

International Journal of Western Black Sea Engineering and Science

e-ISSN: 2687-2927

<https://dergipark.org.tr/pub/umufed>

Reducing Delay and Queue Lengths at Signalized Intersections Using Scenario-Based Simulation Analysis of Traffic Signal Timing

Mesut YAŞAR^{1,a,*}¹ Varaka Kağıt A.Ş., Türkiye^a yasarmesut10@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8573-0197

Highlights

- Traffic flow at a main entrance signalized intersection was analyzed using scenario-based simulation in Arena.
- The developed simulation model evaluated vehicle delay times and queue lengths using real traffic data.
- The optimized signal timing scenario (Scenario 19) reduced the average delay at the Bi1 queue point by 43.88% and the number of waiting vehicles by 53.63%.
- The obtained improvements are consistent with findings reported in similar international traffic signal optimization studies.
- The study demonstrates that scenario-based simulation provides an effective and low-cost approach for optimizing signal timings and improving intersection performance.

Article Info

Received:
22/09/2025
Accepted:
09/02/2026
Published:
23/03/2026

Keywords

Simulation
Junction
Delay times
Traffic light
Traffic flow

Cite as

Yaşar, M., "Işıklı Kavşaklarda Trafik Sinyal Sürelerinin Senaryo Tabanlı Simülasyon Analizi İle Gecikme ve Kuyruk Uzunluklarının Azaltılması", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8(1): 1-36, 2026.

* Corresponding author

Mesut Yaşar
Yasarmesut10@gmail.com

Abstract

In this study, the reduction of delays and vehicle queues at a major intersection experiencing traffic flow problems during peak hours was aimed through the optimization of traffic signal timings. As the study area, an intersection exhibiting high traffic density particularly between 14:00 and 15:00 was selected.

The existing traffic conditions at the intersection were systematically analyzed, and a simulation-based model was developed based on collected data including vehicle counts, travel times, and traffic volumes. Using the Arena software, the effects of different signal timing scenarios were tested, and system performance was evaluated based on delay times and queue length criteria.

The analyses indicated that the Beta distribution was suitable for modeling traffic flow on Roads 1 and 3, while the Normal distribution was appropriate for Road 2. Under the most suitable scenario, the average delay time was reduced by 43.88%, and the number of waiting vehicles decreased by 53.63%.

These findings are consistent with the improvements reported in similar studies in the literature. The study contributes to the academic body of knowledge and provides a basis for the development of applicable traffic management strategies at the intersection level.



Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi

e-ISSN: 2687-2927

<https://dergipark.org.tr/pub/umufed>

Işıklı Kavşaklarda Trafik Sinyal Sürelerinin Senaryo Tabanlı Simülasyon Analizi İle Gecikme ve Kuyruk Uzunluklarının Azaltılması

Mesut YAŞAR^{1,a,*}¹ Varaka Kağıt A.Ş., Türkiye^a yasarmesut10@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8573-0197

Öne Çıkanlar

- Ana girişte bulunan bir sinyalizasyon kavşağındaki trafik akışı, Arena yazılımı kullanılarak senaryo tabanlı simülasyon yöntemiyle analiz edilmiştir.
- Oluşturulan simülasyon modeli, gerçek trafik verilerini kullanarak araç gecikme sürelerini ve kuyruk uzunluklarını değerlendirmiştir.
- Optimize edilen sinyal süresi senaryosu (Senaryo 19), Bi1 kuyruk noktasındaki ortalama gecikmeyi %43,88 ve bekleyen araç sayısını %53,63 oranında azaltmıştır.
- Elde edilen iyileşmeler, trafik sinyal optimizasyonu üzerine yapılan benzer uluslararası çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur.
- Çalışma, senaryo tabanlı simülasyonun kavşak performansını iyileştirmek ve trafik sinyal sürelerini optimize etmek için etkili ve düşük maliyetli bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Makale Bilgisi

Geliş:

22/09/2025

Kabul:

09/02/2026

Yayın:

23/03/2026

Anahtar Kelimeler

Simülasyon

Kavşak

Gecikme süreleri

Trafik ışığı

Trafik akışı

Atıf

Yaşar, M., "Işıklı Kavşaklarda Trafik Sinyal Sürelerinin Senaryo Tabanlı Simülasyon Analizi İle Gecikme ve Kuyruk Uzunluklarının Azaltılması", *UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1): 1-36, 2026.

* Sorumlu Yazar

Mesut Yaşar

yasarmesut10@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, trafik akışı sorunları yaşanan bir ışıklı kavşakta trafik sinyal sürelerinin senaryo tabanlı simülasyon analizi ile gecikme ve kuyruk uzunluklarının azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak, özellikle 14:00–15:00 saatleri arasında konumu gereği yüksek yoğunluk gözlenen bir kavşak seçilmiştir.

Kavşaktaki mevcut trafik düzeni sistematik biçimde analiz edilmiş; araç sayımları, geçiş süreleri ve trafik yoğunluğu gibi veriler toplanarak simülasyon tabanlı bir model oluşturulmuştur. Arena yazılımı kullanılarak farklı ışık süresi senaryolarının etkileri test edilmiş ve sistem performansı gecikme süreleri ile kuyruk uzunluğu kriterleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Analizler, yol 1 ve yol 3 için Beta dağılımı, yol 2 için ise normal dağılımın trafik akışını modellemek için uygun olduğunu göstermiştir. Elde edilen en uygun senaryoda ortalama gecikme süresi %43,88, bekleyen araç sayısı ise %53,63 oranında azalmıştır.

Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarda rapor edilen iyileşmelerle tutarlılık göstermektedir. Çalışma, hem akademik bilgi birikimine katkı sağlamakta hem de kavşak düzeyinde uygulanabilir trafik yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfusla paralel olarak taşıt sayısındaki çoğalma, trafik yoğunluğunu gün geçtikçe büyüyen bir sorun hâline getirmektedir [1]. Bu durum, ulaşım sistemlerinin güvenli ve verimli biçimde işletilebilmesi için trafik akışının doğru yönetilmesinin ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Özellikle yoğun saatlerde meydana gelen trafik koşulları, sürücülerin gecikme sürelerinin artmasına yol açmakta; bu durum hem genel ulaşım verimliliğinin düşmesine hem de yakıt tüketimi ve karbon ayak izi miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, Balıkesir’de yer alan sinyalize bir kavşakta, 14:00–15:00 saatleri arasında gözlemlenen trafik durumu, öğrenciler ve personelinin eğitim-öğretim saatlerinde yoğun olarak kavşağı kullanmaları nedeniyle kritik bir öneme sahip olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, söz konusu kavşaktaki mevcut trafik düzeninin sistematik bir biçimde analiz edilmesi, tıkanıklık noktalarının belirlenmesi ve trafik ışığı sürelerinin senaryo tabanlı analizi ile trafik akışının iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, kavşakta gerçekleştirilen trafik simülasyonu çalışmaları kapsamında 20 farklı senaryonun test edilmiş ve her bir senaryoda değişen ışık süreleri ve yön öncelikleri dikkate alınarak trafik akışının tepkileri gözlemlenmiştir. Elde edilen simülasyon çıktıları, ışık sürelerinin trafik üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı bir biçimde ortaya konmasını sağlamış ve en verimli sinyal zamanlamalarının belirlenmesine olanak tanımıştır.

Simülasyon, mevcut durumu kısa sürede anlamak için ucuz ve güçlü bir tekniktir. Karar verme sürecinin desteklenmesinde faydalı olabilmektedir [2].

Simülasyon süreci, mevcut trafik düzeninin görselleştirilmesine ve kavşaktaki potansiyel sorunların önceden tespit edilmesine olanak sağlamış; bu yönüyle trafik yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmıştır [3]. Araştırmada araç sayımları, geçiş süreleri ve trafik yoğunluğu gibi veriler toplanarak analitik yöntemlerle değerlendirilmiş ve mevcut sinyalizasyon sisteminin etkinliği bu veriler ışığında incelenmiştir. Elde edilen bulgular, yalnızca söz konusu kavşaktaki trafik sorunlarının çözümüne katkı sunmakla kalmayıp, benzer yoğunluklara sahip şehir içi kavşaklar için de uygulanabilir pratik öneriler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, çalışma yoğun alanlardaki trafik akışının iyileştirilmesine yönelik değerli bir referans niteliği taşımaktadır.

Trafik sinyal optimizasyonu, kent içi araç yoğunluğunun artması ve buna bağlı olarak ortaya çıkan trafik sıkışıklıkları nedeniyle son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun şekilde ele alınan bir konu haline gelmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada, sinyalize kavşaklarda trafik akışının iyileştirilmesine yönelik simülasyon tabanlı modelleme ve optimizasyon tekniklerinin etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Örneğin, İzmir’deki en yoğun sinyalize kavşaklardan biri olan Vakıflar Kavşağı’nda yürütülen bir çalışmada, kavşaktaki darboğazlar simülasyon ile tespit edilmiş ve bu sorunlara yönelik alternatif çözüm önerileri geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, doğu-batı yönlerinde önemli ölçüde kuyruklanmalar

yaşandığını göstermiştir. Bu sorunları gidermek amacıyla, doğu ve batı yönlerini bağlayan bir alt geçit modeli önerilmiş ve söz konusu modelin uygulanması sonucunda Şehitler Caddesi ile Kamil Tunca Bulvarı'ndaki araç gecikme süreleri ve kuyruk uzunluklarında belirgin azalmalar sağlanmıştır [4].

Geliştirilen zaman genişletilmiş döngü modeli ile trafik fazlarının ve yeşil sürelerin senkronizasyonu sağlanmış ve bu sayede trafik sıkışıklığında anlamlı bir azalma elde edilmiştir. Benzer şekilde, Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından geliştirilen SURTRAC sistemi ile dağıtık ve gerçek zamanlı sinyal kontrolü uygulanmış ve araç gecikme sürelerinde %40'a varan azalma sağlandığı raporlanmıştır [3].

NSGA-II algoritması kullanılarak gerçekleştirilen çok amaçlı optimizasyon çalışmalarında, trafik gecikmeleri, emisyonlar ve duruş sayısı gibi performans göstergelerinde anlamlı iyileşmeler elde edilmiştir [5]. Pekin'de yürütülen bir diğer çalışmada, araç başına gecikme süresini minimize eden bir model önerilmiş ve çeşitli senaryolar karşılaştırılarak en verimli sinyal süreleri belirlenmiştir [6]. Benzer şekilde, Bozeman'da yapılan bir vaka çalışmasında Synchro ve SimTraffic yazılımları aracılığıyla çevrim süresi ve faz dağılımı optimize edilmiş ve bu optimizasyon sonucunda gecikme sürelerinde %35'e varan azalmalar gözlemlenmiştir [7]. Ayrıca, literatürde yer alan diğer çalışmalar, klasik sabit zamanlı sistemlere kıyasla MARL (Çok Ajanlı Pekiştirmeli Öğrenme) temelli modellerin daha etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir [8].

Tüm bu bulgular, trafik simülasyonu kullanılarak farklı senaryolarda optimum sinyal sürelerinin belirlenmesinin, yoğun saatlerdeki kuyruklanmaları azaltma ve genel trafik verimliliğini artırma açısından önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Bu çalışmada, kavşak performansı mikro düzeyde modellenmiş, senaryo tabanlı simülasyon iyileştirmesi uygulanmış ve yerel trafik karakteristikleri dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, yalnızca literatürdeki yöntemlerle uyumlu sonuçlar elde edilmekle kalınmamış, aynı zamanda kavşak düzeyinde daha ayrıntılı ve genellenebilir bulguların ortaya konması sağlanmıştır.

1.1. Trafik Işık Kontrol Sistemlerinde Temel Kavramlar

Işıklı kavşaklarda trafik sinyal sürelerinin senaryo tabanlı simülasyon analizi ile gecikme ve kuyruk uzunluklarının azaltılması işlemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için bazı trafik terimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu başlık altında trafik kontrol sistemlerini oluşturan temel bileşenler açıklanmaya çalışılmıştır. Kavşak; iki ya da daha fazla karayolunun kesiştiği, birleştiği veya birbirinden ayrıldığı alanı ifade etmektedir. Kavşaklar çoğunlukla üç veya dört kollu olarak tasarlanmakta olup, dört koldan fazla kol içeren kavşak düzenlemeleri tercih edilmemektedir [9].

Kavşaklar, karayolu ulaşım sisteminin temel bileşenlerinden biridir [10]. Yapılan değerlendirmeler, şehir içi ve kırsal yol kesimlerinde gerçekleşen trafik kazalarının önemli bir bölümünün (%40–%60), yolların kesiştiği veya birleştiği eş düzey kavşak noktalarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, özellikle kentsel ulaşım ağlarında görülen toplam gecikmenin %70'ten fazlasının, söz konusu kavşaklarda yaşanan beklemelerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu bulgular, yol ve trafik mühendisliği

disiplininde kavşakların planlanması ve işletilmesine neden özel önem atfedildiğini açıklamaktadır [11]. Sinyalize kavşaklarda trafik akımlarının kontrolü, belirli zaman dilimlerine ayrılarak gerçekleştirilmektedir. Bu zaman dilimlerinden biri olan faz, farklı trafik hareketlerine geçiş izni tanınan süre aralığını ifade etmektedir. Bir akım için yeşil sinyalin aktif hale gelmesiyle başlayan bu süre, başka bir akıma yeşil ışık verilmesine kadar devam etmektedir [12].

Trafik akışında ortaya çıkan gecikme, araçların sinyalizasyon uygulamaları, kavşak geometrisi veya kaza gibi etkenler nedeniyle seyahat sürelerinin uzamasını ifade etmektedir ve trafik kontrol sistemlerinin etkinliğini değerlendirmede kullanılan temel performans göstergelerinden biridir [13]. Kuyruk uzunluğu ise kavşak yaklaşım kollarında biriken taşıt miktarını tanımlamakta olup, sinyal denetim algoritmalarının başarısını ölçmede trafik mühendisliği açısından önemli bir ölçüt olarak kabul edilmektedir [14].

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Çalışma, kent merkezine yakın ve araç sirkülasyonunun yoğun olduğu sinyalize bir kavşakta yürütülmüştür. Kavşak sistemi; trafik ışıkları, yol işaretlemeleri, geometrik düzenlemeler ve sürücü davranışları gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Örneklem alınan günlerde özellikle 14:00–15:00 saatleri arasında yoğun bir trafik akışı gözlemlenmiş olup, bu durum gecikme sürelerinin uzaması ve tıkanıklıkların oluşması ile sonuçlanmıştır.

Araştırmanın amacı, kavşaktaki mevcut trafik akışını nicel verilerle analiz etmek, tıkanıklık noktalarını belirlemek ve trafik ışığı sürelerini senaryo tabanlı simülasyon analizi yaparak sistem performansını artırmaya yönelik çözüm önerileri geliştirmektir. Bu kapsamda kavşağın mevcut durumu; geometrik yapısı, yaklaşım kolları, şerit sayıları, trafik işaretlemeleri ve sinyalizasyon sistemi dikkate alınarak detaylı biçimde incelenmiştir.

Veri toplama sürecinde, araç sayımları, geçiş süreleri ve trafik yoğunluğu gibi temel parametreler kaydedilmiş ve analitik yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu sayede kavşakta oluşan darboğazlar ve sorunlu bölgeler tespit edilmiştir. Toplanan veriler, simülasyon modelinin girdilerini oluşturmuş ve Arena yazılımı kullanılarak kavşak performansı görselleştirilmiş ve farklı sinyal süresi senaryoları test edilmiştir. Simülasyon sonuçları; ortalama gecikme süresi, araç kuyruk uzunluğu ve trafik akışındaki iyileşmeler gibi performans göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Kavramsal model, kavşağın fiziksel özellikleri ve trafik hacimleri ile birlikte mevcut sinyal faz düzeni esas alınarak; araç geçiş süreleri ve gecikme sürelerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulmuştur.

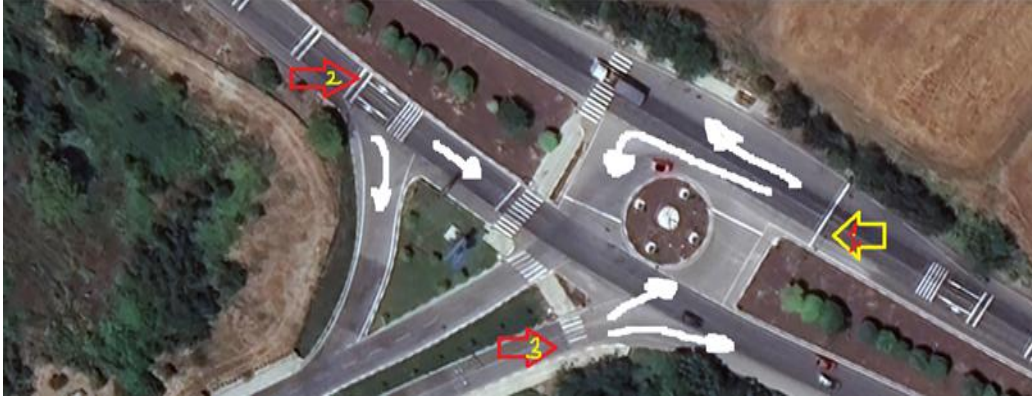
Model, tespit edilen tıkanıklık noktaları ve yoğun saatler göz önünde bulundurularak farklı senaryoların sistem üzerindeki etkilerini simüle edebilecek biçimde yapılandırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, yeşil ışık sürelerinin yoğun saatlere göre dinamik ayarlanması, faz sayılarının yeniden

yapılandırılması ve adaptif sinyalizasyon sistemlerinin entegrasyonu gibi pratik öneriler geliştirilmiştir. Bu öneriler hem ilgili kavşakta hem de benzer yapısal ve işlevsel özelliklere sahip diğer kavşaklarda uygulanabilir niteliktedir.

Çalışma, trafik mühendisliği, kentsel ulaşım planlaması ve simülasyon temelli analiz yöntemleri açısından yöntemsel ve uygulamalı katkı sağlamaktadır. Simülasyon tabanlı yaklaşım, trafik verilerine dayalı senaryo testleri ve senaryo tabanlı simülasyon iyileştirme odaklı çözüm önerileri ile kavşak performansının değerlendirilmesine örnek teşkil etmekte; ayrıca, ileride yapılacak akademik çalışmalara metodolojik bir temel sunarak yeni araştırma sorularının oluşmasına olanak tanımaktadır.

2.1. Problemin Çözümünde Kullanılan Yöntem

İlgili sinyalize kavşakta gözlemlenen trafik akış sorunlarının çözümüne yönelik olarak sistematik bir yaklaşım benimsenmiş ve çok aşamalı bir yöntem izlenmiştir. İlk adımda, kavşağın mevcut trafik düzeni ve sinyalizasyon yapısı kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında, kavşaktan geçen taşıt hareketleri ve yön bazlı geçiş tercihleri, sinyal fazları kapsamında ayrıntılı olarak incelenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İncelenen kavşağın geometrik yerleşimi ile 1, 2 ve 3 numaralı kolların yönsel tariflerinin gösterimi

Şekil 1’egöre, 1 numaralı kol üzerinde hareket eden araçların yaklaşık %80’i güney yönünde düz devam etmekte, yaklaşık %20’si ise sola dönüş yaparak yerleşim alanına giriş veya kuzey yönüne geri dönüş hareketi gerçekleştirmektedir. Geri dönüş yapan araçların oranının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

2 numaralı kol üzerinde ilerleyen araçların yaklaşık %90’ı kuzey yönünde düz hareketini sürdürmekte, yaklaşık %10’u ise sağa dönüş yaparak yerleşim alanına yönelmektedir.

3 numaralı kol üzerinde ise araçların yaklaşık %95’i sağa dönüş yaparak kuzey yönüne katılmakta, yaklaşık %5’i ise kavşak içerisinde dönüş hareketi gerçekleştirerek güney yönüne ilerlemektedir.

Gözlemler sonucunda, kuzeyden güneye doğru seyreden araçların önemli bir kısmının kırmızı ışıkta durmaksızın geçtiği ve bunun trafik güvenliğini ve yaya sağlığını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, güney kolundan kavşağa yaklaşan araçların görüş açısının geometrik eğrilik nedeniyle kısıtlandığı ve sinyal lambalarını geç fark etmeleri nedeniyle olası kaza riskinin arttığı tespit edilmiştir.

Mevcut sinyalizasyon sisteminde uygulanan zamanlamalar; kırmızı ışık için 33 saniye, yeşil ışık için 28 saniye ve sarı ışık için 3 saniye olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Mevcut sinyal faz düzeni kapsamında, kavşaktaki taşıt hareketleri arasındaki eşzamanlılık ve çakışma ilişkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, 1 numaralı koldan sola dönüş hareketine kırmızı ışık uygulanırken aynı zaman diliminde 2 numaralı kol için yeşil ışık aktif durumdadır. Ayrıca, 3 numaralı kol için yeşil ışık aktif olduğunda 2 numaralı kol kırmızı ışıkta beklemekte ve bu durum gecikmelere neden olmaktadır.

Bu yapısal ve davranışsal analizler, simülasyon modelinin girdilerini oluşturmakta ve kavşakta uygulanabilecek optimizasyon senaryolarına temel sağlamaktadır.



Şekil 2. Faz 1 ve Faz 2 süreleri

Veri toplama sürecinde, araç sayımları, geçiş süreleri ve trafik yoğunluğu gibi temel veriler derlenmiştir. Elde edilen bu veriler, kavşaktaki trafik akışında meydana gelen tıkanıklık noktalarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Verilerin analizi aşamasında çeşitli istatistiksel ve analitik yöntemler kullanılmış; böylece trafik sıkışıklıklarının nedenleri ve bu sıkışıklıkların sistem üzerindeki etkileri daha ayrıntılı biçimde anlaşılmıştır.

Kavşak simülasyonları, özellikle Arena gibi gelişmiş simülasyon yazılımları aracılığıyla yürütülmüş ve farklı senaryoların test edilmesi ile mevcut sistemin görselleştirilmesi sağlanarak karmaşık sistemlerin gerçek ortamda müdahale edilmeden modellenmesi, farklı senaryoların düşük maliyetle analiz edilmesi ve güvenilir kararlar alınmasına olanak tanır. Arena yazılımı kullanılarak trafik akışı ve sinyalizasyon sistemi modellenmiş; en uygun trafik ışığı süreleri ve düzenlemelerin belirlenmesine yönelik senaryo bazlı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, toplanan veriler Excel gibi programlar kullanılarak işlenmiş ve değerlendirilmiş; bu sayede kapsamlı analizler yapılabilmektedir. Bu süreç sonunda, trafik ışığı

sürelerinin senaryo tabanlı simülasyon analizi ile uygulanabilir önerilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Söz konusu önerilerin, yerel trafik yönetimi uygulamalarıyla entegre edilerek kavşaktaki trafik akışının iyileştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Bu sistematik yaklaşım, kavşakta gözlemlenen yapısal trafik sorunlarının etkin biçimde çözümlenmesine zemin hazırlamıştır. Girdi analizleri kapsamında elde edilen dağılımlar ve bunlara ilişkin ortalama araç geçiş sayıları dikkate alınarak gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda, her bir yol için dakikada geçen araç sayılarının önceden belirlenen hipotezlerle tam olarak uyumlu olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan uygunluk testleri sonucunda, 1. ve 3. yol için Beta dağılımının, 2. yol için ise normal dağılımın uygun olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, trafik akışının modellenmesi açısından önemli referanslar sunmaktadır.

Ayrıca, Arena Input Analyzer sonuçlarına göre dakikada ortalama olarak 1 numaralı yoldan 11, 2 numaralı yoldan 8 ve 3 numaralı yoldan 9 araç geçtiği gözlemlenmiş ve simülasyon modeli oluşturulurken bu ortalamalar temel alınmıştır. Araç gelişleri arası süre ise 3 dakika olarak belirlenmiştir.

2.2. Kavramsal Modelin Kurulması

Kavramsal model, bir sistemin temel bileşenlerini, bu bileşenler arasındaki ilişkileri ve işleyiş mekanizmalarını görselleştirerek araştırmanın temel çerçevesini oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, sinyalizasyon bir kavşaktaki trafik akışının analizini gerçekleştirmek amacıyla bir kavramsal model geliştirilmiştir. Söz konusu kavşak, öğrenciler, öğretim üyeleri, hastane personeli ve hastaları tarafından yoğun olarak kullanılan bir ulaşım noktası olup, mevcut trafik düzeni trafik ışıkları, yol işaretleri ve kavşak yapısı gibi bileşenlerden oluşmaktadır.

Modele giren veriler arasında araç sayıları, geçiş süreleri ve trafik yoğunluğu gibi faktörler yer almakta, çıktılar ise gecikme süreleri, tıkanıklık noktaları ve trafik akışındaki iyileşmeler olarak tanımlanmaktadır. Kavşağı etkileyen faktörler arasında sürücü davranışları, hava koşulları ve zaman dilimi gibi unsurlar bulunmakta olup, bu unsurlar arasındaki etkileşimler trafik akışının dinamiklerini belirlemektedir.

Kavramsal modelin somutlaştırılmasında simülasyon yazılımları, özellikle Arena, kullanılmıştır. Bu yazılım, trafik akışının ve sinyalizasyon sisteminin görselleştirilmesini sağlamakta ve farklı senaryoların test edilmesine düşük maliyetle olanak tanımaktadır. Modelin kurulmasında bazı varsayımlar yapılmış olup, bunlar arasında trafik akışının belirli saatlerde sabit kalacağı, sürücülerin trafik kurallarına uygun davranacağı ve dışsal faktörlerin (hava durumu, etkinlikler vb.) minimum düzeyde olacağı öngörülmektedir.

2.2.1. Hedefler

Kavramsal modelin oluşturulmasındaki temel amaç, mevcut trafik akışının ayrıntılı biçimde analiz edilmesi, tıkanıklık noktalarının belirlenmesi ve bu doğrultuda etkili çözüm önerilerinin geliştirilmesidir.

Bu süreç hem akademik literatüre katkı sağlamayı hem de pratik trafik yönetimi uygulamalarına yön vermeyi hedeflemektedir. Bahsi geçen unsurlar bir araya getirilerek, sinyalize kavşağın trafik akışını kapsamlı biçimde temsil eden bir model geliştirilmiştir. Söz konusu model, ilerleyen aşamalarda gerçekleştirilecek simülasyon ve performans analizlerinde temel referans noktası olarak kullanılacaktır.

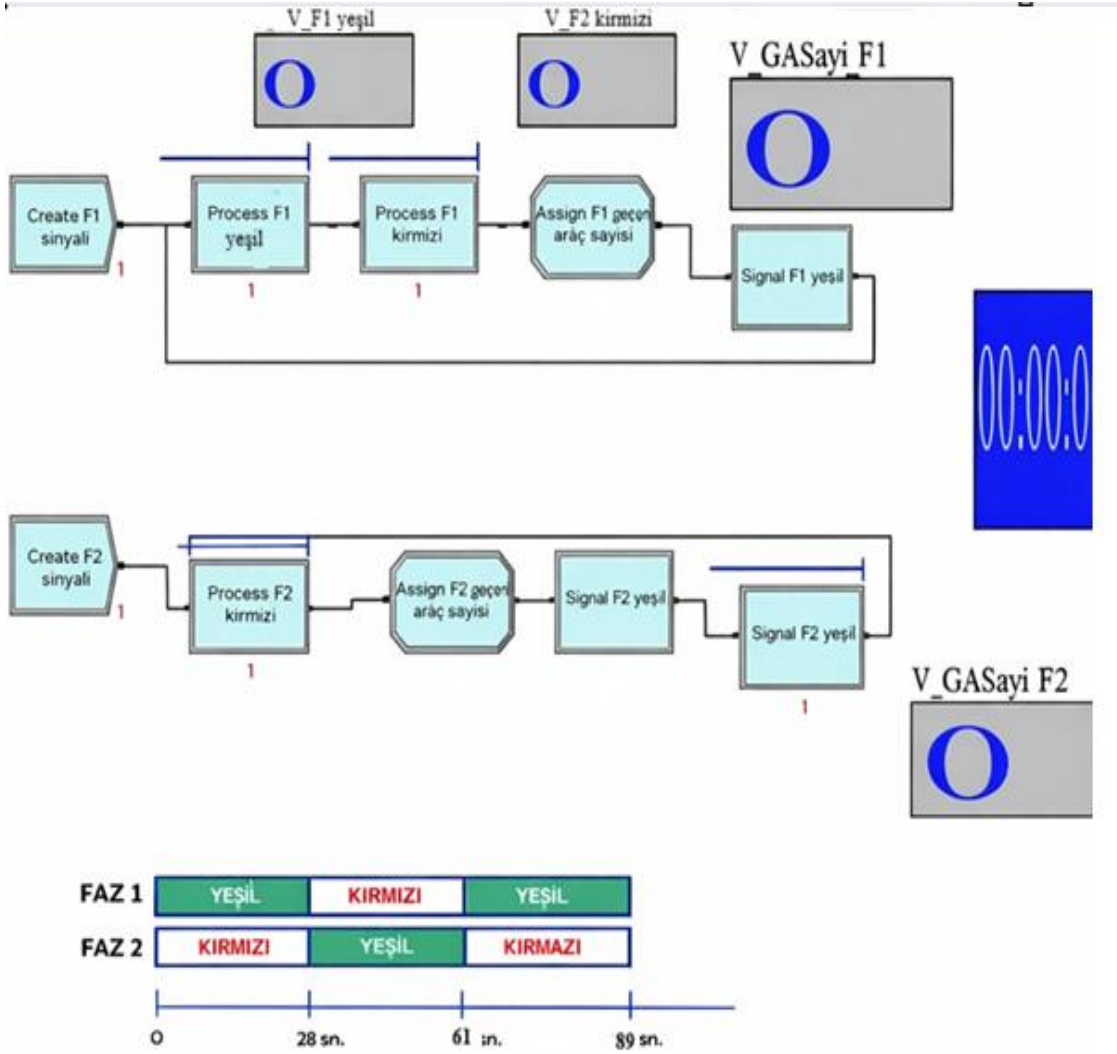
Modelde;

- Create C: 1 numaralı yolu,
- Create A: 2 numaralı yolu,
- Create D: 3 numaralı yolu temsil etmektedir.

Yönlerin kısaltmaları ise şu şekildedir:

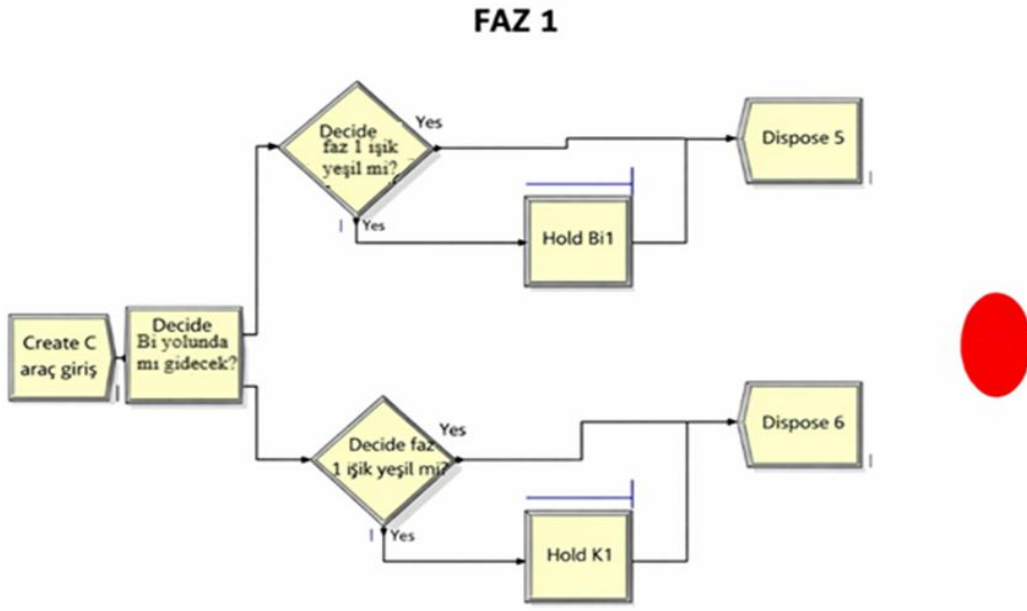
- Ba: Kuzey yönü,
- K: Yerleşim alanı yönü,
- Bi: Güney yönü.

Model, kavşağa ilişkin mevcut sinyalizasyon süreleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Arena simülasyon yazılımı kullanılarak hazırlanan faz diyagram modelleri Şekil 3'te sunulmaktadır.

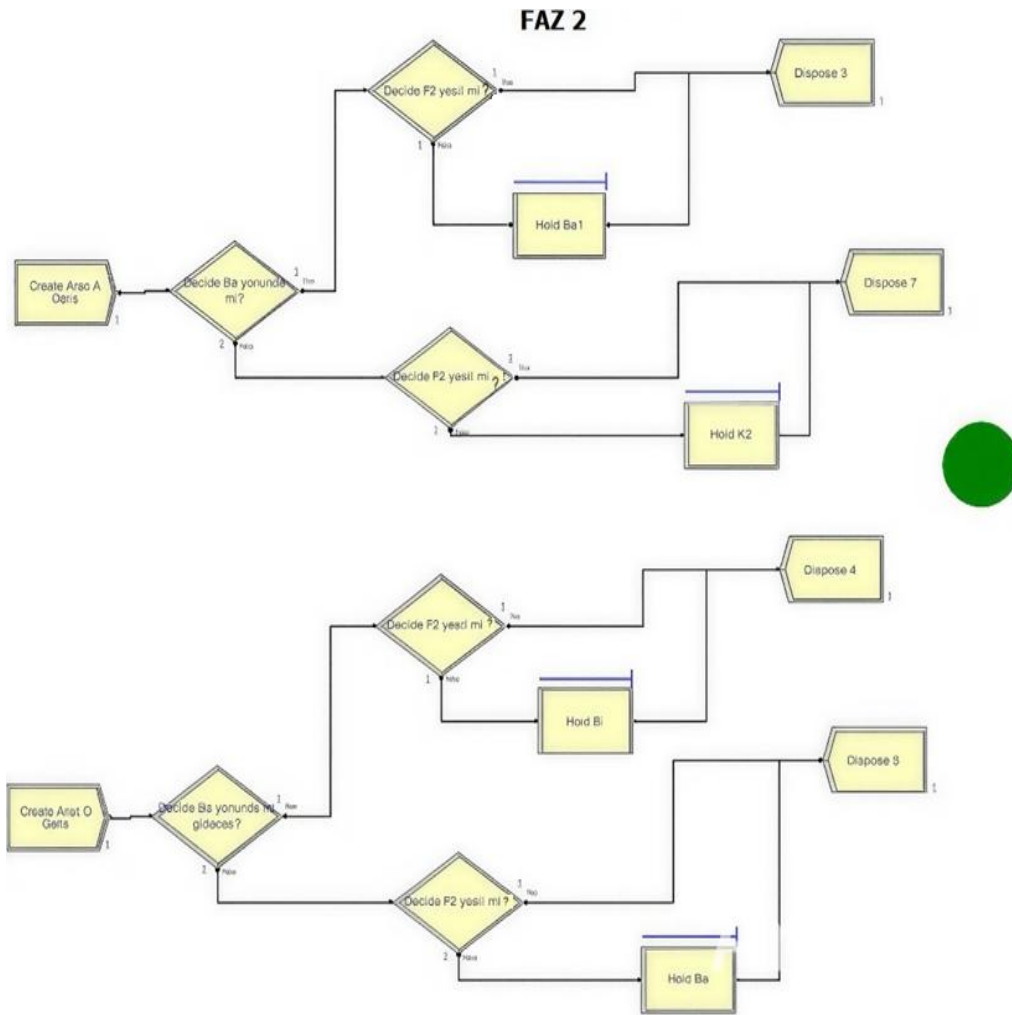


Şekil 3. Arena modeline ait faz diyagram modelleri

Arena modelimizde yer alan faz diyagram modelleri, sistemin her bir aşamasını ve bu aşamalar arasındaki geçiş süreçlerini görselleştirerek analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu diyagramlar sayesinde, trafik akışının zaman içindeki dinamik yapısı daha kolay takip edilmekte ve sistem performansını artırmaya yönelik iyileştirme alanları belirlenebilmektedir. Çalışmada, A, C ve D yönlerinden kavşağa yaklaşan araçların hareketlerini temsil eden modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, trafik akışının farklı kollar üzerindeki davranışlarını ayrıntılı şekilde yansıtmakta olup, ilgili diyagramlar Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. C yönünde giden araçların hareketine ilişkin model



Şekil 5. C yönünde giden araçların hareketine ilişkin model

Model, belirli yönlerden (A, C ve D) gelen araçların hareket davranışlarını ayrıntılı olarak incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu kapsamda, trafik akışı, gecikme süreleri, yoğunluk dağılımları ve kavşak noktalarındaki geçiş davranışları simüle edilmiştir. C yönünden gelen araçların yerleşim alanına mı yoksa güney yönüne mi devam ettikleri, A yönünden gelen araçların kuzeye mi yoksa yerleşim alanına mı yöneldikleri ve D yönünden gelen araçların güney ya da kuzey yönüne mi hareket ettikleri gibi güzergâh tercihleri model üzerinden gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir.

Modelin temel amacı, söz konusu yönlerdeki araç hareketlerinin anlaşılması, bu hareketleri etkileyen faktörlerin detaylı biçimde incelenmesi ve elde edilen bulgular doğrultusunda kavşakta daha etkili ve verimli bir trafik yönetimi için önerilerin geliştirilmesidir. Yön bazlı hareket modelleri, trafik mühendisliği, yol planlaması ve kavşak tasarımı gibi alanlarda sıklıkla kullanılan, karar destek süreçlerine katkı sunan önemli araçlar arasında yer almaktadır.

2.3. Taşıt Üretim Sürelerinin Olasılık Dağılımlarının Belirlenmesi

Taşıt üretim sürelerine ait ham veriler Arena simülasyon yazılımının Input Analyzer modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Verilere uygun olasılık dağılımlarının belirlenmesinde Kolmogorov–Smirnov uygunluk testi ve kare hata (Square Error) kriterleri esas alınmıştır. Dağılımlar %95 güven düzeyinde değerlendirilmiş olup p-değeri 0.05'ten büyük olan dağılımlar kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.

2.4. Girdi Analizi

Trafik akışının simülasyon modelinin oluşturulmasında girdi analizi kritik bir aşama olarak kabul edilmektedir. Bu süreçte, trafik akışını etkileyen temel parametreler ve bu parametrelerin olası dağılımları titizlikle incelenmektedir. Önceki çalışmalarda (örneğin Örnek Olay 2) Promodel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen girdi analiz süreci, bu çalışmada Minitab yazılımı ile Arena simülasyon paketinin Output Analyzer ve Input Analyzer araçları kullanılarak benzer bir metodoloji ile yürütülecektir. Böylece, elde edilen verilerin doğruluğu ve simülasyon modelinin güvenilirliği artırılacaktır.

2.4.1. Girdi Verilerinin Toplanması

Öncelikle, kavşaktaki trafik akışını etkileyen veri setleri, yoğun saatlerde yapılan araç sayımları ve geçiş süresi ölçümleri aracılığıyla toplanmıştır. Toplanan veriler, farklı zaman dilimleri, araç türleri ve trafik yoğunluğu gibi faktörlere göre sınıflandırılmıştır. İncelenen kavşak, eğitim- öğretim yerleşkesi içerisinde yer alan bir araştırma hastanesine hizmet vermesi nedeniyle, günün farklı saatlerinde değişken trafik taleplerine maruz kalmaktadır.

Yapılan ölçümlerin gerçekleştirildiği dönem ve günler dikkate alındığında, gün içi karşılaştırmalı gözlemler sonucunda 14:00–15:00 saat aralığının ölçüm yapılan zaman dilimi için en yüksek trafik yoğunluğunun gözlemlendiği saatler (Analizlerde 14.00–15.00 saat aralığı en yoğun dönem olarak ele alınmış olup, bu zaman dilimi farklı gün ve koşullarda değişkenlik gösterebilen bir parametre olarak

değerlendirilmiştir) olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle analizler, ölçümlerin yapıldığı dönemde kavşak özelinde zirve trafik koşullarını temsil eden bu zaman dilimi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 1, 2 ve 3 numaralı yollar için 6 gün boyunca, saat 14:00–15:00 arasında rastgele zamanlarda 15'er örneklem alınmış ve toplamda 90 adet veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen örneklem verileri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Örneklem verileri

Örneklem no	1 Numaralı Yol (AB)			2 Numaralı Yol (BA1)			3 Numaralı Yol (DA)		
	Dk'da geçen araç sayısı	1.2.3.4.5.6. gün	Örneklem no	Dk'da geçen araç sayısı	1.2.3.4.5.6. gün	Örneklem no	Dk'da geçen araç sayısı	1.2.3.4.5.6. gün	
1	18	14:03	1	3	14:01	1	8	14:01	
2	19	14:15	2	2	14:06	2	12	14:03	
3	17	14:28	3	12	14:12	3	9	14:05	
4	18	14:37	4	4	14:19	4	5	14:08	
5	11	14:50	5	10	14:27	5	10	14:10	
6	4	14:09	6	13	14:34	6	12	14:12	
7	17	14:21	7	11	14:40	7	14	14:14	
8	20	14:34	8	1	14:43	8	6	14:16	
9	9	14:46	9	4	14:50	9	11	14:18	
10	11	14:57	10	11	14:55	10	2	14:20	
11	17	14:12	11	16	14:02	11	11	14:22	
12	1	14:18	12	10	14:08	12	3	14:24	
13	3	14:29	13	12	14:14	13	7	14:26	
14	19	14:42	14	18	14:21	14	14	14:28	
15	19	14:53	15	8	14:29	15	13	14:30	
16	17	14:01	16	9	14:35	16	15	14:32	
17	9	14:14	17	5	14:44	17	7	14:34	
18	9	14:26	18	21	14:46	18	13	14:36	
19	6	14:35	19	7	14:52	19	8	14:38	
20	15	14:48	20	15	14:59	20	1	14:40	
21	20	14:07	21	3	14:03	21	7	14:42	
22	4	14:19	22	7	14:07	22	9	14:44	
23	9	14:30	23	2	14:15	23	5	14:46	
24	16	14:40	24	20	14:22	24	11	14:48	
25	3	14:54	25	7	14:30	25	15	14:50	
26	8	14:10	26	19	14:38	26	10	14:52	
27	18	14:17	27	15	14:41	27	10	14:54	
28	3	14:24	28	5	14:47	28	6	14:56	
29	18	14:39	29	10	14:54	29	15	14:58	
30	20	14:44	30	21	14:58	30	9	14:00	
31	8	14:02	31	5	14:04	31	6	14:01	
32	2	14:11	32	6	14:10	32	10	14:03	
33	6	14:22	33	8	14:16	33	8	14:05	

34	4	14:33	34	2	14:25	34	10	14:07
35	8	14:45	35	10	14:31	35	9	14:09
36	6	14:06	36	9	14:39	36	14	14:11
37	13	14:16	37	12	14:45	37	5	14:13
38	20	14:27	38	21	14:49	38	11	14:15
39	4	14:38	39	13	14:53	39	15	14:17
40	10	14:52	40	18	14:57	40	12	14:19
41	19	14:08	41	9	14:05	41	12	14:21
42	15	14:20	42	11	14:11	42	14	14:23
43	4	14:31	43	17	14:18	43	7	14:25
44	16	14:41	44	8	14:26	44	4	14:27
45	10	14:55	45	4	14:32	45	11	14:29
46	5	14:04	46	3	14:37	46	2	14:31
47	9	14:12	47	20	14:42	47	10	14:33
48	13	14:23	48	8	14:48	48	13	14:35
49	18	14:36	49	13	14:55	49	2	14:37
50	17	14:49	50	12	14:58	50	11	14:39
51	13	14:05	51	16	14:00	51	2	14:41
52	7	14:13	52	3	14:09	52	9	14:43
53	20	14:25	53	10	14:20	53	14	14:45
54	9	14:32	54	11	14:23	54	1	14:47
55	7	14:58	55	5	14:28	55	11	14:49
56	13	14:15	56	5	14:36	56	13	14:51
57	1	14:18	57	14	14:44	57	8	14:53
58	7	14:27	58	9	14:50	58	14	14:55
59	3	14:44	59	21	14:52	59	8	14:57
60	8	14:50	60	1	14:59	60	10	14:59
61	13	14:03	61	5	14:01	61	1	14:04
62	10	14:09	62	12	14:03	62	2	14:06
63	19	14:20	63	17	14:04	63	13	14:08
64	19	14:30	64	19	14:06	64	12	14:10
65	19	14:47	65	12	14:07	65	10	14:12
66	20	14:01	66	17	14:09	66	2	14:14
67	14	14:19	67	9	14:10	67	11	14:16
68	14	14:28	68	14	14:11	68	10	14:18
69	10	14:37	69	13	14:12	69	12	14:20
70	15	14:55	70	21	14:13	70	15	14:22
71	9	14:11	71	7	14:14	71	2	14:24
72	17	14:16	72	15	14:15	72	7	14:26
73	3	14:29	73	12	14:16	73	3	14:28
74	18	14:42	74	14	14:17	74	15	14:30
75	14	14:54	75	12	14:18	75	2	14:32
76	18	14:08	76	20	14:19	76	12	14:34
77	14	14:17	77	2	14:20	77	3	14:36
78	14	14:24	78	15	14:21	78	7	14:38

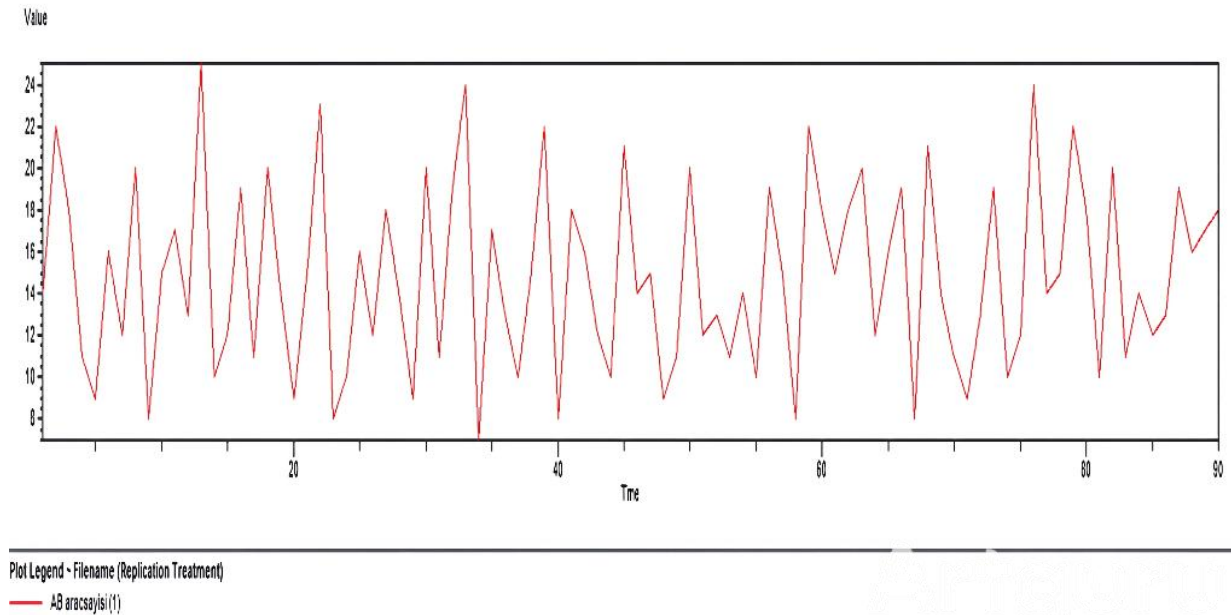
79	17	14:35	79	18	14:22	79	13	14:40
80	2	14:46	80	17	14:23	80	14	14:42
81	7	14:02	81	14	14:24	81	2	14:44
82	1	14:14	82	6	14:25	82	3	14:46
83	5	14:32	83	8	14:26	83	8	14:48
84	15	14:40	84	21	14:27	84	13	14:50
85	2	14:59	85	8	14:28	85	9	14:52
86	14	14:10	86	12	14:29	86	1	14:54
87	11	14:21	87	8	14:30	87	9	14:56
88	12	14:34	88	10	14:31	88	1	14:58
89	4	14:45	89	15	14:32	89	4	14:59
90	15	14:56	90	2	14:33	90	4	14:00

2.4.2. Veri Analizi

Toplanan verilerin analizi için Arena Output Analyzer kullanılacaktır. Arena Output Analyzer verilerin istatistiksel dağılımlarını belirlemek için çeşitli grafik ve analiz araçları sunmaktadır. Verilerin normal dağılıp dağılmadığı, ortalama ve varyans gibi temel istatistiksel ölçümler ile değerlendirilecektir.

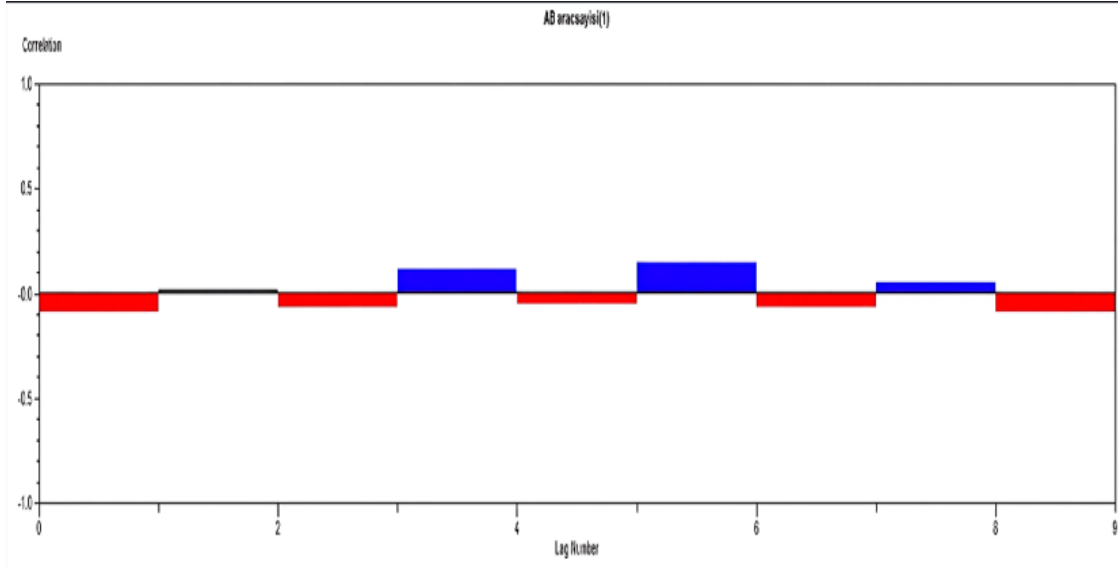
2.4.3. Arena Output Analyzer

Simülasyon sonuçlarının analizi Arena Output Analyzer aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 1 numaralı yol için öncelikle zaman serisi grafiği oluşturulmuş ve verilerin zamana bağlı davranışı incelenmiştir (Şekil 6). Zaman serisi grafiğinde belirgin bir trend, mevsimsellik veya sistematik desen gözlenmemiş olup, örneklem serisinin zamana göre durağan bir yapı sergilediği değerlendirilmiştir.



Şekil 6. 1 nolu yol zaman serisi grafiği

Zaman serisi analizini desteklemek amacıyla 1 numaralı yol için otokorelasyon grafiği elde edilmiştir (Şekil 7). Otokorelasyon grafiğinde gecikmeli korelasyon katsayılarının güven sınırları içerisinde kaldığı görülmüş ve ardışık gözlemler arasında anlamlı bir bağımlılık bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, örneklem verilerinin birbirinden bağımsız ve rassal olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



Correlogram Summary

AB excess(yield)

Sample Mean: 11.01

Sample Variance: 32.61

Sample Size: 90

Weighted Sum of Corr.: -2.398

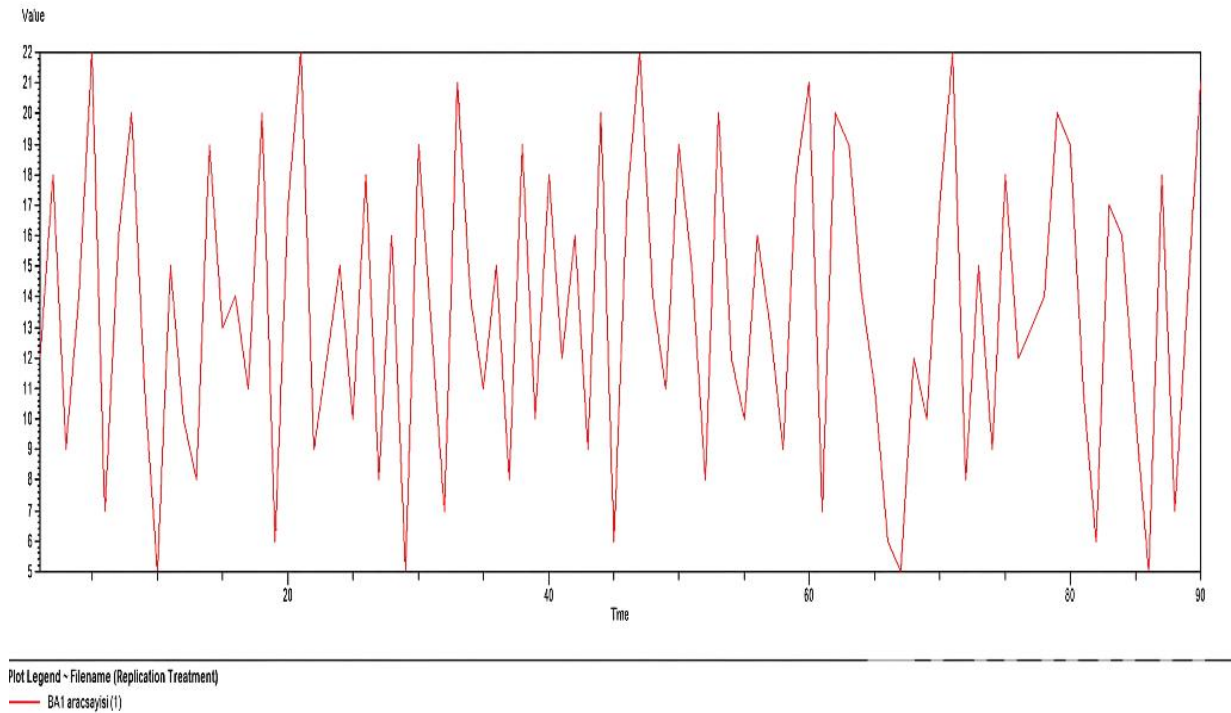
Lag Covariance Correlation

0	-3.0467	-0.093425
1	0.66065	0.021037
2	-2.1362	-0.065055
3	3.6995	0.113333
4	-1.7374	-0.053277
5	4.8847	0.14979
6	-2.2144	-0.067849
7	1.7034	0.05145
8	-3.1394	-0.096268

Şekil 7. 1 nolu yol otokorelasyon grafiği grafiği

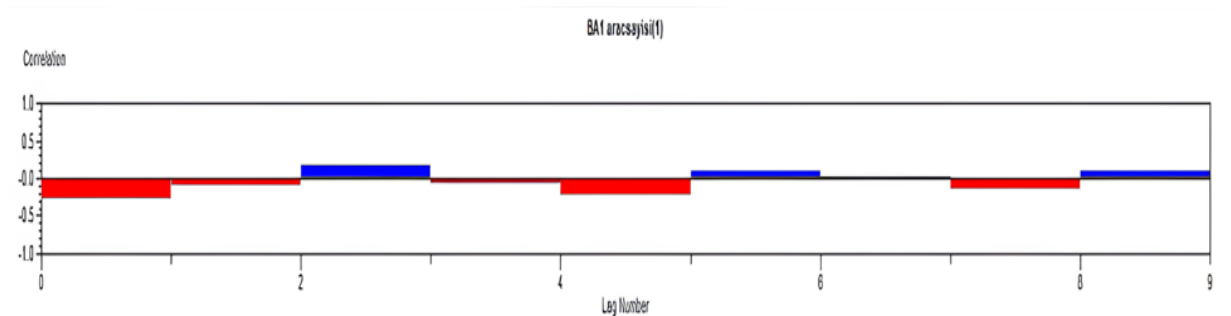
Girdi üretiminde kullanılan olasılık dağılımlarının uygunluğunu değerlendirmek amacıyla grafiksel analizlere ek olarak istatistiksel uygunluk testleri de uygulanmıştır. Arena Output Analyzer tarafından gerçekleştirilen Kolmogorov–Smirnov ve Ki-Kare uygunluk testleri sonucunda, seçilen dağılımların örneklem verileri ile istatistiksel olarak uyumlu olduğu ve ilgili testlerin anlamlılık düzeyleri kapsamında reddedilmediği belirlenmiştir.

Elde edilen test sonuçları, simülasyon modelinde kullanılan giriş dağılımlarının rassallık, bağımsızlık ve temsil yeterliliği açısından uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, ilgili örneklem verilerinin simülasyon modelinde güvenle kullanılabilceği değerlendirilmiş, 2 nolu yol için zaman serisi grafiği çizdirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. 2 nolu yol zaman serisi grafiği

Zamana göre, trend, desen yok. Örneklem serisi zamana göre durağandır. 2 nolu yol için otokorelasyon grafiği çizdirilmiştir (Şekil 9).



Correlogram Summary

BA1 excess(yield)

Sample Mean: 13.57

Sample Variance: 24.09

Sample Size: 90

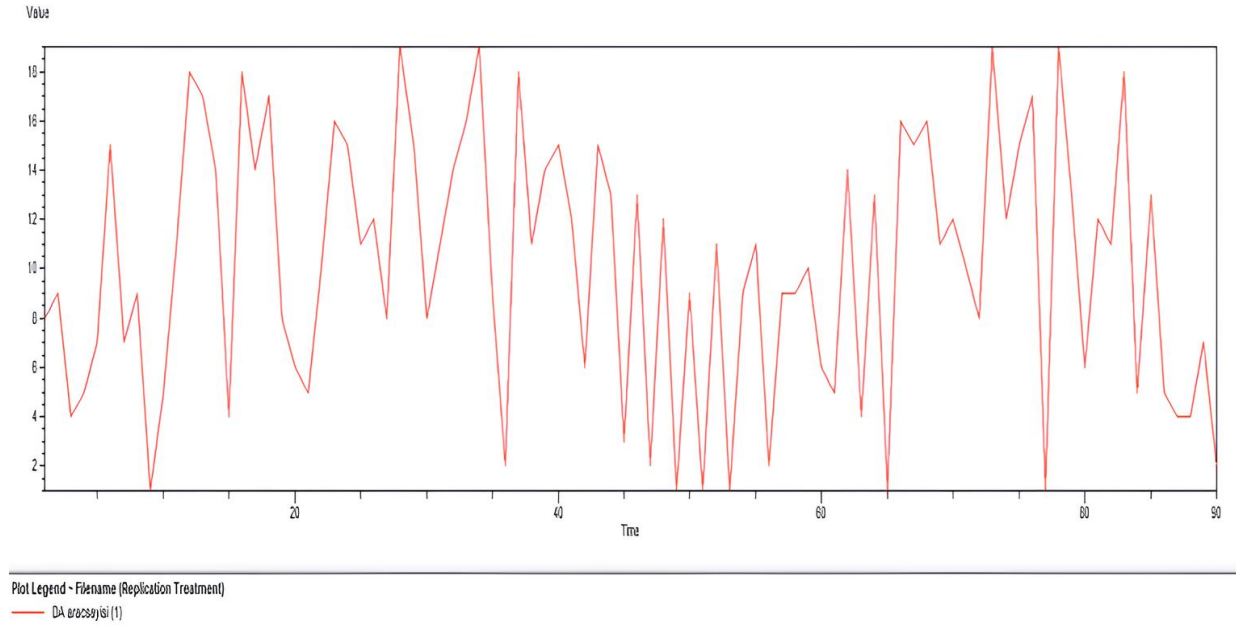
Weighted Sum of Corr.: -22.53

Lag Covariance Correlation

1	-7.1028	-0.24485
2	-2.4608	-0.1034
3	4.0582	0.17012
4	-1.6787	-0.06885
5	-5.5538	-0.23054
6	2.4511	0.10386
7	0.39999	0.016521
8	-3.5919	-0.16571
9	2.2479	0.093312

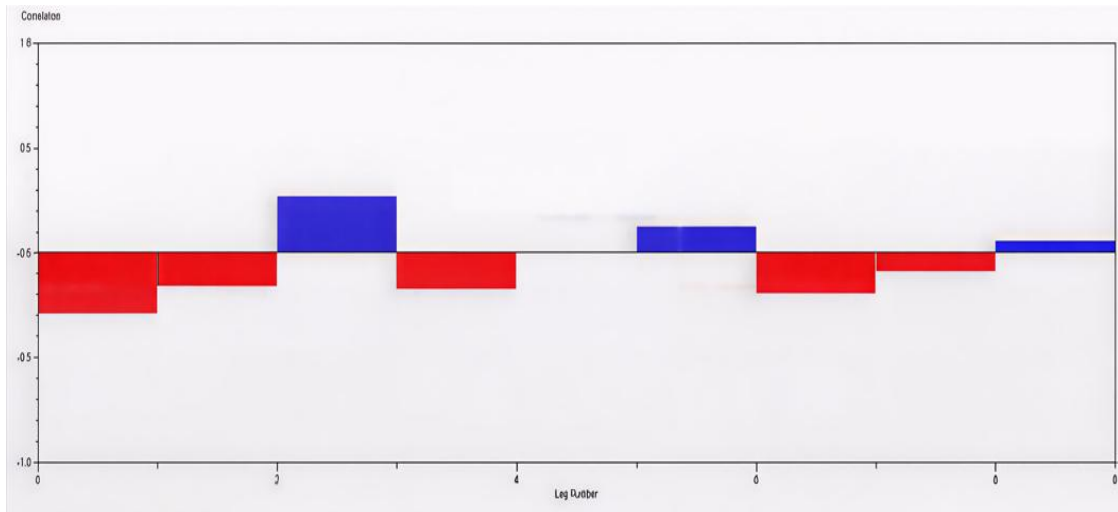
Şekil 9. 2 nolu yol otokorelasyon grafiği grafiği

Çizdirilen otokorelasyon grafiğine göre verilerin bağımsız olduğu görülmektedir. Zaman serisi ve otokorelasyon rassal olarak bu örneklem kullanılabilir. 3 nolu yol için zaman serisi grafiği çizdirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. 3 nolu yol zaman serisi grafiği

Zamana göre, trend, desen yok. Örneklem serisi zamana göre durağandır. 3 nolu yol için otokorelasyon grafiği çizdirilmiştir (Şekil 11).



Correlogram Summary

Sample Mean: 14.02

Sample Variance: 15.92

Sample Size: 90

Weighted Sum of Cov.: -17.7

Lag Covariance Correlation

1	-3.8026	-0.29124
2	-3.2207	-0.16165
3	5.3599	0.26902
4	-3.5182	-0.17658
5	0.041701	0.002093
6	2.3342	0.12719
7	-3.8976	-0.19532
8	-1.7828	-0.089481

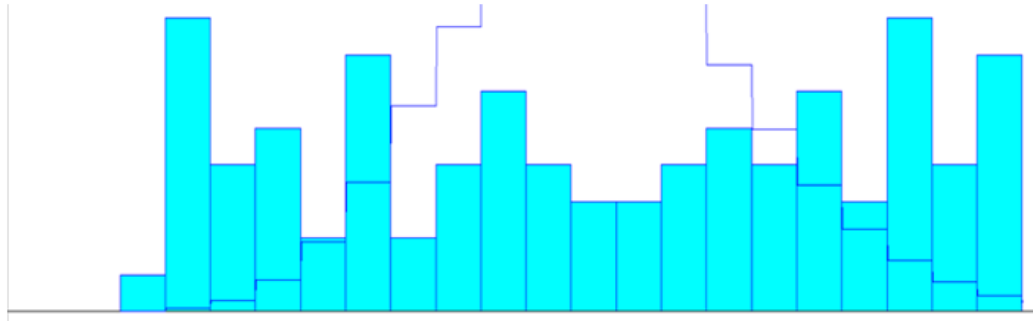
Şekil 11. 3 nolu yol otokorelasyon grafiği grafiği

Çizdirilen otokorelasyon grafiğine göre verilerin bağımsız olduğu görülmektedir. Zaman serisi ve otokorelasyon rassal olarak bu örneklem kullanılabilir.

3.4. Dağılım uydurma

H0: 1 nolu yönde dk'da geçen araç sayısı poisson dağılımına uyar

H1: 1 nolu yönde dk'da geçen araç sayısı poisson dağılımına uymaz (Şekil 12).



Distribution: Poisson

Expression: POIS(11.1)

Square Error: 0.052643

Chi-Square Test

Number of Intervals: 7

Degree of Freedom: 5

Test Statistic: 6.94

Corresponding p-value: 0.005

Data Summary

Number of Data Points: 90

Min Data Value: 1

Max Data Value: 20

Sample Mean: 11.1

Sample Std Dev: 5.99

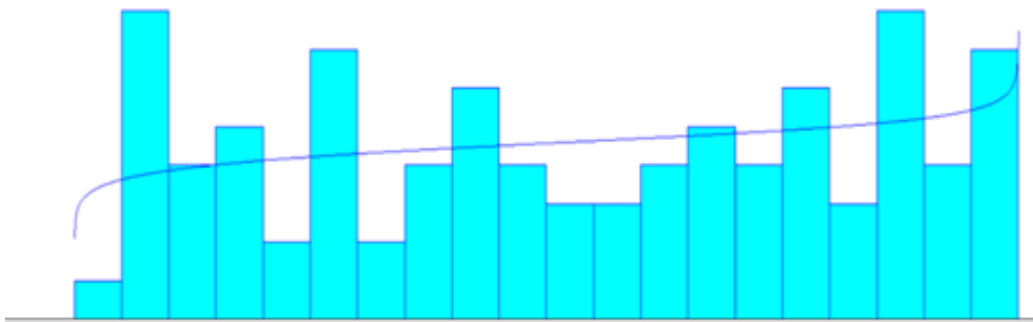
Histogram Summary

Histogram Range: 0.5 – 20.5

Number of Intervals: 20

Şekil 12. 1 numaralı yol için Input Analyzer’da yapılan analiz sonucu (Poisson)

Input Analyzer’da yapılan test sonucuna göre, dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uymadığı sonucuna varılmaktadır. Yani, 1 nolu yönde dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uygun olmadığına dair yeterli kanıt bulunmaktadır. ($p:0.005 < \alpha:0.05$) olduğundan H_0 red edilir. Diğer dağılımlar incelendiğinde Beta dağılımına uygun olduğu görülmektedir (Şekil 13).



Distribution: Beta

Expression: $0.5 + 20 * \text{BETA}(1.09, 0.949)$

Square Error: 0.00414

Chi-Square Test

Number of Intervals: 8

Degree of Freedom: 5

Test Statistic: 2.59

Corresponding p-value: 0.75

Data Summary

Number of Data Points: 90

Min Data Value: 1

Max Data Value: 20

Sample Mean: 11.1

Sample Std Dev: 5.99

Histogram Summary

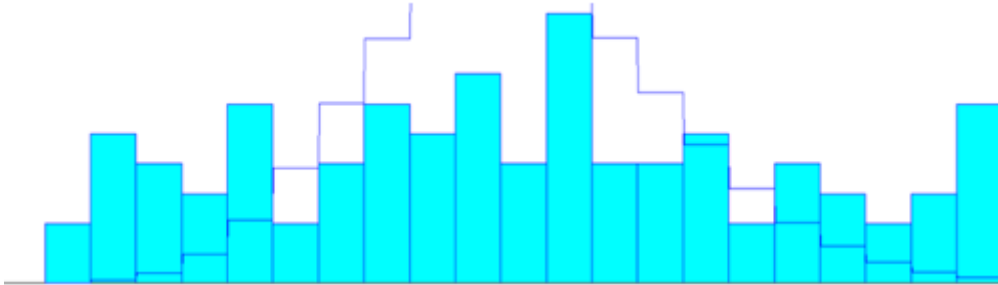
Histogram Range: 0.5 – 20.5

Number of Intervals: 20

Şekil 13. 1 numaralı yol için Input Analyzer'da yapılan analiz sonucu (Beta)

H0: 2 nolu yönde dk'da geçen araç sayısı poisson dağılımına uyar

H1: 2 nolu yönde dk'da geçen araç sayısı poisson dağılımına uymaz (Şekil 14).



Distribution: Poisson

Expression: POIS(10.9)

Square Error: 0.028576

Chi-Square Test

Number of Intervals: 7

Degree of Freedom: 5

Test Statistic: 36.2

Corresponding p-value: < 0.005

Data Summary

Number of Data Points: 90

Min Data Value: 1

Max Data Value: 21

Sample Mean: 10.9

Sample Std Dev: 5.68

Histogram Summary

Histogram Range: 0.5 – 21.5

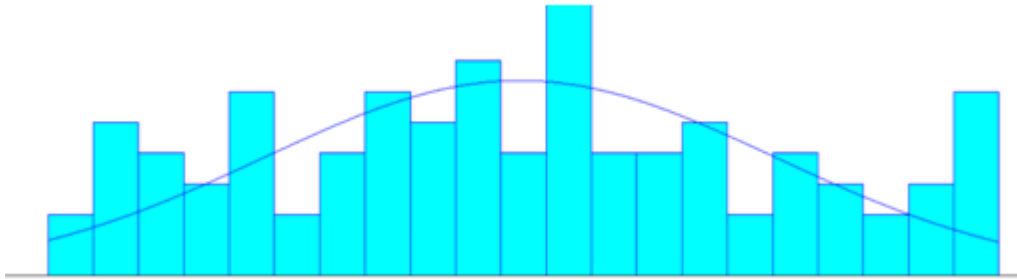
Number of Intervals: 21

Şekil 14. 2 numaralı yol için Input Analyzer'da yapılan analiz sonucu (Poisson)

Input Analyzer'da yapılan test sonucuna göre, dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uymadığı sonucuna varılmaktadır. Yani, 2 nolu yönde dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uygun olmadığına dair yeterli kanıt bulunmaktadır. ($p:0.005 < \alpha:0.05$) olduğundan H_0 red edilir. Diğer dağılımlar incelendiğinde Normal dağılıma uygun olduğu görülmektedir.

H_0 : Dakikada geçen araç sayısı normal dağılıma uyar.

H_1 : Dakikada geçen araç sayısı normal dağılıma uymaz (Şekil 15).



Distribution: Normal

Expression: NORM(10.9, 5.65)

Square Error: 0.009230

Chi-Square Test

Number of Intervals: 7

Degree of Freedom: 4

Test Statistic: 7.065

Corresponding p-value: 0.0955

Data Summary

Number of Data Points: 90

Min Data Value: 1

Max Data Value: 21

Sample Mean: 10.9

Sample Std Dev: 5.68

Histogram Summary

Histogram Range: 0.5 – 21.5

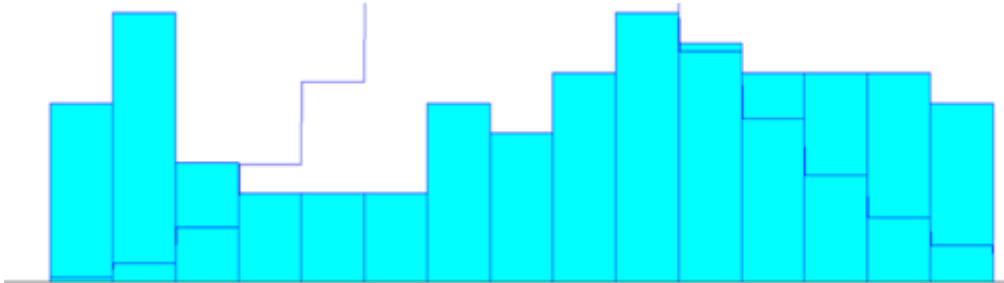
Number of Intervals: 21

Şekil 15. 2 numaralı yol için Input Analyzer’da yapılan analiz sonucu (Normal dağılım)

Sonuç olarak, elde edilen p-değeri ve test istatistiği, dakikada geçen araç sayısının normal dağılıma uyduğunu göstermektedir.

H0: 3 nolu yönde dk’da geçen araç sayısı poisson dağılımına uyar

H1: 3 nolu yönde dk’da geçen araç sayısı poisson dağılımına uymaz (Şekil 16).



Distribution: Poisson

Expression: POIS(8.52)

Square Error: 0.041223

Chi-Square Test

Number of Intervals: 7

Degree of Freedom: 5

Test Statistic: 34.8

Corresponding p-value: < 0.005

Data Summary

Number of Data Points: 90

Min Data Value: 1

Max Data Value: 15

Sample Mean: 8.52

Sample Std Dev: 4.41

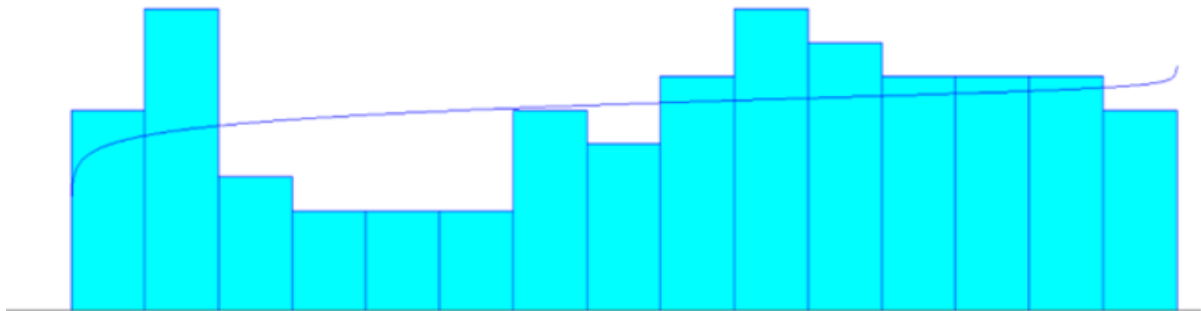
Histogram Summary

Histogram Range: 0.5 – 15.5

Number of Intervals: 15

Şekil 16. 3 numaralı yol için Input Analyzer’da yapılan analiz sonucu (Poisson)

Input Analyzer’da yapılan test sonucuna göre, dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uymadığı sonucuna varılmaktadır. Yani, 3 nolu yönde dakikada geçen araç sayısının Poisson dağılımına uygun olmadığına dair yeterli kanıt bulunmaktadır. ($p:0.005 < \alpha:0.05$) olduğundan H_0 red edilir. Diğer dağılımlar incelendiğinde Beta dağılımına uygun olduğu görülmektedir (Şekil 17).



Distribution: Beta

Expression: $0.5 + 15 * \text{BETA}(1.08, 0.906)$

Square Error: 0.006821

Chi Square Test

Number of intervals = 7

Degrees of freedom = 4

Test Statistic = 8.34

Corresponding p-value = 0.0836

Data Summary

Number of Data Points = 90

Min Data Value = 1

Max Data Value = 15

Sample Mean = 8.52

Sample Std Dev = 4.41

Histogram Summary

Histogram Range = 0.5 to 15.5

Number of Intervals = 15

Şekil 17. 3 numaralı yol için Input Analyzer’da yapılan analiz sonucu (Beta)

2.5. Çıktı Analizi

Modelin çalışma parametreleri; istatistiksel güvenilirliği artırmak amacıyla 30 replikasyon, her bir replikasyon için 20 günlük simülasyon süresi ve her gün zirve trafik koşullarını temsil eden 1 saatlik zaman dilimi esas alınarak tanımlanmıştır. Simülasyonda zaman birimi saniye olarak belirlenmiş olup, araç gecikmeleri, kuyruklanma süreleri ve geçiş süreleri bu birim üzerinden hesaplanmıştır. Modelin temel çalışma parametreleri Şekil 18’de sunulmuş, simülasyon çıktıları ise rapor bölümünde saniye cinsinden değerlendirilmiştir.

The screenshot displays the 'Replication Parameters' tab in the Arena software. The 'Number of Replications' is set to 30. The 'Start Date and Time' is set to 28 Aralık 2024 Cumartesi 00:06:57. The 'Warm-up Period' is 0.0, 'Replication Length' is 20, and 'Hours Per Day' is 1. The 'Base Time Units' are set to Seconds. The 'Terminating Condition' field is empty. The 'Initialize Between Replications' section has 'Statistics' and 'System' checked.

Şekil 18. Çalışma parametreleri

Belirlenen simülasyon parametreleri doğrultusunda model çalıştırılmış ve her bir replikasyon için araç hareketlerine ilişkin performans çıktıları elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda; araçların kavşakta maruz kaldığı ortalama gecikme süreleri, kuyruk süreleri ve kavşaktan geçiş süreleri gibi temel performans göstergeleri hesaplanmıştır. Model çıktıları, istatistiksel güvenilirliğin sağlanabilmesi amacıyla 30 replikasyon üzerinden elde edilen ortalama değerler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen çıktı raporu, simülasyon süresince oluşan trafik akışının zamana bağlı davranışını ve kavşağın mevcut sinyalizasyon koşulları altındaki performansını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, modelin çıktı analizi sonuçları Şekil 19’da sunulmuş olup, ilgili çıktılar saniye cinsinden ifade edilerek değerlendirilmiştir. Böylece, kavşağın mevcut durumdaki işletim performansı nicel verilerle analiz edilmiştir.



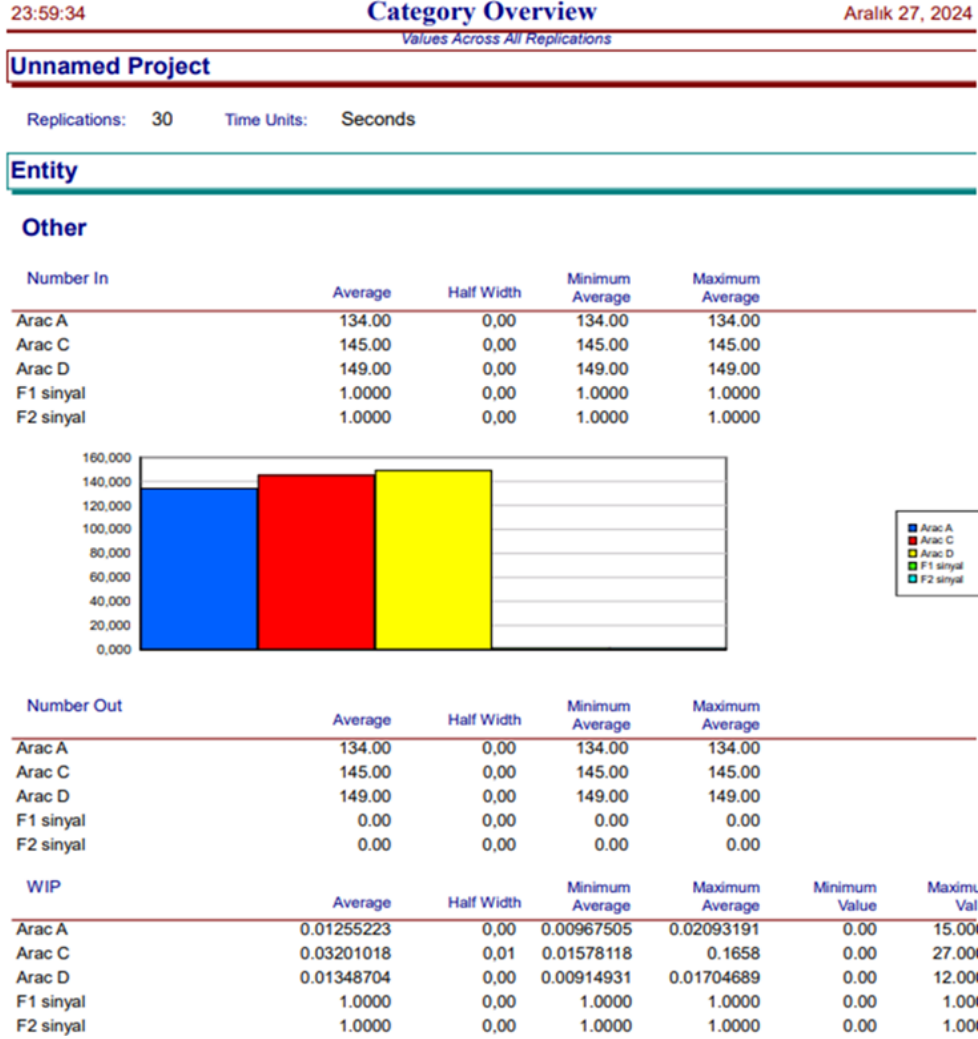
Şekil 19. Anahtar performans göstergeleri

Sistemden çıkan varlık sayısı 20 günde, günde 1 saat olacak şekilde yani 20 saate geçen araç sayısı 428’dir. Simülasyon 30 replikasyon çalıştırılmıştır. Temel ölçüm birimi saniyedir. Araçların ortalama sinyallerde gecikme süreleri şekil 20’de verilmiştir.

23:59:34		Category Overview				Aralık 27, 2024	
Values Across All Replications							
Unnamed Project							
Replications: 30		Time Units: Seconds					
Entity							
Time							
VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac C	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac D	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac C	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac D	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	6.7445	0,45	5.1985	11.2470	0.00	71.111	
Arac C	15.8947	6,23	7.8362	82.3359	0.00	177.111	
Arac D	6.5172	0,30	4.4211	8.2374	0.00	61.247	
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac C	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac D	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac C	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Arac D	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Arac A	6.7445	0,45	5.1985	11.2470	0.00	71.111	
Arac C	15.8947	6,23	7.8362	82.3359	0.00	177.111	
Arac D	6.5172	0,30	4.4211	8.2374	0.00	61.247	
Other							

Şekil 20. Araçların ortalama sinyallerde gecikme süreleri

Araştırma kapsamında, farklı yönlerden kavşağa gelen araçların sinyal ışıklarında ortalama gecikme süreleri hesaplanmıştır. Buna göre, A yönünden gelen araçların ortalama gecikme süresi 6,7 saniye, C yönünden gelen araçların ortalama gecikme süresi 15,8 saniye, D yönünden gelen araçların ortalama gecikme süresi 6,5 saniye olarak belirlenmiştir. Burada, A, C ve D olarak belirtilen yolların modeldeki karşılıkları şu şekildedir: Create C: Kuzey-Güney yönündeki 1 numaralı geliş yolu, Create A: Güney-Kuzey yönündeki 2 numaralı geliş yolu, Create D: Yerleşim alanı çıkışını temsil eden 3 numaralı geliş yolu. Verilerden de görüldüğü üzere, C yönünden kavşağa gelen araçların sinyal ışıklarında gecikme süreleri, diğer yönlere göre belirgin biçimde daha fazladır. Sisteme ortalama olarak giren ve çıkan araç sayıları ise Şekil 21’de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 21. Sisteme giren ve çıkan araç sayıları

Yaklaşık 20 saatlik gözlem süresi boyunca, kavşağa yönlere göre ortalama araç sayıları şu şekilde gerçekleşmiştir: A yönünden ortalama 134 araç, B yönünden ortalama 145 araç, C yönünden ortalama 149 araç. Grafikte, A yönünden gelen araçlar mavi, B yönünden gelen araçlar kırmızı, C yönünden gelen araçlar ise sarı renk ile gösterilmektedir. Araçların kuyrukta gecikme süreleri ve gecikme zamanları ise Şekil 22’de detaylı olarak sunulmuştur.

Queue						
Time						
Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold Ba.Queue	13.8486	1,65	5.2987	22.1587	0.0910	27.74
Hold Ba1.Queue	14.2967	0,62	12.0280	20.8910	0.00106541	71.11
Hold Bi.Queue	13.8951	0,53	10.5464	17.1810	0.00627098	61.24
Hold Bi1.Queue	26.1454	7,72	15.7802	101.59	0.03141677	177.1
Hold K1.Queue	16.5289	0,92	10.2624	22.3314	0.06597091	32.93
Hold K2.Queue	14.4583	1,47	7.5090	21.9331	0.0989	27.97
Process F1 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F1 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F2 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F2 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1

Şekil 22. Araçların kuyrukta gecikme süresi ve gecikme zamanları

Ba, Ba1, Bi, K1 ve K2 kuyruklarında gecikme süreleri, Bi1 kuyruğuna kıyasla nispeten daha düşüktür. En uzun gecikme süresi, ortalama 26,1 saniye ile Bi1 kuyruğunda gözlemlenmiştir. Bu gecikme süresinin azaltılması, kavşak performansının iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bekleyen araç sayıları ise Şekil 23'te grafiksel olarak sunulmuştur.

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold Ba.Queue	0.00058703	0,00	0.00009132	0.00128020	0.00	2.00
Hold Ba1.Queue	0.01141670	0,00	0.00861517	0.01944024	0.00	15.00
Hold Bi.Queue	0.01290001	0,00	0.00893517	0.01684958	0.00	12.00
Hold Bi1.Queue	0.02847563	0,01	0.01083362	0.1637	0.00	26.00
Hold K1.Queue	0.00353455	0,00	0.00156787	0.00547275	0.00	5.00
Hold K2.Queue	0.00113552	0,00	0.00032969	0.00198904	0.00	3.00
Process F1 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F1 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F2 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1
Process F2 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.1

Şekil 23. Bekleyen araç sayıları

Bekleyen araç sayılarına bakıldığında ise, yine en büyük değer Bi1 kuyruğunda olduğu görülmektedir. Çıktı analizinden görüldüğü üzere, Bi1 kuyruğunda gecikmelerin fazla olduğu görülmekle birlikte senaryo analizinde bu değer üzerine iyileştirmelere odaklanılacaktır.

2.6. Seneryo Analizi

Çalışmada sinyal sürelerinin iyileştirilmesi süreci, klasik anlamda analitik veya sezgisel bir optimizasyon algoritması (örneğin doğrusal programlama, genetik algoritma veya tabu arama) kullanılarak değil; senaryo tabanlı simülasyon yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda farklı sinyal süreleri kombinasyonları, önceden belirlenmiş performans ölçütleri altında değerlendirilmiş ve en iyi performansı sağlayan senaryo seçilmiştir.

Bu yöntem, literatürde simülasyon temelli optimizasyon (simulation-based optimization) veya deneysel senaryo karşılaştırması (what-if analysis) olarak adlandırılmakta olup, özellikle karmaşık ve

analitik olarak modellenmesi güç trafik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Trafik akımlarının rassal yapısı, sürücü davranışları ve kavşak etkileşimleri göz önüne alındığında, kapalı formda matematiksel bir amaç fonksiyonunun tanımlanması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle çalışmada, sistem davranışını en iyi yansıtan simülasyon modeli kullanılarak farklı senaryolar karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda, her bir senaryo için aşağıdaki performans ölçütleri hesaplanmıştır:

Ortalama araç gecikmesi,

Ortalama kuyruk uzunluğu,

Sistemden geçen araç sayısı,

Ortalama bekleme süresi,

Elde edilen çıktılar istatistiksel olarak karşılaştırılmış ve belirlenen performans kriterleri açısından en düşük gecikme ve kuyruk uzunluğunu sağlayan sinyal süresi kombinasyonu, çalışmanın amaç fonksiyonuna karşılık gelecek şekilde en uygun çözüm olarak değerlendirilmiştir.

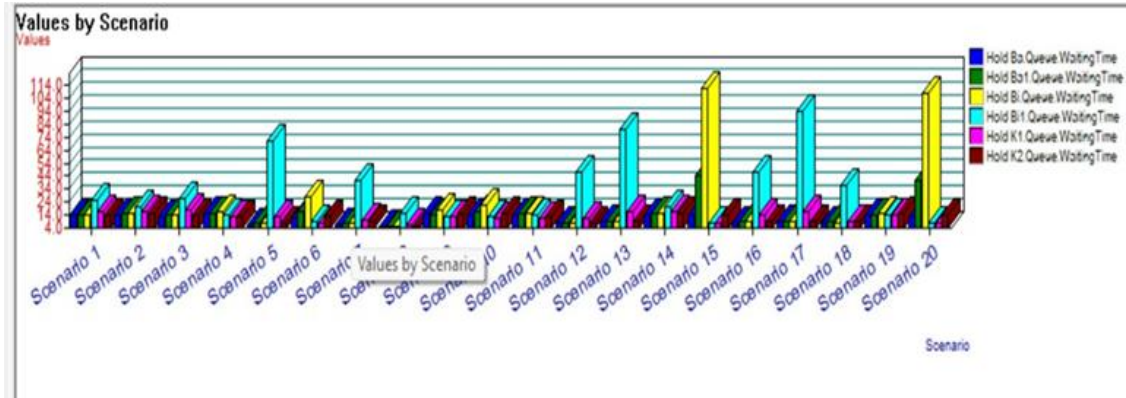
Bu yaklaşım, klasik matematiksel optimizasyondan farklı olmakla birlikte, deneysel optimizasyon mantığına dayanmaktadır. Yani optimizasyon, kapalı formda bir matematiksel çözüm yerine, performans ölçütlerinin minimize edilmesi prensibiyle senaryo uzayı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılan yöntem, “tam optimizasyon” yerine yaklaşık (heuristic) bir iyileştirme yöntemi olarak değerlendirilmelidir.

Bu bölümde ışık sürelerine ilişkin senaryolar geliştirilmiştir ve tüm araçların mantıklı sürelerde gecikme süreleri olacak şekilde ışık süreleri belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 24).

Project Items	Display	Scenario Properties			Controls				Responses							
		S	Name	Program File	Reps	V_F1kırmızı	V_F2kırmızı	V_F1yesil	V_F2yesil	Hold Ba.Queue.W	Hold Ba1.Queue	Hold Bi.Queue.Wal	Hold B1.Queue.W	Hold K1.Queue.W	Hold K2.Queue.W	
Scenario 1	Visible	1	Scenario 1	1 : sinyalizas	30	33	28	28	33	13.85	14.30	13.90	26.15	16.53	14.46	
Scenario 2	Visible	2	Scenario 2	1 : sinyalizas	30	33	30	30	33	14.21	15.29	15.28	20.38	16.81	14.84	
Scenario 3	Visible	3	Scenario 3	1 : sinyalizas	30	35	28	28	35	12.80	14.19	14.20	27.39	17.73	14.31	
Scenario 4	Visible	4	Scenario 4	1 : sinyalizas	30	25	28	28	25	15.84	15.22	17.05	13.88	12.53	13.15	
Scenario 5	Visible	5	Scenario 5	1 : sinyalizas	30	25	15	15	25	6.77	7.79	7.62	71.08	12.42	7.55	
Scenario 6	Visible	6	Scenario 6	1 : sinyalizas	30	17	25	25	17	12.08	16.05	27.70	8.60	8.33	12.74	
Scenario 7	Visible	7	Scenario 7	1 : sinyalizas	30	21	15	15	21	6.94	8.04	7.71	40.61	10.12	8.64	
Scenario 8	Visible	8	Scenario 8	1 : sinyalizas	30	14	11	11	14	4.95	5.70	5.65	14.91	7.08	5.56	
Scenario 9	Visible	9	Scenario 9	1 : sinyalizas	30	25	29	29	25	14.84	14.61	17.80	13.19	13.20	15.90	
Scenario 10	Visible	10	Scenario 10	1 : sinyalizas	30	25	30	30	25	14.04	17.25	22.06	13.41	11.99	15.20	
Scenario 11	Visible	11	Scenario 11	1 : sinyalizas	30	24	28	28	24	14.61	15.26	15.83	13.53	11.97	12.68	
Scenario 12	Visible	12	Scenario 12	1 : sinyalizas	30	23	15	15	23	8.10	7.99	7.60	47.02	11.42	7.47	
Scenario 13	Visible	13	Scenario 13	1 : sinyalizas	30	33	17	17	33	8.88	8.65	8.45	80.51	16.21	8.75	
Scenario 14	Visible	14	Scenario 14	1 : sinyalizas	30	33	30	30	33	14.21	15.29	15.28	20.38	16.81	14.84	
Scenario 15	Visible	15	Scenario 15	1 : sinyalizas	30	15	28	28	15	13.94	43.95	112.13	7.79	7.69	14.65	
Scenario 16	Visible	16	Scenario 16	1 : sinyalizas	30	28	18	18	28	7.51	8.92	9.27	47.31	14.39	8.88	
Scenario 17	Visible	17	Scenario 17	1 : sinyalizas	30	33	19	19	33	9.31	9.45	9.54	93.51	16.97	8.63	
Scenario 18	Visible	18	Scenario 18	1 : sinyalizas	30	20	16	16	20	7.49	8.55	8.20	36.45	9.68	8.74	
Scenario 19	Visible	19	Scenario 19	1 : sinyalizas	30	28	28	28	28	14.56	14.02	15.35	14.68	13.54	15.39	
Scenario 20	Visible	20	Scenario 20	1 : sinyalizas	30	16	27	27	16	13.42	41.08	107.64	8.37	8.22	14.06	

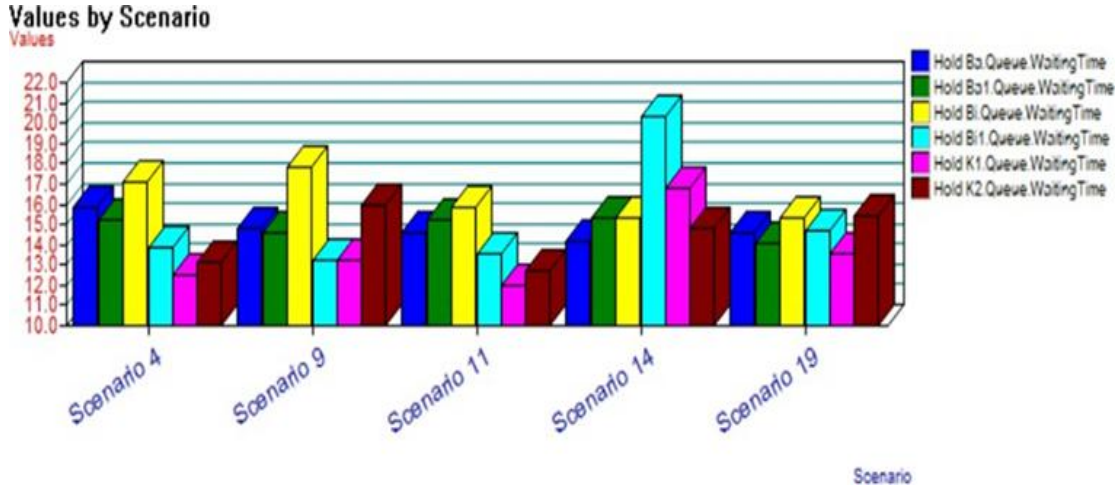
Şekil 24. Geliştirilen senaryolar

Senaryo analizinde 20 tane farklı senaryo analiz edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ışık süreleri şekilde görülmektedir. Bu senaryoların grafiği çizdirilmiştir (Şekil 25).



Şekil 25. 20 senaryoya ait oluşturulan grafik

Grafikten de görüldüğü üzere, senaryo 1,2,3,5,7,8,12,13,16,17,18 Bi1 kuyruğunda fazla gecikme yapmıştır. Bu senaryolar uygun değildir. Senaryo, 6,10,15,20 ise Bi kuyruğunda fazla gecikme yaptığından bu senaryolarda uygun değildir. Tüm bu senaryolar çıkarıldıktan sonra kalan senaryoların tekrar grafiği çizdirilmiştir (Şekil 26).



Şekil 26. Kalan senaryolara ait oluşturulan grafik

Grafikten de görüldüğü üzere en uygun senaryo 19 belirlenmiş olup; F1 kırmızı 26 saniye, F2 kırmızı 28 saniye, F1 yeşil 28 saniye, F2 yeşil ise 26 saniye olarak bulunmuştur. 19 numaralı senaryo seçilir. 19 nolu senaryoyla simülasyon çalıştırıldığında genel rapor (şekil 27).

Replications: 30 Time Units: Seconds

Queue						
Time						
Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold Ba.Queue	14.5610	1,96	1.4896	26.1366	0.4622	27.7
Hold Ba1.Queue	14.0248	0,36	12.0314	15.8109	0.05918576	27.9
Hold Bi.Queue	15.3630	1,18	13.1282	29.0041	0.00267076	78.3
Hold Bi1.Queue	14.6763	2,74	11.6280	52.9366	0.00477738	10+
Hold K1.Queue	13.5397	0,98	7.6098	18.4451	0.02453448	25.8
Hold K2.Queue	15.3923	1,10	10.3023	22.3826	0.00361508	27.9
Process F1 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F1 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F2 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F2 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Other						
Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Hold Ba.Queue	0.00066717	0,00	0.00002068	0.00167346	0.00	2.0
Hold Ba1.Queue	0.01249994	0,00	0.00902357	0.01648086	0.00	9.0
Hold Bi.Queue	0.01667461	0,00	0.01185180	0.03625517	0.00	14.0
Hold Bi1.Queue	0.01291636	0,00	0.00759053	0.08013991	0.00	16.0
Hold K1.Queue	0.00242697	0,00	0.00142143	0.00460146	0.00	5.0
Hold K2.Queue	0.00156628	0,00	0.00066688	0.00249762	0.00	3.0
Process F1 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F1 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F2 kırmızı.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞
Process F2 yeşil.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	∞

Şekil 27. Seçilen senaryoyla oluşturulan yeni rapor

Görüldüğü üzere süreler mantıklı hale gelmiş ve birbirine yakın kuyruk süreleri oluşmuştur. Ayrıca bu raporda yarı güven genişlikleri de verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, trafik akışı sorunları yaşanan bir ana giriş kavşağındaki trafik düzeni, Arena simülasyonu kullanılarak sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Toplanan veriler ışığında oluşturulan model, araçların gecikme sürelerini ve kuyruk uzunluklarını ayrıntılı olarak ölçmüş ve farklı trafik ışığı senaryolarının sistem performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

Özellikle 14:00–15:00 saatleri arasında yapılan analizlerde, en uygun trafik ışığı süreleriyle uygulanan senaryo 19, Bi1 kuyruk noktasındaki ortalama gecikme süresini % 43,88, bekleyen araç sayısını ise %53,63 oranında azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarda rapor edilen iyileşmelerle paralellik göstermektedir. Örneğin, "CVLight: Decentralized learning for adaptive traffic signal control" adlı çalışma, Shenzhen örneklemeyle yapılan simülasyonlarda, adaptif sinyalizasyon sistemlerinin araç başına ortalama gecikme süresini %33.5 oranında azalttığını raporlamaktadır [15].

Denizli Kelleci Kardeşler Kavşağı örneğinde yapılan simülasyon çalışmasında ise ortalama gecikme yaklaşık %45'e kadar azaltılmıştır [16]. Bu çalışmada elde edilen % 43,88'lik azalma, mevcut uluslararası uygulamalarla uyumlu olup, senaryo tabanlı simülasyon iyileştirmesinin etkinliğini göstermektedir.

Kentleşmenin hızlanmasıyla birlikte artan trafik talebi, sinyalizasyon kavşaklarında gecikme ve kuyruk problemlerini daha da belirgin hâle getirmiştir. Bu bağlamda, literatürde “geleneksel sabit zamanlı sinyal kontrol yöntemlerinin hızla değişen trafik koşullarına yeterince yanıt veremediği”, buna karşılık “gerçek zamanlı trafik akışı ve kuyruk uzunluğu gibi parametrelere dayalı olarak sinyal fazlarını ve sürelerini dinamik biçimde ayarlayan uyarlanabilir yaklaşımların” trafik performansını önemli ölçüde iyileştirdiği vurgulanmaktadır. Ayrıca, “çevrimdışı pekiştirmeli öğrenme tabanlı modellerin, gerçek zamanlı veriye ihtiyaç duymadan eğitilerek ortalama seyahat sürelerini azalttığı” bulgusu [17] senaryo tabanlı simülasyon analizlerine dayanan bu çalışmanın yaklaşımını destekler niteliktedir.

Bazı sınırlılıklar mevcuttur: Çalışma yalnızca 14:00–15:00 saat aralığını kapsamakta ve araç türleri ayrımı yapılmamaktadır. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalar farklı zaman dilimlerinde (yoğun olan 14:-15:00 saat dilimi değişip yoğunluk başka saatlere kayabilir) veri toplayarak, araç tiplerini dikkate alarak veya dinamik sinyalizasyon algoritmalarını dahil ederek daha kapsamlı ve genellenebilir analizler yapılabilir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, trafik akışının optimize edilmesine yönelik simülasyon tabanlı bir analiz gerçekleştirilmiş ve kavşak düzeyinde ölçülebilir iyileşmeler sağlandığı gözlemlenmiştir. Özellikle Senaryo 19'da uygulanan ışık süreleri ile Bi1 kuyruk noktasındaki gecikme süreleri ve araç sayısında belirgin bir azalma sağlanmıştır. Çalışmanın özgün katkısı, mikro düzeyde simülasyon analizlerinin

sistematik bir biçimde yürütülmesi ve elde edilen sonuçların genellenebilir bir çerçeveye dönüştürülmesinde yatmakta ve düşük maliyetle ile değişik senaryolar gözlemlenebilmektedir. Bu yaklaşım, yalnızca mevcut kavşak sorunlarının çözülmesine olanak tanımakla kalmayıp, benzer şehir içi trafik problemlerinde uygulanabilecek bir metodoloji sunmaktadır.

Ayrıca, çalışma; trafik yönetiminde daha gelişmiş senaryo kurguları, farklı yazılım araçları ve gerçek zamanlı veri analizlerinin kullanılması ile sistemin optimize edilmesine temel oluşturabilecek niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda önerilen geliştirmeler şunlardır:

Farklı zaman dilimlerinde (sabah ve akşam saatleri) veri toplanarak günün farklı saatlerindeki performansın analiz edilmesi,

Araç tiplerinin (otomobil, minibüs, otobüs) ayrı ayrı değerlendirilmesi,

Yaya fazının sinyal planına entegre edilmesi,

IoT tabanlı sensörler ve gerçek zamanlı veri analizleri kullanılarak adaptif sinyalizasyon sistemlerinin test edilmesi.

Sonuç olarak, kavşak düzeyinde elde edilen simülasyon tabanlı bulguların, şehir genelinde uygulanabilecek trafik planlaması stratejilerine ışık tutabilecek potansiyele sahip olduğu ve hem bilimsel hem de pratik açıdan değerli bir referans oluşturduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmayı hazırlamama ilham olan Balıkesir Üniversitesi Endüstri Mühendisliğinden Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Ahmet Beyazıt Ocaktan'a ve destekleri için Jeoloji Mühendisi Ayşe Yaşar, Gıda Mühendisi Buse Yaşar, Mekatronik Mühendisi Ahmet Akif Sağlam ve Elektrik-Elektronik Mühendisi Dursun Alp Kızıllöz'e teşekkür ederim.

KAYNAKÇA (REFERENCE)

- [1] İnağ T. ve Arıkan M., "Kavşaklarda trafik ışık optimizasyonu: Ankara ili'nde bir uygulama", Politeknik Dergisi, 28(1): 45-58, (2025).
- [2] AbouRizk S. and Mohamed Y., (2000) Symphony-An Integrated Environment for Construction Simulation, Simulation Conference, 10-13 December 2000, Orlando, USA
- [3] Smith, S. F., Barlow, G. J., & Xie, X.-F. (2008). Scalable Urban Traffic Control (SURTRAC). The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [4] Özkan, A., Yılmaz, B., & Demir, C. (2024). Simulation-based traffic analysis of urban intersections in Turkey. Journal of Traffic and Transportation Engineering. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/ulakbim>
- [5] Acerce, A., & Al-Khayyat, A. (2020). An NSGA-II-Based Optimization Case Study from Dhahran, Saudi Arabia. Sustainability, 12(18), 7394. <https://doi.org/10.3390/su12187394>

- [6] Kou, W., Zhang, Y., Li, Z., Zhang, Y., & Li, Y. (2018). Multiobjective optimization model of intersection signal timing considering emissions based on field data: A case study of Beijing. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(7), 04018033. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000197>
- [7] Siddiqui, S. (2015). Signal timing evaluation and optimization: A case study of an intersection in Bozeman. Montana State University. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2348.9362>
- [8] Mahato, S. (2025). Multi-agent reinforcement learning for urban traffic light control: A comparative study. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. (Forthcoming).
- [9] Karayolları Genel Müdürlüğü, 2005. *Karayolu Tasarım El Kitabı*. Ankara.
- [10] Yılmaz, H., Ilıcalı, M., (2024). Alternatif Dlt Sinyalize Kavşağın Simülasyon ile Analiz Edilmesi, *Journal of Technology and Applied Sciences* 7(2) s.213-235, DOI: 10.56809/icujtas.1494087
- [11] Yayla, N., 2004. *Karayolu Mühendisliği*. Birsen Yayınevi.
- [12] Celtek, S.A., Durdu, A. and Alı, M.E.M., "Real-time traffic signal control with swarm optimization methods", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 166, (2020).
- [13] Duman, Z.N., Murat, Y.S. and YİLmaz, M., "Koordine Kavşaklarda Sinyalizasyon Sistemine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi Vaka Durum Çalışması", *Politeknik Dergisi*, 1-1, (2023).
- [14] Tomescu, O., Moise, I.M., Stanciu, A.E. and Batros, I., "Adaptive traffic light control system using ad-hoc vehicular communications network", *Taiwanese Association for Artificial Intelligence*, 74(2): 1-8, (2012).
- [15] Mo, Z., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022). CVLight: Decentralized learning for adaptive traffic signal control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 141, 103728. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103728>
- [16] Çakıcı, Z., & Murat, Y. S. (2021). Sinyalize dönel kavşaklarda diferansiyel gelişim algoritması ile sinyal süre optimizasyonu. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendislik Dergisi (ECJSE)*, 8(2), 635-651. <https://doi.org/10.31202/ecjse.861429>
- [17] Wang, L., Wang, Y.-X., Li, J.-K., Liu, Y., & Pi, J.-T. (2024). Çevrimdışı Takviyeli Öğrenmeye Dayalı Uyarlanabilir Trafik Sinyali Kontrol Yöntemi. *Uygulamalı Bilimler*, 14 (22), 10165. <https://doi.org/10.3390/app142210165>