçiş yolu sağlar. Bu ilave yol, ana sinyalize kavşaktan sola dönüş aşamasını ortadan kaldırarak kavşağın kapasitesini artırmakta ve ana kavşaktaki çakışma noktalarının sayısını azaltmaktadır. Ana kavşak alanı ve sola dönüşlerin gerçekleştiği diğer kavşakların sinyalizasyon sistemi koordineli bir şekilde çalışmaktadır. Ana kavşaktan sola dönüş hareketinin yeniden konumlandırılması nedeniyle, bu tür kavşak tasarımına bazen Deplase Edilmiş Sola Dönüş (DLT; Displaced Left Turn) kavşağı da denilmektedir (Khliefat vd., 2021).



Şekil 3. CFI kavşak tasarımı (Url-1)

DLT ve CFI olarak adlandırılan tasarımlar, çapraz yer değiştirilmiş sola dönüş kavşağı (XDL; Crossover Displaced Left Turn) olarak da bilinmektedir. XDL, bir veya daha fazla sola dönüş hareketini, karşı trafik akışının diğer tarafına yeniden konumlandırarak bir kavşak formunu ifade etmektedir. Bu özellik, sola dönüş hareketlerinin ana akım hareketi ile eş zamanlı ilerlemesine imkân tanımaktadır. Dolayısıyla, ana kavşaktaki sola dönüş aşaması ortadan kaldırılmış olur. XDL kavşağı ile sinyal fazı ve çakışma noktalarının sayısı azaltılarak trafik operasyonlarında ve güvenlik performanslarında iyileştirme sağlanmaktadır. Geleneksel kavşakta sola dönüş için tahsis edilen yeşil sürelerden elde edilen kazanım ile, yaya geçişlerinin kolaylaştırılması ve araçların kavşaktaki bekleme sürelerinin azaltılması hedeflerine ulaşılabilmektedir (FHWA, 2014).

Yılmaz (2024), artan kent nüfusu ve bununla birlikte ortaya çıkan trafik sorunlarına çözüm üretmek amacıyla yenilikçi sinyalizasyon kavşak tasarımlarını araştırmayı ve mikro simülasyon yöntemleriyle analiz etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, geleneksel olmayan kavşak tasarımlarından biri olan Yerinden Edilmiş Sola Dönüş (DLT) kavşağı, aynı zamanda CFI olarak da bilinen kavşak tasarımına alternatif olarak sunulmuş ve yeni bir kavşak tasarımı oluşturmuştur. Bu alternatif tasarım, geleneksel sinyalizasyon kavşak tasarımı ile beş ayrı araç hacmi senaryosunda PTV Vissim simülasyon programı kullanılarak karşılaştırılmış ve Synchro programı üzerinden hesaplanan sinyal süreleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, alternatif DLT tasarımının ortalama gecikme süresinde %61.54, ortalama hızda %101.70, toplam seyahat süresinde %33.82 ve toplam gecikme süresinde %51.74 oranında iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, alternatif DLT tasarımının, DLT tasarımına kıyasla daha küçük kavşak alanlarında uygulanabilir olması sebebiyle, dar kentsel alanlarda çözüm olarak uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

2.2. Uyarımalı sinyalizasyon çalışmaları

Duraku ve Boshnjaku (2024), sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün (FTSC) sınırlamalarını aşmak amacıyla tasarım mantık kontrolüne dayalı bir algoritma önermiştir. Endüktif dedektörlerden alınan verileri kullanarak sinyal planlarını optimize etmiş ve PTV Vissim simülasyonlarıyla test etmişlerdir. Önerilen sistem, trafik akışına bağlı olarak yeşil süresini dinamik şekilde ayarlayarak döngü süresini kısaltmıştır. Gerçek bir kavşakta yapılan testlerde, sabit zamanlı kontrole kıyasla kuyruk uzunluklarını %39,6, araç gecikmelerini ise %51,3 oranında azaltarak daha verimli ve sürdürülebilir bir trafik yönetimi sağladığı gösterilmiştir.

Guo ve Ma (2016), trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla, gerçek zamanlı trafik akışına göre faz değiştiren bir uyarımalı sinyal kontrol modeli önermiştir. VISSIM simülasyonlarıyla test edilen model, seyahat süresi ve gecikmeyi azaltırken, faz geçişlerinde bekleme süresi ve kuyruk uzunluğunu dikkate alarak trafik talebine uyum sağlamıştır. Sonuçlar, geliştirilen uyarımalı sinyal kontrolünün sabit zamanlı ve standart uyarımalı sinyal kontrolüne kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir.

Koukol ve Pribyl (2013), PTV VISSIM'de bulanık kontrol algoritmasının değerlendirilmesini amaçlamıştır. Mikro simülasyon yöntemiyle, VisVAP kullanılarak trafik kontrol stratejileri oluşturulmuş ve trafik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Trafik detektörlerinden alınan verilerle yeşil süreyi hesaplayan bulanık çıkarım sistemi, sabit zamanlı kontrole kıyasla gecikmeyi %35.59, duruş sayısını %32.55 oranında azaltmıştır. Çalışma, VISSIM içinde bulanık kontrol sistemlerinin uygulanabilirliğini ve VisVAP'ın gelişmiş kontrol sistemleri için potansiyelini ortaya koymuştur.

Pandza vd. (2015), trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla VISSIM'de kooperatif rampa ölçümünü (RM) simüle eden bir çerçeve geliştirmiştir. Otoyol modeli oluşturularak, VisVAP ile trafik kontrol algoritmaları uygulanmış ve ALINEA tabanlı yerel RM stratejileri test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, kooperatif RM'nin ortalama hızı artırarak seyahat süresini azalttığını göstermektedir. Çalışma, RM sistemlerinin simülasyonla analiz edilerek gerçek dünya uygulamalarına katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Mitkas ve Politis (2020), otoyol rampalarında alternatif rampa ölçüm senaryolarını değerlendirmek amacıyla PTV Vissim kullanarak akıllı bir sinyal kontrol cihazı geliştirmiştir. Selanik Ring yolundaki bir kavşakta drone ile trafik hacimleri ölçülmüş ve farklı senaryolar simüle edilmiştir. Sabit zamanlı ve araçla çalışan sinyal sistemleri karşılaştırılmış, VisVAP kullanılarak akış şemasıyla dinamik sinyal kontrolü uygulanmıştır. Sonuçlar, rampa ölçerin trafik akışını iyileştirdiğini ve çevresel faydalar sağladığını göstermektedir.

Dadashzadeh (2019), karma trafik akışında otobüs önceliği yöntemlerinin etkilerini incelemiş ve Vissim'de İstanbul'daki Yıldız rampasını modellemiştir. Otomatik kalibrasyon için genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemlerinden oluşan hibrit GAPSO ve PSOGA algoritmaları geliştirilmiş, MATLAB-Vissim entegrasyonu kullanılmıştır. Entegre değişken hız sınırı (DHS) ve ALINEA modeli (DHS+ALINEA/O) VisVAP ile kodlanarak uygulanmış ve otobüs gecikmesini azaltırken karma trafik akışını iyileştirdiği bulunmuştur.

Usta (2023), akıllı ulaşım sistemlerinin (AUS) tarihsel gelişimini ve trafik ile çevre üzerindeki etkilerini incelemiştir. İstanbul'daki Fehim Şanlı Kavşağı'nda PTV Vissim kullanılarak adaptif trafik kontrolü ve parklanma düzenlemelerini içeren iki farklı senaryo modellenmiştir. Sonuçlar, adaptif kontrolün her durumda hizmet seviyesini iyileştirmediğini, ancak parklanma sorunlarının çözülmesinin trafik akışını olumlu etkilediğini göstermiştir. Çalışma, AUS çözümlerinin yerel koşullara göre uyarlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Yaman (2024), sabit süreli ve tam trafik uyarımalı sinyalizasyon kavşakları PTV Vissim kullanarak karşılaştırmıştır. Gerçek saha verileriyle kalibre edilen simülasyonlarda, farklı kavşak türleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, tam trafik uyarımalı sistemlerin gecikme süresi, durma sayısı, yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinde iyileşme sağladığını, özellikle dört kollu sinyalizasyon kavşaklarda ve kısa döngü süreli dönel adalı kavşaklarda daha etkili olduğunu göstermiştir.

Çakıcı vd. (2022), dört kollu sinyalizasyon bir kavşak için VISVAP kullanılarak araçla harekete geçirilen yeni bir yönetim sistemi (VAM4) geliştirmiştir. Sistem, 20 farklı trafik senaryosunda gecikme, yakıt tüketimi ve emisyon açısından VISSIM'de test edilmiştir. Sonuçlar, VAM4'ün trafik taleplerindeki dalgalanmalara uyum sağlayarak performans göstergelerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Modelde, 14 şerit için 14 dedektör kullanılarak kuyruğun tespiti ve araç varış aralıklarının belirlenmesi sağlanmış, kavşak dört fazlı olarak uygulanmıştır.

3. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında, Aksaray ili hudutlarında ve Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü sorumluluğundaki yol güzergahında bulunan Aksaray Küçük Sanayi Sitesi girişindeki kavşak incelenmiş ve mikro simülasyon programı ile modellenmiştir. Modelleme sürecinde, zirve saat taşıt hacimleri saatlik sayım değerlerine dayalı olarak belirlenmiştir. Üç kollu T kavşağına ait geometrik veriler (uzunluk, şerit vb.), kontrol verileri (sinyalizasyon tipi, katılım kontrolü vb.), talep verileri (giriş hacimleri, dönüş yüzdeleri vb.) ve kalibrasyon verileri (hız, kuyruklanam vb.) PTV (Planung Transport Verkehr) Vissim (Verkehr In Städten-Simulationsmodell) mikro simülasyon programına aktarılmıştır. Sinyalizasyon aşamasında, Vissim programının VISSIG (Vissim Signal) ve VISVAP (Vissim Vehicle Actuated Programming) modülleri bir arada kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

3.1. Çalışma Alanı

Aksaray, İç Anadolu'nun orta Kızılırmak bölgesinde, kuzey ve güney Anadolu dağlarının birbirinden uzaklaştığı bir alanda yer almaktadır. Şehir, kuzey yarımkürede 37-38 enlemleri ile doğu yarımkürede 33-35 boylamları arasında konumlanmaktadır. Aksaray, doğusunda Nevşehir, güneydoğusunda Niğde, batısında Konya, kuzeyinde Ankara ve kuzeydoğusunda Kırşehir illeriyle komşudur. 7997 km² yüzölçümüne sahip olan Aksaray'ın 2021 yılı nüfusu; şehir merkezinde 350.783 kişi, köylerinde ise 78.286 kişidir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024). Ülkemizde doğu ile batının, kuzey ile güneyin bağlantısını sağlayan Aksaray, yatırımcılar tarafından ilgi gören önemli illerimizden biridir. Aksaray'da şehir merkezinde dar bir alana sıkışmış eski sanayi sitesini daha modern altyapıya sahip hale getirmek, ekonomik kalkınmayı teşvik etmek ve halkın refahını arttırmak amacıyla yeni bir sanayi sitesi kurulmuştur. KGM tarafından D750-12 olarak adlandırılan Aksaray-Adana yolunun 6. km'sinde yapılan yoğun kapasiteye sahip sanayinin yüksek hacimli olacağı tahmin edilen sola dönüş talebini karşılamak amacıyla yenilikçi kavşak tasarımı yapılmıştır (Şekil 4).

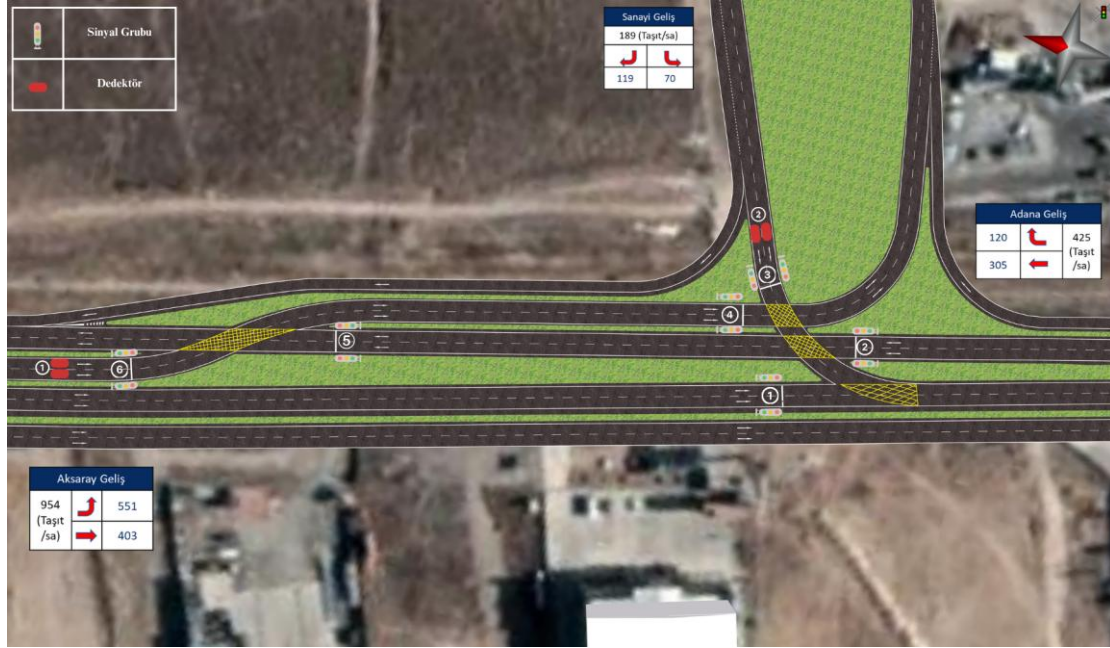


Şekil 4. Aksaray küçük sanayi sitesi kavşağı drone görüntüleri

3.2. Verilerin Elde Edilmesi

Trafik sayımları, yol üzeri ve yol kenarı olarak adlandırılan iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Yol üzeri sayımlarda kullanılan sistemler arasında pnömatik hortumlu sistemler, piezoelektrik sensörler, endüktif halka dedektörleri ve manyetik sensörler örnek olarak verilebilir. Yol kenarı sayım sistemleri ise mikrodalga radarları, aktif/pasif kızılötesi sensörler, ultrason/lazer destekli algılayıcılar ve manuel sayımlar gibi yöntemleri içermektedir. Kamera ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, bu sistemlerin tümü, kameralardan alınan video kayıtlarının görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak sayısallaştırılmasını içerecek şekilde genişletilebilir (Karagöz ve Akalın, 2017). Bu çalışma

kapsamında, Küçük Sanayi Kavşağı'nda bulunan sabit kameradan elde edilen görüntüler, 21.02.2024 tarihinde 08:30 ile 09:30 saatleri arasında kaydedilerek trafik sayımı yapılmıştır (Şekil 5). Kavşağı kullanan araçlar, otomobil, orta yüklü ticari taşıt (OYTT), otobüs ve ağır taşıt olmak üzere dört kategoriye ayrılmıştır. Zirve saatteki taşıt hacimleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 5. Taşıt hacimleri ve sinyalizasyon krokisi

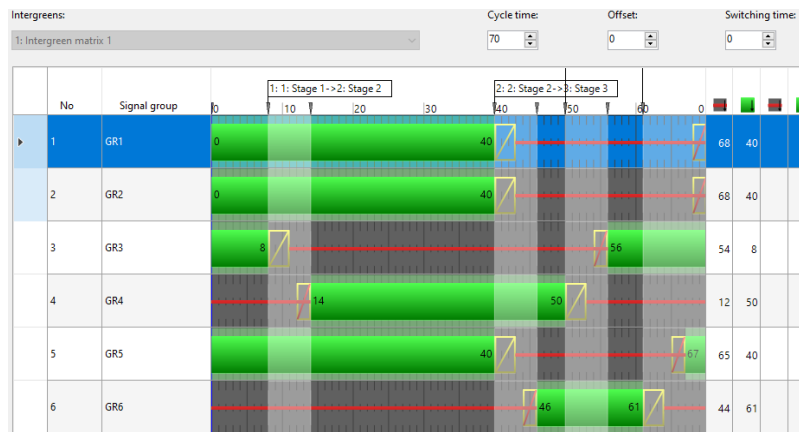
Tablo 1. Zirve saat taşıt hacimleri

Geliş Yönü	Otomobil	OYTT	Otobüs	Ağır Taşıt	Toplam (taşıt/sa)
Aksaray	553	87	9	305	954
Adana	222	39	7	157	425
Sanayi	136	25	-	28	189
Toplam	911	151	16	490	1568

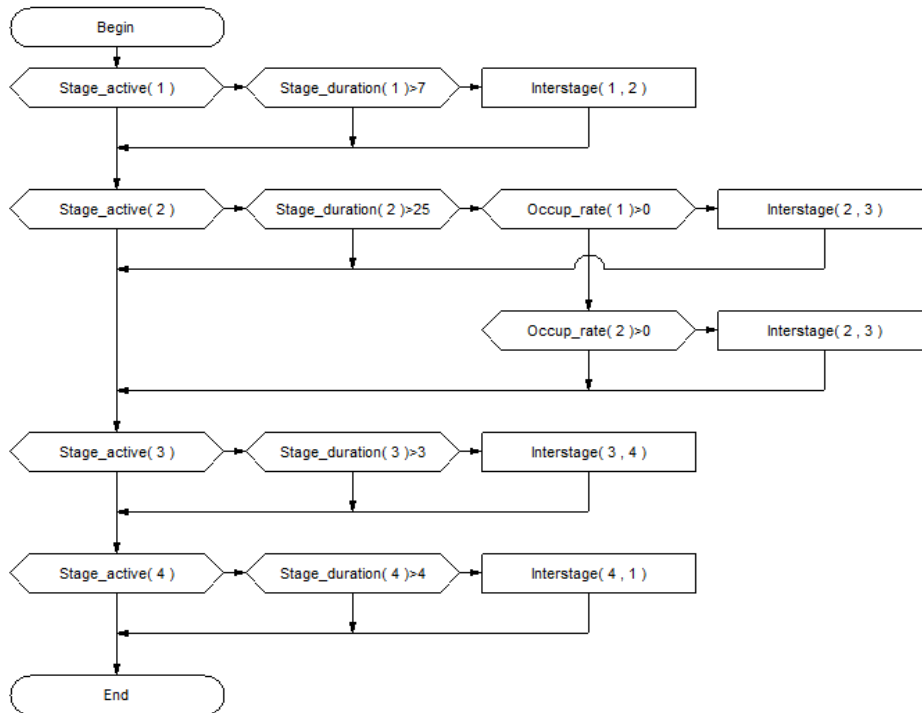
Yenilikçi alternatif kavşaklar tasarlanırken dikkate alınması gereken en kritik unsurlardan biri sinyal planıdır. Uygun bir sinyal planı, kavşak kapasitesini en üst düzeye çıkararak sıklığı azaltacak ve güvenliği artıracaktır. CFI, DLT gibi kavşak tasarımlarında, sola dönmek isteyen araçlar, deplase edilmiş yeni yola geçmek için sinyalize bir kavşaktan geçmektedir. Bu tür kavşaklar, genellikle tali kavşak olarak adlandırılmakla birlikte, bazı çalışmalarda çapraz kavşak olarak da tanımlanmaktadır. Sola dönecek araçlar, deplase edilmiş yola geçtikten sonra ana trafik akımıyla eş zamanlı hareket edebilmektedir. Dolayısıyla, bu tasarımda geleneksel dört fazlı kontrol edilebilen dört kollu kavşak, iki fazlı olarak çalıştırılabilir hale gelmektedir. Bu sayede, kavşağın kapasitesi ve işletme verimliliği önemli ölçüde iyileşirken, çakışma noktalarının azalması ile kavşak güvenlik performansında da iyileşmeler gözlemlenmektedir (Qi vd., 2020).

Kavşak bölgesinde, trafik hacmi, dönüş oranları ve geometrik tasarım esas alınarak sinyalizasyon sistemi tasarlanmıştır. Döngü ve yeşil süreleri, faz planı ve sırası, kavşak geometrisine uygun şekilde VISSIG'de hazırlanmıştır (Şekil 6). Ardından, yarı uyarmalı bir VISVAP kontrol modeli oluşturulmuştur. Bu modelin temel amacı, kavşak yaklaşımlarındaki dalgalanan trafik taleplerine adaptasyon sağlayarak ortalama araç gecikmelerini minimize etmek, yakıt tüketimini ve egzoz

emisyonlarını azaltmak ve tali yollarda araç olmadığı zamanlarda gereksiz beklemleri önlemektir. Kavşakta tanımlanan altı hareket grubunun her biri, farklı trafik akımlarını temsil etmektedir. Aksaray yönünden gelen sola dönüşler ve sanayi yönünden gelen sola dönüşler için, yaklaşım şeritlerinin her birine ayrı ayrı yerleştirilen dedektörler aracılığıyla anlık araç varış bilgisi alınarak yeşil ve kırmızı sinyal süreleri dinamik olarak ayarlanmaktadır. Geliştirilen VISVAP modelinde, esnek faz geçişi özelliği sayesinde, herhangi bir yaklaşımda talep algılanmadığı takdirde ana yolun akışı kesintisiz bir şekilde sağlanabilmektedir. Ana yol fazı olan Stage 2 (GR1, GR2, G4, G45) için minimum yeşil süre 25 saniye olarak belirlenmiş olup, bu sürenin sonunda Dedektör 1 ve Dedektör 2 periyodik olarak sorgulanmakta ve talep durumunda uygun faz geçişi gerçekleştirilmektedir. Aksi takdirde, her döngüde dedektör kontrolü yapılarak ana yolun yeşil süresi uzatılmaktadır. Geliştirilen kontrol mantığının karar süreçleri ve faz geçişleri, Şekil 7’de sunulan akış çizelgesinde detaylandırılmaktadır. Literatürdeki genel uygulamalar doğrultusunda, trafik hacmi ile ilişkili olarak dedektörler genellikle dur çizgisinden 15 m ile 45 m mesafede konumlandırılmakta olup (Çakıcı vd., 2022), bu çalışmada dedektörler dur çizgisinden 20 metre geriye yerleştirilmiştir. Yerleştirilen dedektörler sayesinde taşıtların geçiş öncelikleri ve süreleri tespit edilmekte ve geliştirilen algoritma ile kavşak koordineli bir şekilde yönetilmektedir.



Şekil 6. VISSIG’de oluşturulan sinyalizasyon faz diyagramı



Şekil 7. VISVAP’da oluşturulan yarı uyarımlı sinyalizasyon algoritması

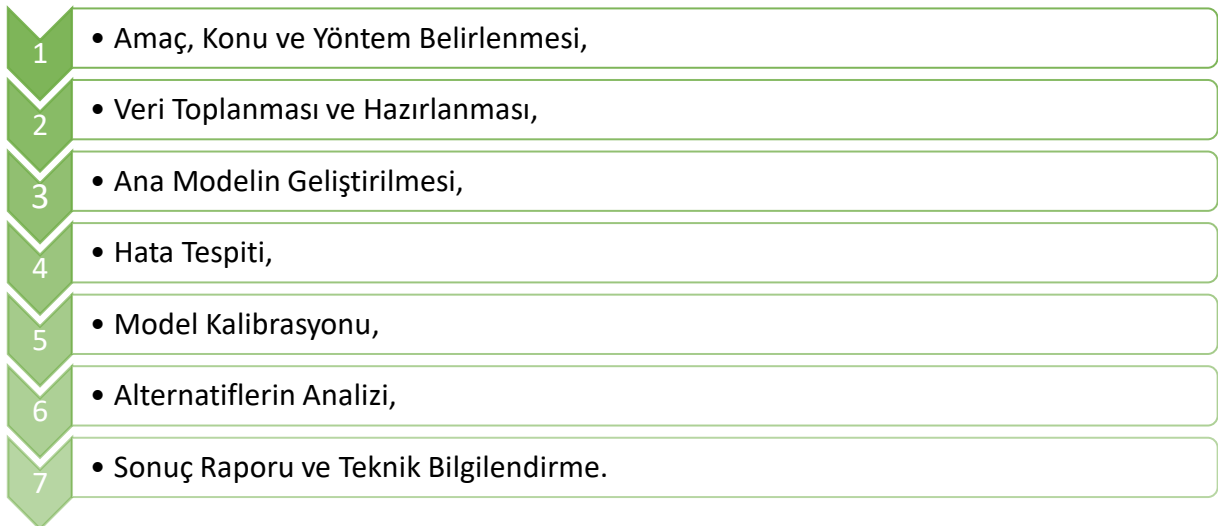
3.3. Benzetim Modelinin Geliştirilmesi

Söz konusu çalışmada, benzetimlerin gerçekleştirilmesi için Almanya menşeli PTV Grup tarafından üretilen VISSIM programının Corridor 2022 sürümü kullanılmıştır. VISSIM, özel araç trafiği, lojistik hizmetleri, toplu taşıma, yayalar ve bisikletliler gibi tüm yol kullanıcılarını ve bunların etkileşimlerini birleşik bir modelde entegre eden mikro ölçekli bir simülasyon yazılımıdır (PTV, 2024). Program, saniyeden daha kısa zaman aralıklarıyla bireysel taşıt hareketlerinin benzetimine imkân sağlayarak mikro ölçekte stokastik bir modelin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. VISSIM programının kullanım alanları, Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8. PTV vissim kullanım alanları

Çalışmada, problemlerin belirlenmesi, önerilerin geliştirilmesi ve üzerinde denemelerin yapılabilmesi için gerekli parametrelerle birlikte modelleme yapılmıştır. Model oluşturulurken izlenen adımlar, Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 9. Modelleme süreci

3.4. Kalibrasyon

Simülasyon sonuçlarının doğruluğu, mevcut trafik koşullarını doğru bir şekilde temsil etme yeteneklerine bağlıdır. Ölçülen trafik sayım değerlerinin simülasyondan elde edilen değerlerle uyumluluğu, ancak kalibrasyon ile sağlanabilir. Kalibrasyon, simülasyon sonuçlarının saha koşullarıyla uyumlu olmasını sağlamak amacıyla simülasyon modeli parametrelerinin ayarlanması sürecidir. Simülasyonda kullanılan değerler ve sahada elde edilen sayım verileri, Geoffrey E. Havers istatistiği (GEH) adı verilen ki-kare istatistiğiyle karşılaştırılmalıdır. GEH istatistiği, ulaşırma mühendisliğinde trafik modellemelerinde iki değerin mukayesesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Adını ulaşım plancısı Geoffrey E. Havers'den alan GEH istatistiği, trafik mühendisliğinde sıkça başvuru alan ampirik bir formüldür (Koç, 2010).

Model oluşturulduktan sonra, simülasyonun kavşağın gerçek durumunu mümkün olduğu kadar doğru yansıtabilecek şekilde kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi, yaygın yöntemlerden Denklem (1)'deki GEH istatistiği formülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (1)$$

Denkleminde M harfi simülasyonda ölçülen trafik hacmini, C harfi ise sahada yapılan ölçüm değerlerini temsil etmektedir. GEH değeri 0-5 veya 5-10 arasında olmalıdır. Ancak geçerli kural, tüm GEH değerlerinin %80-85'inin 5'in altında olmasıdır (Yiğit, 2019). Hesaplanan GEH değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. GEH istatistiği çıktılarına göre kalibrasyonun sonucunda, tüm aksların istatistiksel değeri 5'in altında çıkmıştır.

Tablo 2. GEH değerleri

Yönlere	Model (Taşıt/sa) (M)			Ölçüm (Taşıt/sa) (C)			GEH		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Senaryo									
Aksaray Geliş	920	1388	1854	954	1431	1908	1,1	1,2	1,3
Adana Geliş	472	710	943	425	638	850	2,2	2,8	3,1
Sanayi Geliş	174	245	341	189	284	378	1,1	2,4	2,0

4. Analiz ve Bulgular

Bu çalışmada, araçların geometrik tasarım, sinyalizasyon ve diğer trafik yönetimi faktörleri gibi unsurlar nedeniyle maruz kaldığı gecikmeler ve beklemler dikkate alınarak toplam kavşak geçiş süreleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Gecikme, bir aracın ideal koşullar altında (hiçbir bekleme olmadan) kat etmesi gereken süre ile, gerçekte o aracın kat ettiği süre arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (TRB, 2010). Bu gecikmeler, trafik akışının verimliliğini ve yol kullanıcılarının deneyimini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olup, kavşaklardaki verimli yönetim açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, Highway Capacity Manual (HCM) standartları çerçevesinde tanımlanan gecikme süreleri, kavşağın hizmet seviyesinin belirlenmesinde kullanılan temel kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. HCM kriterlerine göre gecikme süreleri, kavşağın trafik performansını anlamak ve farklı trafik yükleri altında hizmet seviyesini tespit etmek için önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Elde edilen gecikme süreleri, kavşağın trafik kapasitesine, sinyalizasyon stratejilerine ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermekte, bu da kavşağın farklı senaryolarda nasıl performans gösterdiği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda, gecikme sürelerinin analizi, trafik akışını daha verimli hale getirebilmek için potansiyel iyileştirme alanlarının tespit edilmesine yardımcı olmaktadır.

Mevcut trafik sayımları ile yapılan analiz sonucunda, söz konusu kavşak tasarımında ölçülen ortalama gecikme süresi 12,44 saniye olarak belirlenmiş ve bu değer Hizmet Seviyesi (LOS) B olarak sınıflandırılmıştır. Trafik hacminde %50 oranında bir artışın simüle edildiği ikinci senaryoda ise ortalama gecikme süresinin 15,99 saniyeye yükseldiği gözlemlenmiş olup, bu durum da Hizmet Seviyesi B aralığında kalmıştır. Ancak, trafik hacminde %100 oranında bir artışın öngörüldüğü üçüncü senaryoda ortalama gecikme süresi 21,72 saniyeye ulaşmış ve hizmet seviyesi C olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, artan trafik yoğunluğunun gecikme sürelerini kademeli olarak artırdığını ve hizmet seviyesinin belirli bir noktaya kadar istikrarlı bir şekilde sürdüğünü göstermektedir.

Trafik akışındaki bozulmanın bir diğer göstergesi olan seyahat süreleri de analiz edilmiştir. Mevcut trafik koşullarında toplam seyahat süresi 65 saat olarak tespit edilirken, trafik hacimlerinde %50 oranında bir artışın öngörüldüğü senaryoda bu değer 101 saate yükseldiği belirlenmiştir. Trafik hacminde %100 oranında bir artışın simüle edildiği senaryoda ise toplam seyahat süresi 148 saat olarak hesaplanmıştır. Bu durum, gelecekte yapılacak iyileştirmeler ve optimizasyonlarla trafik akışının daha verimli hale getirilebileceğini ve seyahat sürelerinin azaltılabileceğini göstermektedir. Yapılacak iyileştirmeler, trafik yoğunluğunun yönetilmesine ve kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

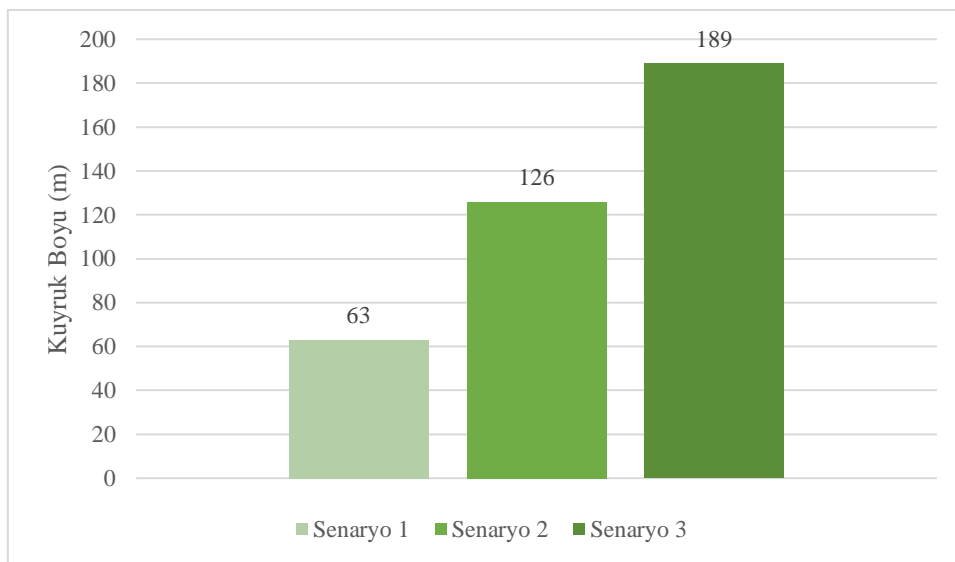
Ortalama hız değerleri, trafik yoğunluğundaki artıştan etkilenmiştir. Mevcut trafik koşullarında (birinci senaryo) ortalama hız 65 km/saat olarak ölçülmüş olup, trafik hacminde %50 artışın olduğu ikinci senaryoda bu değer %5 azalarak 62 km/saat olarak tespit edilmiştir. Trafik hacminde %100 artışın öngörüldüğü üçüncü senaryoda ise %12 oranında azalarak 57 km/saat seviyesine düşmüştür. Elde edilen bulgular, trafik hacminin artmasıyla birlikte ortalama hızlardaki düşüşün, gelecekteki kavşak tasarımları ve trafik yönetimi stratejileriyle daha verimli ve sürdürülebilir bir trafik akışının sağlanması için önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Bu durum, verimliliği artırmak ve trafik akışını iyileştirmek adına yapılan planlamaların daha etkili hale getirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Araçların yakıt tüketim değerleri analiz edilmiş ve trafik hacmindeki artışla birlikte yakıt sarfiyatında da belirgin bir yükseliş olduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda toplam yakıt tüketimi 121 litre olarak hesaplanmış olup, trafik hacminde %50 oranında bir artış yaşandığında bu değer 196 litreye yükselmiştir. Trafik hacmindeki %100'lük artış senaryosunda ise toplam yakıt tüketiminin 308 litreye ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 3). Bu bulgular, artan trafik hacminin enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması gerektiğini ve gelecekteki trafik yönetimi stratejileri ile yakıt tüketiminin daha optimize edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu sonuçlar, daha sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmek ve enerji verimliliğini artırmak adına önemli fırsatlar sunmaktadır.

Tablo 3. Simülasyon sonuçları

Parametre	Birim	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Gecikme Süresi	Saniye	12,44	15,99	21,72
Seyahat Süresi	Saat	65	101	148
Ortalama Hız	Km/h	65	62	57
Yakıt	Litre	121	196	308
Hizmet Seviyesi	HCM	B	B	C

Kavşak performans analizinde maksimum araç kuyruk boylarının, trafik yükündeki artışa paralel olarak belirgin bir yükseliş gösterdiği tespit edilmiştir. Senaryo 1'de (mevcut trafik) en uzun kuyruk 63 metre olarak ölçülmüşken, trafik hacminin %50 arttığı Senaryo 2'de bu değer 126 metreye ulaşmıştır. Trafik hacminde %100'lük bir artışın öngörüldüğü Senaryo 3'te ise maksimum kuyruk boyunun 189 metreye yükseldiği belirlenmiştir (Şekil 10). Bu bulgular, artan trafik yoğunluğunun kavşak kollarındaki araç birikimini artırdığına işaret etmekle birlikte, aynı zamanda bu durumun daha etkin trafik yönetim stratejileri ve iyileştirmeler için fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Özellikle, araç birikimindeki artış, kavşağın kapasitesinin sınırlarını test etmekte ve gelecekteki optimizasyon çalışmalarının öncelikli alanlarını belirlemektedir. Bu sayede, trafik akışını daha verimli hale getirecek çözümler ve tasarım düzenlemeleri için önemli veriler sağlanmaktadır. Önemli bir tasarım özelliği olarak, sola dönecek araçlar için ayrılmış depolama cepleri, ana trafik akışının kesintiye uğramasını etkili bir şekilde önlemektedir. Bu tür özel şeritler, sola dönüş yapacak araçların ana yol üzerinde bekleyerek akışı engellemesini önleyerek, trafik akışının sürekliliğini ve verimliliğini artırmaktadır. Böylece, gecikme sürelerinin azaltılmasına katkı sağlanmakta ve aynı zamanda olası trafik kazalarının önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır.

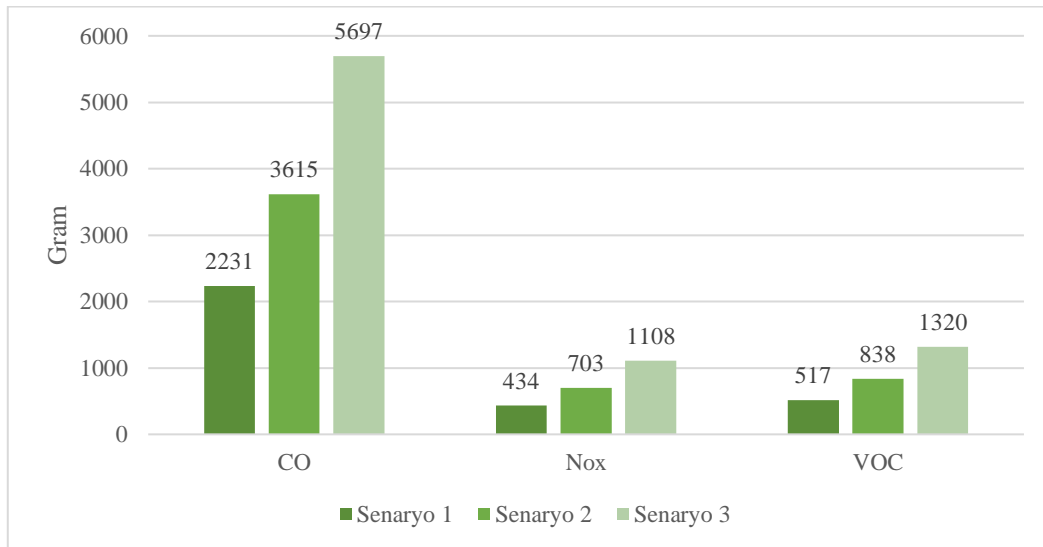
**Şekil 10.** Maksimum kuyruk boyları

Araç başına durma sayısının ölçülerek azaltılması, yakıt tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının en fazla olduğu durma ve kalkış anlarının en aza indirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece, bölgenin olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması sağlanırken, trafik sıkışıklığının ve beklemlerin düşürülmesi ile gürültü kirliliğinin de azaltılması mümkün hale gelmektedir. Bu durum, bölgede yaşayan sakinlerin trafikten kaynaklanan olumsuz etkilerinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019). Bu çalışmada araç başına saniye cinsinden durma gecikmesi ve araç başına durma sayısı incelendiğinde, bu değerler sırasıyla Senaryo 1’de 4,48 saniye ve 0,30, Senaryo 2’de 5,53 saniye ve 0,36, Senaryo 3’te ise 8,82 saniye ve 0,51 olarak tespit edilmiştir. Modelde bulunan araçların toplam durma sayıları ise sırasıyla 474, 861 ve 1699 olarak belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Durma gecikmesi ve sayısı

Parametre	Birim	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Durma Gecikmesi	Saniye	4,48	5,53	8,82
Araç Başına Durma Sayısı	-	0,30	0,36	0,51
Toplam Araç Durma Sayısı	-	474	861	1699

Kavşak tasarımları oluşturulurken, çevresel etkilerin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Taşıt trafiğinin ve gecikmelerin azaltılması ile kavşağın hizmet seviyesinin iyileştirilmesinin yanı sıra, çevre dostu planlamaların hayata geçirilmesiyle doğal çevrenin korunması da sağlanmalıdır. Bu çalışmada, taşıtlardan kaynaklı emisyonlar incelendiğinde, Senaryo 1’de karbon monoksit (CO; Carbon Monoxide), nitrik oksit (NOx; Nitric Oxide) ve uçucu organik bileşikler (VOC; Volatile Organic Compound) emisyon değerleri sırasıyla 2231 g, 434 g ve 517 g olarak tespit edilmiştir. Trafik hacminin %50 arttırıldığı Senaryo 2’de ise bu değerler 3615 g, 703 g ve 838 g olarak belirlenmiştir. %100 trafik artışının simüle edildiği Senaryo 3’te ise emisyon miktarları sırasıyla 5697 g, 1108 g ve 1320 g seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 11). Bu bulgular, trafik hacmindeki artışın çevresel etkilerini yönetmenin ve hava kalitesini iyileştirmeye yönelik sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmenin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Emisyon değerleri

Maryland eyaletinde gerçekleştirilen bir araştırmada kullanılan CFI kavşak tasarımlarının kaza sıklığı, kaza şiddeti, durma gecikmesi ve kuyruk boylarında azalmalar sağlandığı belirlenmiştir. Bu tasarımın, trafik güvenliğini artırdığı ve sürücülerin tedirginliğini azalttığı ortaya konmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, CFI tasarımlarının ana yol geçişleri ve sola dönüş hareketlerindeki gecikmeleri önemli ölçüde azalttığı, aynı zamanda çakışma noktalarını belirgin bir şekilde iyileştirdiği tespit edilmiştir (Kim vd., 2007). Kavşaklardaki ayrılma, katılma, kesişme ve örülme gibi farklı trafik hareketlerinin gerçekleştiği noktalar, güvenlik açısından kritik alanlar olarak değerlendirilmektedir. Literatürde yapılan araştırmalara göre, geleneksel üç kollu bir kavşakta toplam 9 çakışma bulunduğu tespit edilmiştir (Ordu ve Kırbaş, 2021). Araç etkileşimlerinin yoğunlaştığı bu bölgelerde, çarpışma riski de artmaktadır. Ancak, CFI kavşak tasarımında çakışma noktaları birbirinden uzaklaştırılarak trafik akışının daha düzenli hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu düzenleme, trafik güvenliğini önemli ölçüde artırmakta ve çakışma risklerini minimize etmektedir. Çakışma noktalarının dağınık bir şekilde konumlanması, sürücüler için daha az tedirgin edici bir sürüş deneyimi sunarken, geleneksel üç kollu kavşaklarda çakışma noktalarının belirli alanlarda yoğunlaşması güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir. CFI modeli, bu sorunu ortadan kaldırarak daha güvenli ve akıcı bir trafik akışı sağlamaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Kavşak kesişme noktaları

5. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, sanayiye girişin daha fazla olduğu sabah zirve saatindeki trafik yoğunluğu dikkate alınarak kavşaklar simülasyon programı ile analiz edilmiştir. Simülasyonda, kavşağın performans kriterlerinden gecikme süresi, toplam seyahat süresi, ortalama hız değeri, yakıt tüketimi, maksimum ve ortalama kuyruk boyu, araç başına durma gecikmesi, araç başına durma sayısı, toplam durma sayısı, CO, NO_x ve VOC emisyon değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, kavşağın performansının değerlendirilmesinde gecikme süresi kullanılarak hizmet seviyesi tespit edilmiş ve geometrik tasarımdan hareketle çakışma noktası analizi gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre;

- Kavşak bölgesindeki sola dönüş talebinin %58 mertebelerinde olduğu tespit edilirken, bölgedeki ağır taşıt hacminin yaklaşık %31 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Ortalama gecikme süresi Senaryo 1’de 12,44, Senaryo 2’de 15,99 ve Senaryo 3’de ise 21,72 saniye olarak tespit edilmiştir.
- HCM kriterleri çerçevesinden bakıldığında Senaryo 1’de 12,44 sn’lik gecikme süresi ile kavşağın hizmet seviyesi B, Senaryo 2’de 15,99 ile B ve Senaryo 3’de 21,72 ile C olarak tespit edilmiştir.
- Trafik hacmindeki artış, toplam seyahat sürelerinde de belirgin bir artışa neden olmaktadır. Mevcut koşullarda toplam seyahat süresi 65 saat olarak ölçülürken, %50 trafik artışında 101 saate, %100 trafik artışında ise 148 saate çıkmıştır.

- Artan trafik yoğunluğu, araçların ortalama hızlarını düşürmektedir. Mevcut durumda 65 km/saat olan ortalama hız, %50 trafik artışında 62 km/saate (%5 düşüş), %100 trafik artışında ise 57 km/saate (%12 düşüş) gerilemiştir
- Senaryo 1’de 121 litre, Senaryo 2’de 196 litre ve Senaryo 3’de 308 litre yakıt tüketimi tespit edilmiştir.
- Senaryo 1’de maksimum kuyruk boyu 63 m iken Senaryo 2’de 126 m, Senaryo 3’de ise 189 m mertebesinde gözlemlenmiştir.
- Araç başına saniye cinsinden durma gecikmesi ve araç başına durma sayısı sırası ile Senaryo 1’de 4,48 sn ve 0,30, Senaryo 2’de 5,53 sn ve 0,36, Senaryo 3’de ise 8,82 sn ve 0,51 olarak tespit edilmiştir. Toplam durma sayısı ise sırası ile 474, 861 ve 1699 olarak tespit edilmiştir.
- CO, NOx ve VOC gibi zararlı gaz salınımlarının sırası ile Senaryo 1’de 2231 g, 434 g, 5517 g, Senaryo 2’de 3615 g, 703 g, 838 g, Senaryo 3’de ise 5697 g, 1108 g, 1320 g mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Trafik güvenliğini doğrudan etkileyen kavşak bölgesindeki çakışmaların bir birinden uzaklaştırıldığı ve bu sayede sürücü tedirginliklerinin azaltılarak trafik güvenliğinin artırıldığı tespit edilmiştir.

CFI kavşak tasarımı, kavşak kapasitesini artırmak için sağa ve sola dönüşler hareketlerine ilave yollar eklenmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu tasarım, yolların fiziksel olarak ayrılması sayesinde ana yol ile sola dönüşlerin birbirini etkilememesini sağlamaktadır. Ayrıca, kesişim noktalarının uzak mesafelerde yer alması, çakışma olasılıklarını azaltarak kaza riskini önemli ölçüde düşürmektedir. Çalışmada, kavşak bölgesindeki durma sayısının, gecikme süresinin ve trafik akışındaki kesintilerin azaltılmasıyla birlikte, yakıt tüketimi ve zararlı gaz salınımının da önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çevreye verilen zararların azaltılması açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır. Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ile trafik güvenliğinin artırılması, seyahat sürelerinin azaltılması, yol kapasitelerinin ve enerjinin verimli kullanılması gibi hedeflere ulaşılması amaçlanmıştır. Bu sayede, hem çevre dostu bir yaklaşım benimsenmiş hem de taşıma sistemlerinin verimliliği artırılmıştır.

Ülkemizde ilk defa Aksaray’da uygulanan ve yüksek verimlilikle çalışan CFI kavşağı, kısa sürede diğer şehirlerde de uygulanarak geniş bir alanda fayda sağlamıştır. Karabük Kardemir, Bingöl Düzağaç (Gündoğdu), Kütahya Germiyan ve Zafertepe kavşaklarında da bu tasarım başarıyla hayata geçirilmiştir. Bu kavşak tasarımı, dünyada CFI, DLT ve XDL olarak adlandırılmakta olup, ülkemiz literatürüne “Deplase Sola Dönüş Kavşağı (DSD)” adıyla eklenmesi önerilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, farklı trafik yönetim stratejilerinin (adaptif sinyalizasyon, dinamik yönlendirme vb.) CFI kavşaklarının performansına olan etkilerini incelemeye yönelik olabilir. Ayrıca, uzun vadeli veri analizleriyle kavşağın operasyonel verimliliği değerlendirilmeli ve alternatif geometrik düzenlemelerle optimizasyon çalışmalarına gidilmelidir. Çevresel etkilerin daha kapsamlı şekilde ele alınabilmesi için hava kalitesi, gürültü kirliliği gibi parametrelerin de detaylı bir şekilde analiz edilmesi önerilmektedir. Bu sayede, kavşak tasarımının çevresel sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi sağlanabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışmada herhangi bir destek alınmamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Aydın, M. M.** (2017). *Şehirçi Kavşaklardaki Geometrik Disiplinsizliğin Optimize Edilerek İrdelenmesi* [Doktora Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi.
- Al-Omari, M.** (2021). *Evaluation of Unconventional Signalized Intersections on Arterial Roads and a Proposition for a Novel Intersection Design*.
- Cakici, Z. , Murat Y. S., Aydın, M. M.** (2022). *Design of an efficient vehicle-actuated signal control logic for signalized intersections*. *Scientia Iranica*, 29(3), 1059-1076. doi: 10.24200/sci.2021.57231.5126
- Dadashzadeh, N.** (2019). *Effects of Bus Priority Methods on Adjacent Mixed Traffic* [Ph.D. Thesis]. Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University.
- Duraku, R., Boshnjaku, D.** (2024). *Enhancing Traffic Sustainability: An Analysis of Isolation Intersection Effectiveness through Fixed Time and Logic Control Design Using VisVAP Algorithm*. *Sustainability*, 16,2930. <https://doi.org/10.3390/su16072930>.
- Guo, Y., Ma, J.** (2016). *An Improved Actuated Signal Control of Intersection Based on VISVAP*. *6th International Conference on Sensor Network and Computer Engineering (ICSNCE 2016)*. Xi'an, China, 8–10 July 2016; Atlantis Press: Dordrecht, TheNetherlands, 2016; pp. 123–128.
- Güler, H.** (2016). *Trafik Simülasyon Teknikleri – 1. Hafta Ders Notları*.
- Karagöz, Ö., & Akalın, K. B.** (2017). Kent içi Trafik Sayımlarında Düşük Maliyetli Kameraların Performansının Araştırılması. *Transist Uluslararası İstanbul Ulaşım Kongresi ve Fuarı*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2019). *Karayolu Sinyalizasyon Sistemleri*. Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2022). *Karayolu Tasarım El Kitabı*. Etüt, Proje ve Çevre Dairesi Başkanlığı.
- Khliefat, I., Deeb, A., Mubarak, M., & Naser, M.** (2021). The effect of modifying double continuous flow intersections layout geometric features on their operation. *The Open Transportation Journal*, 15(1).
- Kim, M., Chang, G.-L., & Rahwanji, S.** (2007). *Unconventional arterial intersection designs initiatives*. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Seattle*.
- Koç, H.** (2010). *Eşdüzey Kavşaklardan Katlı Kavşaklara Geçiş Örnekleri ve Uygunluklarının Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Koukol, M., Pribyl, O.** (2013). *Design Methodology of a Fuzzy Control System in PTV VISSIM*. *Transactions on Transport Sciences*. 6, 4. DOI: 10.2478/v10158-012-0045-9.
- Mitkas, D., Politis, I.** (2020). *Evaluation of alternative Ramp Metering scenarios on freeway on-ramp with the use of microscopic simulation software Vissim*. *AIIT 2nd International Congress on Transport Infrastructure and Systems in a Changing World (TIS ROMA 2019)*, 23rd-24th September 2019, Rome, Italy.
- North Dakota Department of Transportation (NDDOT).** (2023). *NDDOT Programming Division Traffic Operations Section, Traffic Operations Manual*.
- Ordu, H., Kırbaş, U.** (2021). *Dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımlara bir çözüm önerisi olarak kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar: Bir literatür araştırması*. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 10(2), 674-683.

Pandza, H., Ivanjko, E., Vujic, M. (2015). *A Vissim Based Framework for Simulation of Cooperative Ramp Metering*. In *Proceedings of the International Scientific Conference ZIRP 2015: Cooperation Model of the Scientific and Educational Institutions and the Economy*, Zagreb, Croatia, 12 May 2015; pp. 151–162.

PTV Group. (2024, Mayıs 14). *Multimodal Traffic Simulation Software*. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>.

Qi, Y., Zhao, Q., Liu, S., & Azimi, M. (2020). *Signal Timing Strategy for Displaced Left Turn Intersections*. University of North Carolina at Charlotte.

Sesli, G. (2017). *Kent İçi Kavşak Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019). *Akıllı Şehir Rehberlik Uygulamaları Projesi-Ulaşımında Sanal İkiz ve Simülasyonu Uygulaması*. Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2024, Haziran 8). *Aksaray İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü*. <https://aksaray.ktb.gov.tr/#>.

T.C. Resmî Gazete. (1983). 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu. *Resmî Gazete*. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.2918.pdf>

Transportation Research Board (TRB). (2010). *Chapter 18 Signalized Intersections*. *HCM2010 Highway Capacity Manual* (pp. 18-6).

Usta, D. (2023). *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Çevreye Etkisi:Kavşak Çalışması* [Yüksek Lisans Tezi]. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

U.S. DOT Federal Highway Administration (FHWA). (2010). *Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report (AIIR)*.

U.S. DOT Federal Highway Administration (FHWA). (2014). *Displaced Left Turn Intersection, Informational Guide (C.3)*.

Yaman, T. (2024). *Farklı Trafik Uyarmalı Sinyalize Kavşakların Performanslarının Karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.

Yaman, N., & Kaman, F. (1979). *Orta Dereceli Endüstriyel Teknik Öğretim Okulları Yol Bilgisi Temel Ders Kitabı*. Milli Eğitim Basımevi.

Yayla, N. (2015). *Karayolu Mühendisliği*. Birsen Basımevi. Birsen Basımevi.

Yılmaz, H. (2024). *Yenilikçi Sinyalize Kavşak Tasarımlarının Araştırılması ve Mikro Simülasyon İle Analiz Edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

Yiğit, H. İ. (2019). *Koordine Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modellemesi: Ulus Bulvarı Örneği, Denizli* [Yüksek Lisans Tezi]. T.C. İstanbul Ticaret Üniversitesi.

Url-1 <<https://mix106radio.com/continuous-flow-intersection-on-eagle-road-canceled>>, erişim tarihi 13.05.2024.