

## SIDRA INTERSECTION PROGRAMI İLE KAVŞAK İYİLEŞTİRMESİNİN TAŞIT EMİSYON MİKTARLARINA ETKİSİ: ZONGULDAK ÖRNEĞİ

Özgür ZEYDAN <sup>1(\*)</sup>, Mine POLAT <sup>2</sup>, Gülçin DEMİREL BAYIK <sup>1</sup>, Mustafa TANIŞ <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

<sup>2</sup> Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak

### ÖZET

Şehir içi hava kirliliğinin en önemli kaynaklarından biri olan motorlu taşıt emisyonları, büyük ölçekli şehirlerde gün geçtikçe artan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Trafikte bulunan taşıt sayısı, taşıt teknolojisi, yol ve kavşak geometrisi, çevresel faktörler ile sürücü davranışları emisyon miktarı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kavşaklar, özellikle şehir içi trafiğinde, trafik akımının en sık kesintiye uğradığı alanlardır. Trafik akım özelliklerinin büyük değişikliğe uğradığı ve taşıtlarının dur kalk yaptığı bu alanlarda oluşan emisyonlar, kesintisiz akımlara göre daha fazladır.

Bu çalışmada, Zonguldak ili 100. Yıl Şehirlerarası Otobüs Terminali Kavşağının mevcut durumunda oluşan emisyonlar SIDRA INTERSECTION yazılımı ile tespit edilmiş, daha sonra aynı programla kavşakta sinyal sürelerinde iyileştirme yapılarak yeni emisyon miktarları belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda iyileştirme öncesi ve sonrasındaki yakıt tüketim miktarları ve kirletici emisyonları belirlenmiştir. Kavşakta yapılan gözlemler sonucunda mevcut durumda bütün taşıtlar tarafından harcanan saatlik toplam yakıt miktarı 502.6 lt, saatlik CO<sub>2</sub>, CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyon salınımları sırasıyla 1222.8, 1.27, 0.153 ve 4.537 kg olarak tespit edilmiştir. Daha sonra kavşağın sinyalizasyon sürelerinin değiştirilmesiyle iyileştirme yoluna gidilmiş ve yeni bir sinyalizasyon senaryosu ile kavşak tekrar modellenmiştir. Bunun sonucunda toplam yakıt miktarında %22.3'lük bir azalma elde edilmiştir. Ayrıca CO<sub>2</sub>, CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyon salınımları sırasıyla %21.9, %35.4, %41.8 ve %11.7 oranında azalmıştır. İyileştirme sonucu elde edilen verilerle, mevcut durum verileri arasında ciddi farklılıklar olduğu görülmüştür. Kavşaklarda yapılacak geometrik düzenlemeler veya sinyalizasyon düzenlemeleriyle, taşıtlardan kaynaklı emisyon miktarlarının önemli oranlarda azaltılabileceği ve şehir içi hava kalitesinin artırılabilceği sonucuna varılmıştır.

### ANAHTAR SÖZCÜKLER

Hava Kirliliği, Motorlu Taşıt Emisyonları, SIDRA INTERSECTION, Zonguldak.

### ABSTRACT

Motor vehicles emissions, one of the major sources air pollution in cities, are confronting as an increasing problem day by day in big cities. Number of vehicles in traffic, vehicles technology, geometric and traffic conditions of highways and intersections, environmental factors and driver

(\*) ozgurzeydan@yahoo.com

behaviors affect vehicle emissions. Intersections, especially in local traffic, are the locations where traffic is interrupted mostly. Emissions of these points, where traffic behavior is changed and vehicles stop and go, are higher as compared to uninterrupted flows.

In this study, current state emissions at Zonguldak Intercity Bus Terminal Intersection are determined by SIDRA INTERSECTION software. Then, new emissions are determined by the same software after improvement in signalization.

As a result of the study, fuel consumption and pollutant emissions are calculated before and after improvement. As a result of observations at the intersection, current state fuel consumption is calculated as 502.6 lt/hour and CO<sub>2</sub>, CO, HC and NO<sub>x</sub> emissions are 1222.8, 1.27, 0.153 and 4.537 kg/hour respectively. Then, intersection is modeled again after improvement by changing the signalization. This leads to 22.3% reduction in total fuel consumption. In addition, CO<sub>2</sub>, CO, HC and NO<sub>x</sub> emissions are reduced by 21.9%, 35.4%, 41.8% and 11.7% respectively. It has been seen that there exist a quite difference between current state and after improvement data. Improvements on geometric conditions or signalization at intersections may result in decreasing vehicle emissions and improving air quality of cities.

## KEYWORDS

Air Pollution, Motor Vehicle Emissions, SIDRA INTERSECTION, Zonguldak.

## 1. GİRİŞ

Şehir içi hava kirliliğinin en önemli kaynaklarından biri olan motorlu araç emisyonları, özellikle kent merkezlerinde giderek artan bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Motorlu taşıt kullanımı, diğer insan faaliyetlerine göre daha fazla hava kirliliği yaratmaktadır. Karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarının yanı sıra karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonuna da kirliliğe katkıda bulunmaktadır. Şehir merkezlerinde, insan faaliyetleri ve trafik yoğunluğu nedeniyle kirletici emisyonlar daha yüksektir. Ulaştırma sektörü, sera gazı emisyonunda yaklaşık %16'lık etkiye sahip önemli faktörlerden biridir (Yanarocak 2007).

Trafik kaynaklı emisyonları etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunlar; trafikteki taşıt sayısı, taşıt teknolojisi, yol ve kavşak geometrisi, kavşaklardaki sinyalizasyon düzeni, çevresel faktörler ve sürücü davranışları olarak belirtilebilir. Ulaştırma sektöründe en çok ortaya çıkan emisyon CO<sub>2</sub> emisyonudur. Bu emisyon, içten yanmalı motorlarda benzin ve dizel gibi petrol esaslı ürünlerin yakılması sonucunda atmosfere salınmaktadır. Yakıtın yanması sırasında nispeten daha az miktarda metan (CH<sub>4</sub>) ve azot oksitlerin (NO<sub>x</sub>) salınımı ortaya çıkmaktadır. Ulaştırma ile ilgili sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağı, taşıt sayısının fazla olmasından dolayı, otomobiller ve kamyonetlerdir. Bu kaynaklar sektördeki emisyonların yarısından fazlasını oluşturmaktadır (USEPA, 2017).

Kavşaklar, taşıt trafiğinin akım hızını yavaşlatır ve durdurur. Duraklama arttıkça, daha fazla yakıt tüketilir ve taşıt kaynaklı emisyonlar artar. Şehir içinde bulunan taşıt emisyonlarının gün geçtikçe artması ile beraber, yollarda trafik akımının iyileştirilmesine yönelik, etkili trafik denetim araçlarını

seçmek ve taşıt kilometresi başına düşen emisyonları azaltmak oldukça önemli bir hale gelmiştir (Mandavilli et al., 2003).

Mandavilli ve diğ. (2003) Kansas'ta bulunan üç kollu, trafik sinyal kontrollü bir kavşağının dönel (yuvarlakada) kavşakla değiştirilmeden önceki ve sonraki gerçek verilerini toplayarak incelemiştir. Bu çalışmalarında, karbon monoksitte (CO) %45, karbon dioksitte %61, azot oksitlerde (NOx) %51 ve hidrokarbonlarda (HC) da %68 oranında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

İsveç'te gerçekleştirilen bir çalışmada, yol kesişim noktalarında ve kavşaklar arasında kalan yollarda dönel kavşakların trafik akışına olan etkisi incelenmiştir. Dönel kavşakların bulunduğu noktalarda araç hızlarının önemli ölçüde düştüğü belirtilmiştir. Sinyal sistemine sahip bir yol kesişim noktasına dönel kavşak kurulumu ile sinyallerde harcanan zamanın önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. Bu tip bağlantı noktalarına dönel kavşak kurulumu ile CO emisyon miktarında %20 ve NOx miktarında ise %29 oranında azalma olduğu bulunmuştur. Sinyalizasyon sistemi olmayan bağlantı noktalarına kurulan dönel kavşakların ise CO emisyonlarını %4 ve NOx emisyonlarını %6 arttırdığı tespit edilmiştir (Hydén and Várhelyi, 2000).

## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Emisyon envanteri

Ulusal seragazı emisyon envanteri çalışmaları kapsamında “Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Rehberi'nde önerilen yaklaşımlar kullanılarak enerji, endüstriyel işlemler, çözücü ve diğer ürünlerin kullanımı, tarımsal faaliyetler ve atıklardan kaynaklanan emisyonlar hesaplanabilmektedir (TÜİK, 2011).

IPCC Uygulama Rehberi'ne (GPG, 2000) göre; CO<sub>2</sub> eşdeğeri olarak ülkenin toplam emisyonlarının %95'ini oluşturan emisyon kaynakları, anahtar kaynak olarak nitelendirilmektedir. Ulaştırma sektörü bu rehberde belirtilen anahtar kaynaklardan birisidir ve enerji sektörü başlığı altında yer almaktadır. Ulaştırma sektörü; karayolu, yurtiçi sivil havacılık, demiryolu ve ulusal denizcilik faaliyetlerini kapsamaktadır. Uygulama rehberi emisyonların hesaplanmasında Tier1, Tier2 ve Tier3 olmak üzere 3 farklı formül sunmaktadır. Formülün seçiminde elde bulunan ve ulaşılabilecek veri miktarı esas alınmaktadır (EMEP/EEA, 2016). Emisyon hesaplamalarında kullanılacak emisyon faktörleri Avrupa Çevre Ajansı tarafından yayınlanan EMEP/EEA Emisyon Envanteri Rehberi'nden doğrudan alınabilmektedir. Hava kirliliğinde emisyon envanterlerinin hazırlanmasında kullanılan geleneksel yöntem, emisyon faktörlerinin aktivite istatistiği ve taşıt sayısı ile çarpılmasıdır. Bu çalışmada ise emisyonların hesaplanmasında, geleneksel yöntem yerine kavşaklarda sinyal düzeninin belirlenmesi amacı ile kullanılan SIDRA INTERSECTION yazılımından faydalanılmıştır.

### 2.2. Çalışma alanı

Zonguldak şehir merkezinde bulunan 100. Yıl Şehirlerarası Otobüs Terminali Kavşağı, Zonguldak'ı Ereğli ilçesine bağlayan D010 numaralı devlet karayolu üzerindedir. Trafik yükü fazla olan kavşakta özellikle pik (zirve) saatlerde taşıt kuyrukları oluşmakta ve seyahat süreleri artmaktadır. Buna bağlı olarak taşıt emisyon miktarları oldukça artmaktadır. Kavşak, terminalden çıkan şehirlerarası otobüsler, şehir içi taşıt trafiği ile kamyon ve treyler gibi ağır taşıtların kullandığı tek yol olması nedeniyle oldukça fazla taşıt trafiği hacmine maruzdur.

Çalışmanın yapıldığı kavşağın uydu görüntüsü Şekil 1’de sunulmuştur. Şekil 1’den de görüleceği gibi, incelenen sinyal kontrollü kavşak 4 kolludur. Şerit genişlikleri 3.30 metredir.

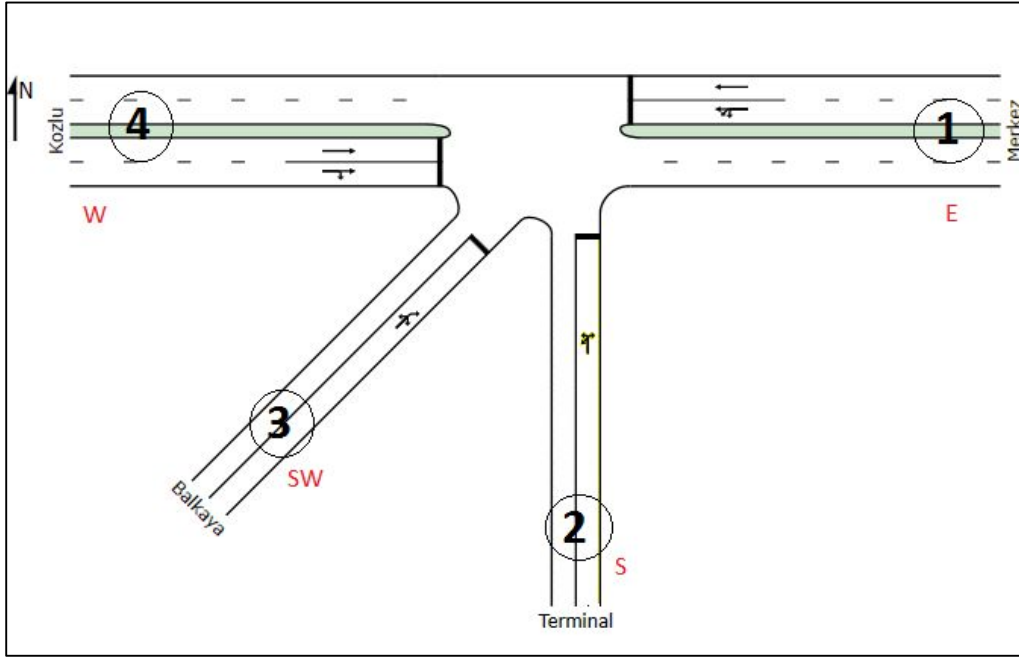


**Şekil 1.** Zonguldak 100. Yıl Şehirlerarası Otobüs Terminal Kavşağı uydu görüntüsü

1 numaralı akım kolu, şehir merkezinden gelen akımı, Kozlu ilçesi yönüne iletmektedir ve kol, 2 şeritlidir. Bu akım kolunda özellikle doğru giden taşıtlar için mevcut sinyal düzeninde taşıt kuyrukları oluşmaktadır. 2 numaralı akım kolu, taşıtların otobüs terminaline giriş ve çıkışını sağlamaktadır ve biri girişe diğeri çıkışa hizmet eden 2 şeritten oluşmaktadır. 3 numaralı akım kolu, kavşağı, Bahçelievler Mahallesi bağlamaktadır ve biri gidiş diğeri geliş olmak üzere 2 şeritten oluşmaktadır. 4 numaralı akım kolu, Kozlu ilçesinden gelen akımı şehir merkezine iletmektedir ve kol, 2 şeritlidir.

Kavşaktaki mevcut taşıt hacmini sayabilmek, dolayısıyla emisyon miktarlarını hesaplamak için Zonguldak Valiliği'nden izin alınmış ve bu gibi çalışmalarda, trafiğin sayılmasında sıklıkla kullanılan yöntem olan video kamera ile kayıt yöntemi tercih edilmiştir. Sabah 08:00 ile 09:00 saatleri arasında yapılan video çekimi sonucunda, her kola ait taşıt hacimleri ve mevcut durumdaki sinyal süreleri tespit edilmiştir. Bu verilerden oluşturulan trafik hacmi verisi, SIDRA paket programında yapılacak modelleme için kullanılmıştır. Terminal kavşağı akım kolları Şekil 2’de sunulmuştur.

Şekil 2’de görülen, 1 numaralı akım koluna ait trafik hacmi değerleri Tablo 1’de, 2 numaralı akım koluna ait değerler Tablo 2’de, 3 numaralı akım koluna ait değerler Tablo 3’de ve 4 numaralı akım koluna ait değerler Tablo 4’te sunulmuştur.



Şekil 2. Terminal kavşağına ait akım kolları

Tablo 1. 1 numaralı akım koluna ait hacmin diğer yönlere dağılımı

	(1-4) E-W		(1-3) E-SW		(1-2) E-S	
	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
<b>TOPLAM (taşıt/saat)</b>	<b>577</b>	<b>148</b>	<b>138</b>	<b>42</b>	<b>32</b>	<b>18</b>

Tablo 2. 2 numaralı akım koluna ait hacmin diğer yönlere dağılımı

	(2-1) S-E		(2-4) S-W		(2-3) S-SW	
	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
<b>TOPLAM (taşıt/saat)</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

**Tablo 3.** 3 numaralı akım koluna ait hacmin diğer yönlere dağılımı

	(3-1) SW-E		(3-2) SW-S		(3-4) SW-W	
	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
<b>TOPLAM (taşıt/saat)</b>	<b>246</b>	<b>45</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

**Tablo 4.** 4 numaralı akım koluna ait hacmin diğer yönlere dağılımı

	(4-1) W-E		(4-2) W-S	
	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt	Hafif Taşıt	Ağır Taşıt
<b>TOPLAM (taşıt/saat)</b>	<b>723</b>	<b>151</b>	<b>8</b>	<b>13</b>

Tablo 1’de görüldüğü gibi, 1 numaralı akım kolundan kavşağa girip diğer kollara dağılan saatlik hacimler 747 hafif taşıt ve 208 ağır taşıt olarak tespit edilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi, 2 numaralı akım kolundan kavşağa girip diğer kollara dağılan saatlik hacimler 9 hafif taşıt ve 14 ağır taşıt olarak tespit edilmiştir. Tablo 3’te görüldüğü gibi, 3 numaralı akım kolundan kavşağa girip diğer kollara dağılan saatlik hacimler 261 hafif taşıt ve 50 ağır taşıt olarak tespit edilmiştir. Tablo 4’te görüldüğü gibi, 4 numaralı akım kolundan kavşağa girip diğer kollara dağılan saatlik hacimler 731 hafif taşıt ve 164 ağır taşıt olarak tespit edilmiştir.

Özellikle 1 ve 4 numaralı akım kollarına ait hafif ve ağır taşıt hacimleri oldukça fazladır. Bu kollar kavşağın ana akım doğrultusudur. 3 numaralı akım koluna ait hacim de oldukça fazladır. Bu kol kavşağı Bahçelievler Mahallesi’ne bağlayan koldur. Daha önce de belirtildiği üzere 2 numaralı akım kolu terminale giriş-çıkış için kullanıldığından saatlik taşıt hacmi, tahmin edildiği üzere, oldukça azdır.

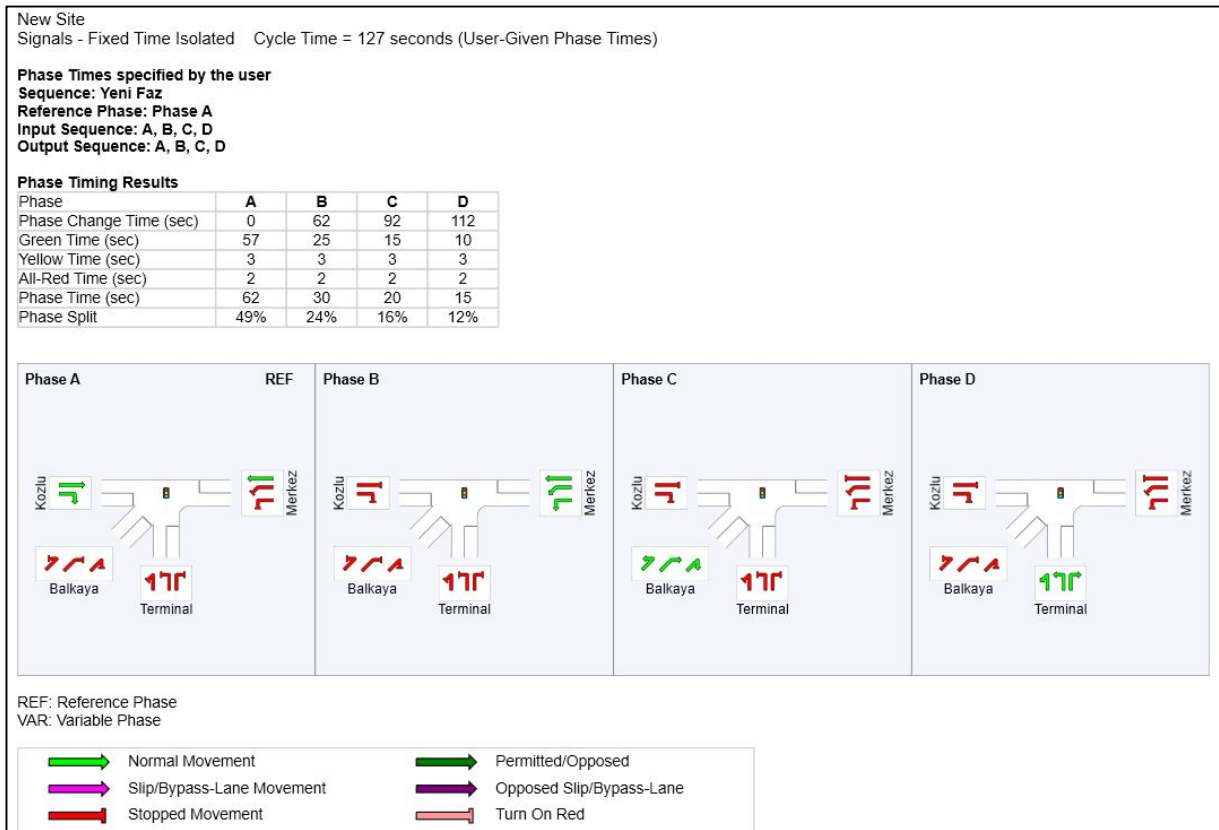
### 2.3. SIDRA INTERSECTION yazılımı

SIDRA INTERSECTION yazılımı kavşakların kapasite ve hizmet seviyesi açısından değerlendirilmesi, kavşaklarda alternatif sinyal düzenlerinin tasarlanması, taşıt ve yaya trafiği için kuyruk uzunluğu ve gecikme değerlerinin hesaplanması gibi performans ölçümlerinin belirlenmesinde kullanılan bir benzetim programıdır. Program her ne kadar trafik mühendisleri için kullanılabilir olsa da, trafik ile ilgili konularda önemli bir yere sahip olan emisyon salınımı da programın geliştiricileri tarafından düşünülmüş ve daha sonra programa dâhil edilmiştir. Hâlihazırda program; yakıt tüketimi, kirletici emisyonları ve işletme maliyeti hesapları için de kullanılmaktadır. SIDRA kelimesi, "sinyalli ve sinyalsiz kavşak tasarımı ve araştırma yardımı" anlamına gelen bir kısaltmadır (**SIDRA: Signalised and unsignalised Intersection Design and Research Aid**). İlgili program; sinyalli kavşaklar, sinyalli yaya geçitleri, dönel (yuvarlakada) kavşaklar, iki yönlü dur ve yolver kontrollü kavşaklar, bütün yönler dur ve yolver kontrollü kavşaklar, ana yol-tali yol kontrollü kavşaklar gibi birçok kavşak tiplerinin değerlendirilmesi ve tasarımı için kullanılmaktadır (Akçelik, 2011).

**SIDRA INTERSECTION ile terminal kavşağının mevcut durumunun modellenmesi.** Terminal kavşağının mevcut durumunun modellenmesi için programa veri olarak girilecek parametreler ve değerlerinin ölçümü sahada yapılmıştır. Bu veriler; kavşak geometrisi, trafik verisi ve sinyalizasyon verisi olmak üzere 3 gruba ayrılabilir.

İlk olarak, kavşak verisi programda tanımlanmıştır. Bunun için kavşaktaki kol sayısının, kolların yaklaşık coğrafi yönünün, her kola ait şerit sayısının, akım yönlerinin, dönüş yönlerinin belirlenmesi ve akım yönlerinin numaralandırılması gerekmiştir. İkinci olarak, trafik verisi programda tanımlanmıştır. Kavşağa giren trafik hacimleri, hafif ve ağır taşıtlar ayrı birer grup olmak üzere, her bir akım kolu ve dönüş yönü için "hacim değeri" olarak atanmıştır. Ayrıca, kavşaktaki her bir akım koluna ait sahada ölçülen kol uzunlukları, ilgili akım kolunda geriye doğru tıkanma sorunu olup olmayacağını görebilmek için "yaklaşma boyu" olarak atanmıştır.

Son olarak; kavşakta, hangi yönlere hangi sıra ile geçiş hakkı verileceğini gösteren "faz planı" ve "sinyal süreleri" sahada mevcut durum için yapılan gözlemlerden edinilen değerler kullanılarak programa girilmiştir. Mevcut durumda, herhangi bir akım yönüne yeniden geçiş hakkı verilmesi için geçmesi gereken süreyi gösteren "devre süresi" 127 saniye olarak ölçülmüştür. Sahada ölçülen veriler girildikten sonra mevcut durumdaki faz planı ve sinyal sürelerinin birlikte gösterimi Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Terminal kavşağı faz planı ve sinyal süreleri

Sinyal kontrollü kavşak tasarımında en önemli parametrelerden biri doygun akım değeridir. Doygun akım değeri; sinyal kontrollü bir kavşakta, yeşil ışığın devamlı yanması halinde bir saatte kavşaktan geçebilen taşıt sayısı olarak tanımlanır. Doygun akım değeri, zaman cinsinden aralık yöntemiyle saha gözlemlerinden hesaplanmıştır. Bu değer de programa veri olarak girilmesi sonrasında kavşak analiz edilmiş ve kavşağın mevcut sinyalizasyon durumunda işletilmesinden doğan emisyon değerleri program tarafından hesaplanmıştır.

**Terminal kavşağı için SIDRA INTERSECTION programının önerdiği model analizi.** Kavşağa ait ilk yapılan mevcut duruma ait modellemede kullanılan bütün veriler, üretilen senaryonun modellenmesi için de kullanılmıştır. Senaryoda değişen tek veri, doygun akım değeri verisidir. Mevcut durumu analiz ederken saha ölçümlerinden hesaplanan değer yerine literatürde önerilen değer kullanılmıştır. TRB (2000), doygun akım değerini 1900 otomobil/saat/şerit olarak önermektedir. Program, senaryonun analizi sonrasında devre süresini 90 saniye olarak hesaplanmıştır.

**SIDRA INTERSECTION yazılımında yakıt tüketimi ve emisyon hesapları.** SIDRA INTERSECTION yazılımı yakıt tüketimi ve emisyon hesaplarında taşıtları "hafif taşıt" ve "ağır taşıt" olmak üzere iki ayrı sınıfta değerlendirmektedir. Ağır taşıt, ikiden fazla dingili veya dört tekerlekten fazla tekerleği olan taşıt olarak kabul edilmektedir. Bu özellikte olmayan otomobil, minibüs, kamyonet gibi taşıtlar hafif taşıt olarak değerlendirilmektedir. Kavşaklardaki yakıt tüketimi ve emisyon miktarları standart sürüş döngüsünü oluşturan şu 4 durum için ayrı ayrı hesaplanmaktadır: sabit hızda sürüş (cruise), yavaşlama, rölantide bekleme (idle), hızlanma (ve yeniden sabit hızda sürüş). Yakıt tüketimi, sürüş anındaki herhangi bir zaman için aracın çekiş gücünün fonksiyonu olarak belirtilmiştir (Denklem 1-6) (Akçelik vd., 2012).

$$f_t = \alpha + \beta_1 P_T + [\beta_2 a P_I] a > 0 \quad P_T > 0 \quad (1)$$

$$f_t = \alpha \quad P_T < 0$$

$$P_T = \min(P_{maks}, P_C + P_I + P_G) \quad (2)$$

$$P_C = b_1 v + b_2 v^3 \quad (3)$$

$$P_I = M_v a v / 1000 \quad (4)$$

$$P_G = 9.81 M_v (G / 100) v / 1000 \quad (5)$$

$$\alpha = f_i / 3600 \quad (6)$$

Burada,

$f_t$  : anlık yakıt tüketimi (mL/s),

$P_T$  : toplam çekiş gücü (kilowatt, kW),

$P_{maks}$  : maksimum motor gücü (kW),

$P_C$  : toplam gücün sabit hız (cruise) bileşeni (kW),

$P_I$  : toplam gücün eylemsizlik (ivme) bileşeni (kW),

$P_G$  : toplam gücün eğim bileşeni (kW),

$G$  : yol eğimi (yüzde), yokuş aşağı ise negatif,

$M_v$  : aracın ağırlığı (kg) yolcular ve yük dahil,

$v$  : anlık hız (m/s) =  $v$  (km/h) / 3.6

$a$  : anlık ivme (m/s<sup>2</sup>), yavaşlama için negatif,

$\alpha$  : rölantideki sabit yakıt tüketim oranı (mL/s),



$f_i = 3600 \alpha$  : rölantideki sabit yakıt tüketimi (mL/h),  
 $b_1$  : yuvarlanma direnci ile ilgili taşıt parametresi (kN),  
 $b_2$  : aerodinamik sürüklenme ile ilgili taşıt parametresi (kN/(m/s)<sup>2</sup>),  
 $\beta_1$  : motor tarafından sağlanan güce karşılık tüketilen yakıt ile ilgili verimlilik parametresi (mL/kJ veya g/kJ),  
 $\beta_2$  : pozitif ivme değerine karşılık tüketilen yakıt ile ilgili verimlilik parametresi (mL/(kJ.m/s<sup>2</sup>) veya g/(kJ.m/s<sup>2</sup>)).

Eğimsiz bir yol ( $G = 0$ ,  $P_G = 0$ ) ve sabit hızla ( $a=0$ ,  $P_I=0$ ) sürüş durumunda tüketilen yakıt miktarı aşağıdaki denklemler (7a, 7b, 7c, 8a ve 7b) ile ifade edilmiştir.

$$f_{ct} = \alpha + \beta_1 P_C \quad (7a)$$

$$f_{ct} = \alpha + \beta_1 (b_1 v + b_2 v^3) \quad (7b)$$

$$f_{ct} = \alpha + c_1 v + c_2 v^3 \quad (7c)$$

Burada;

$$c_1 = b_1 \beta_1 \quad (8a)$$

$$c_2 = b_2 \beta_1 \quad (8b)$$

$c_1$  parametresinin birimi mL/m ve  $c_2$  parametresinin birimi de (mL/m)/(m/s)<sup>2</sup>'dir.

Denklem 7c, yakıt tüketiminin belirlenmesinde modelin kalibrasyonu için kullanılan önemli bir formüldür.  $c_1$ ,  $c_2$  ve  $\beta_1$  değerlerinin kalibrasyon sonucunda elde edilmesiyle model tarafından girdi olarak kullanılacak A ve B değerleri hesaplanabilir (Denklem 9a, 9b).

$$A = 1000 c_1 \quad (9a)$$

$$B = c_2 / 0.01296 \quad (9b)$$

Burada, A parametresinin birimi mL/km ve B parametresinin birimi de (mL/km)/(km/h)<sup>2</sup>'dir.

$b_1$  ve  $b_2$  parametreleri ise dolaylı olarak Denklem 10a ve 10b ile belirlenir.

$$b_1 = c_1 / \beta_1 \quad \text{eğer } \beta_1 > 0 \quad (10a)$$

$$b_1 = 0 \quad \text{eğer } \beta_1 = 0$$

$$b_2 = c_2 / \beta_1 \quad \text{eğer } \beta_1 > 0 \quad (10b)$$

$$b_2 = 0 \quad \text{eğer } \beta_1 = 0$$

Denklem 10a ve 10b'de,  $b_1$  ve  $b_2$  parametrelerinin hesaplanmasında  $c_1$  ve  $c_2$ 'nin kullanılmasının amacı motor tarafından sağlanan çekim kuvvetinin yakıt tüketiminde uygun şekilde ifade edilebilmesidir.

Anlık karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonu (g/s) doğrudan anlık yakıt tüketimi kullanılarak belirlenir (Denklem 11).

$$f_i(\text{CO}_2) = f_{\text{CO}_2} f_i(\text{yakıt}) \quad (11)$$

Burada,

$f_i(\text{yakıt})$  : yakıt tüketim değeri (mL/s),

$f_{\text{CO}_2}$  : CO<sub>2</sub>'in yakıt tüketimine oranı (g/mL) veya (kg/L).

Model, Karbon Monoksit (CO), Hidrokarbon (HC) ve Azot Oksit (NO<sub>x</sub>) emisyon değerlerini de (mg/s), tıpkı karbondioksit değerinde olduğu gibi, fakat daha farklı parametreler kullanarak hesaplanmaktadır (Akçelik vd., 2012). Hafif taşıtlar ve ağır taşıtlar için kullanılan bu parametreler sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 5.** SIDRA INTERSECTION yakıt tüketim ve emisyon model parametreleri (hafif taşıt)

(Ağırlık: 1600 kg, Maksimum güç: 120 kW, Yakıt tüketimi CO <sub>2</sub> oranı: 2.35)	Yakıt	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Rölantide sabit yakıt tüketim değeri, $f_i$	1200.0	1620.0	340.0	300.0
Sürüklenme Parametresi, A	16.0	-138.0	-9.0	-14.0
Sürüklenme Parametresi, B	0.004	0.0743	0.0031	0.0068
Verimlilik Parametresi, $\beta$	0.1	0.294	0.029	0.166

**Tablo 6.** SIDRA INTERSECTION yakıt tüketim ve emisyon model parametreleri (ağır taşıt)

(Ağırlık: 15000 kg, Maksimum güç: 170 kW, Yakıt tüketimi CO <sub>2</sub> oranı: 2.633)	Yakıt	CO	HC	NO <sub>x</sub>
Rölantide sabit yakıt tüketim oranı, $f_i$	2300.0	25000.0	3000.0	44000.0
Sürüklenme Parametresi, A	200.0	-320.0	1.0	2820.0
Sürüklenme Parametresi, B	0.009	-0.06	-0.0016	0.21
Verimlilik Parametresi, $\beta$	0.075	0.04	0.0013	1.9

### 3. SONUÇLAR

Kavşakta yapılan gözlemler sonucunda mevcut durumda kavşak SIDRA INTERSECTION ile modellenmiş ve kavşaktaki bütün taşıtlar tarafından harcanan saatlik toplam yakıt miktarı 502.6 lt/h olarak hesaplanmıştır. Saatlik CO<sub>2</sub>, CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyon salınımları sırasıyla 1222.8, 1.27, 0.153 ve 4.537 kg olarak tespit edilmiştir. Daha sonra kavşağın mevcut sinyalizasyon sürelerinin, programın önerdiği şekilde değiştirilmesi ve doymun akım değerinin literatürde belirtilen değer olan 1900 otomobil/saat/şerit olarak alınmasıyla bir senaryo çerçevesinde kavşak tekrar modellenmiştir. Sinyalizasyon iyileştirmesinden sonra kavşaktaki bütün taşıtlar tarafından tüketilen yakıt miktarı saatte 390.6 litreye düşmüştür. Bu değer %22.3'lük bir yakıt tasarrufuna karşılık gelmektedir. Yakıt tüketimini azalmasına bağlı olarak motorlu taşıt emisyonlarında da daha düşük salınımlar ortaya çıkmıştır. Yeni durumda, bir saatte atmosfere salınan emisyon miktarları 954.5 kg CO<sub>2</sub>, 0.82 kg CO, 0.089 kg HC ve 4.006 kg NO<sub>x</sub> olarak hesaplanmıştır. İki senaryo birbiri ile kıyaslandığında CO<sub>2</sub>, CO, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonları sırasıyla %21.9, %35.4,

%41.8 ve %11.7 oranında azalmıştır. Her iki senaryo için hesaplanmış olan yakıt tüketimi ve emisyon miktarları topluca Tablo 7’de gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Hesaplanan yakıt tüketimi ve emisyon miktarları

	Yakıt (lt h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> (kg h <sup>-1</sup> )	CO (kg h <sup>-1</sup> )	HC (kg h <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (kg h <sup>-1</sup> )
Mevcut durum	502.6	1222.8	1.27	0.153	4.537
Sinyalizasyon iyileştirmesi sonrası	390.6	954.5	0.82	0.089	4.006
Fark	112	268.3	0.45	0.064	0.531
Fark (%)	-22.3	-21.9	-35.4	-41.8	-11.7

Sinyalizasyon iyileştirmesi sonrası ortaya çıkan 112 lt/h’lik yakıt tasarrufu oldukça önemli bir kazanımdır. 12 Eylül 2017 tarihinde Zonguldak Merkez’de Benzin fiyatı 5.31 TL/lt ve Motorin fiyatı da 4.65 TL/lt’dir. Ortalama yakıt fiyatının 5 TL olduğu ve kavşakta günde 8 saat boyunca aynı hacimde taşıt trafiğinin aktığı düşünülürse yılda tasarruf edilecek toplam yakıt bedeli yaklaşık olarak 1635200 TL (= 112 lt/h × 5 TL/lt × 8h/gün × 365gün) olarak hesaplanabilir. Bu ve benzer şekilde emisyonlar üzerinden yapılabilecek diğer hesaplamalar, şehirlerimizdeki motorlu taşıt trafiğinin hem ülke ekonomisi hem de hava kirliliğine olan olumsuz etkisinin birer göstergesidir.

#### 4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

SIDRA INTERSECTION yazılımı temel olarak trafik mühendisliği alanında çalışan uzmanların kullanımı amacıyla geliştirilmiştir. Şehirlerin önemli dinamiklerinden biri olan trafik pek çok bileşeni içerdiği için, zamanla yazılımda gereksinimler doğrultusunda güncellemeler yapılmıştır. Çevre mühendisliği açısından, bu güncellemelerin en önemlisi programın sunmuş olduğu yakıt tüketimi ve emisyon miktarlarının hesaplanmasıdır. SIDRA INTERSECTION yazılımı ile kavşakların sinyalizasyon sistemlerinin düzenlemesi veya iyileştirilmesinin sonucunda emisyon miktarlarının ciddi oranda azaldığı söylenebilir. Gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda elde edilen veriler yakıt tüketim miktarının ve motorlu taşıt emisyonlarının çalışma alanında önemli oranda azaldığını göstermektedir. Ayrıca, SIDRA INTERSECTION yazılımının karayolları için emisyon envanteri hazırlamada geleneksel yöntemlere göre daha avantajlı olduğu söylenebilir. Geleneksel yöntemde yol tipi kentsel, kırsal veya otoyol olarak seçilip taşıtların sabit hız ile gittiği varsayımı yapılmaktadır. SIDRA INTERSECTION yazılımı ise, taşıt trafiğini trafiğin daha çok sıkıştığı ve dur-kalk hareketinin yapıldığı kavşaklara göre modellemektedir. Ayrıca, yazılım sonucu ortaya çıkan değerlerin kavşak alanında yapılacak saha ölçümleri ile karşılaştırılarak doğrulanması gerekmektedir. Bunlara ek olarak, yapılacak çalışmaların artması ile elde edilen veriler doğrultusunda, programda kullanılan hazır parametreler (f, A, B, β) yerine Türkiye’de kullanılabilir yeni parametrelerin belirlenmesi gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Akçelik, R, 2011. Sidra Intersection User Guide. Akçelik & Associates Pty. Ltd., Avustralya.
- Akçelik, R., Smit, R., Besley, M., 2012. Calibrating fuel consumption and emission models for modern vehicles. *IPENZ Transportation Group Conference*, 18 Mart 2012, Rotorua, New Zealand.
- EMEP/EEA, 2016. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook. European Environmental Agency, Luxembourg.
- Hydén, C., Várhelyi, A., 2000. The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study. *Accident Analysis & Prevention* 32, 11-23.
- Mandavilli, S., Russel, E.R., Rys, M., 2003. Environmental Impact of Kansas Roundabouts, *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Toronto, Ontario.
- TRB, 2000. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Washington D. C., USA.
- TÜİK, 2011. Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri:1990-2009. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- URL-1 <<http://www.sidrasolutions.com/Software/INTERSECTION/Introduction>>, Erişim Tarihi: 05.05.2017.
- USEPA. Retrieved 02.05.2017, 2017, from <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.
- Yanarocak, K. R., 2007. *Marmaray Projesinin Karayolu Ulaşımından Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, İstanbul.