



Hibrit ve Elektrikli Araçlar için Güç Aktarım Sistemi Bağlantılı Yeşil Rotalama

Vehicle Powertrain Connected Green Routing for Hybrid and Electrified Vehicles

Orkun Karabaşoğlu ^{1*} 

¹ Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: orkun.karabasoglu@yasar.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 05.05.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 12.10.2020

DOI:10.21205/deufmd.2021236807

Atıf şekli/How to cite KARABASOĞLU, O.(2021) Hibrit ve Elektrikli Araçlar için Güç Aktarım Sistemi Bağlantılı Yeşil Rotalama. DEÜ FMD 23(68), 421-433.

Öz

Bu çalışma, gelişmiş araç teknolojileri için aracın güç aktarım unsurlarının durumlarını ve trafik şartlarını göz önünde bulunduran yenilikçi bir yeşil rota optimizasyonu stratejisi önermektedir. Geleneksel navigasyon sistemleri, optimal rotayı belirlerken sürücülere en kısa mesafe, en kısa süre veya en çok tercih edilen yollar gibi seçenekler sunmaktadır. Bu seçenekler doğrultusunda bulunan optimum rota çevreye zararlı olan gaz emisyonlarını minimum seviyede tutmayı garanti etmemektedir. Özellikle hibrit ve elektrikli araçlar gibi gelişmiş araçlar söz konusu olduğunda optimum rotanın belirlenmesine etki eden faktörler değişmektedir. Bu sebeple bu çalışmada, rota optimizasyonuna araç aktarım sistemi dinamikleri, elektrikli ve benzinli motor verimlilikleri, kontrol modları, batarya boyutu, bataryanın enerji seviyesi ve trafik durumu gibi girdilerin entegre edildiği "Araç Güç Aktarım Sistemi Bağlantılı Yeşil Rota Optimizasyonu" olarak adlandırılan bir yöntem önerilmiştir. Rota optimizasyonu probleminin çözümünde yukarıdaki faktörler göz önünde bulundurulmuş, amaç fonksiyonunu en düşük CO₂ emisyonu olarak belirlenmiş ve çözüm yöntemi olarak Dijkstra algoritması kullanılmıştır. Ek olarak, önerilen stratejinin, farklı araç teknolojilerinin CO₂ emisyon miktarını azaltma oranları ve optimal rotalara etkileri analiz edilmiştir. Sırasıyla geleneksel ve elektrikli araçlar için en kısa mesafe algoritmasına kıyasla bu çalışmada önerilen optimizasyon yöntemi kullanıldığında geleneksel araçların yolculuklarının yaklaşık %80'i ve elektrikli araçla yapılan yolculukların %60'ı yeni yeşil optimal rotalara sahip olmaktadır. Ayrıca, önerilen strateji sayesinde, en kısa yol stratejisine kıyasla, sırasıyla geleneksel ve elektrikli araçlar için %60 ve %30'a kadar varan emisyon tasarrufu sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Araç Güç Aktarım Sistemi Bağlantılı Yeşil Rota Optimizasyonu, Elektrikli ve Hibrit Araçlar, Navigasyon, Eko-rotalama

Abstract

This study proposes a new approach to traditional navigation systems that are now widely used. Conventional navigation systems offer drivers the choice of the shortest distance, the shortest time, or the most preferred routes when determining the optimal route. The optimum route in line with these options does not ensure that the gas emissions that are harmful to the environment are kept to a minimum. Especially, in the case of advanced vehicles such as hybrid and electric vehicles, the

factors affecting the determination of the optimum route are subject to change. For this reason, a framework called "Vehicle Powertrain Connected Green Route Optimization" has been proposed to integrate inputs such as vehicle powertrain dynamics, component efficiencies, control modes, initial status and traffic conditions to route optimization. The objective function of route optimization problem is determined as lowest CO_2 emission and Dijkstra algorithm is used as solution method. In addition, the proposed strategy reduces the amount of CO_2 emissions and the effect on the route change for different vehicle powertrains such as CV, HEV, PHEV and BEV were analyzed. Using the proposed optimization algorithm for conventional and electric vehicles, respectively, compared to the shortest distance algorithm, approximately 80% and 60% of the journeys have new optimal routes. In addition, the proposed strategy saves up to 60% and 30% emissions for CVs and electric vehicles, respectively, compared to the shortest route strategy.

Keywords: Vehicle Powertrain Connected Green Route Optimization, Electric and Hybrid Vehicles, Navigation, Eco-routing

1. Giriş

Sürdürülebilirlik mücadelesi ülkeleri sadece kârlı bir ekonomi oluşturmaktansa, daha sorumlu ve çevre dostu iş çevreleri kurmaya yönlendirmektedir. Çevresel zararları açısından sera gazı emisyonlarının limit aşmaları, ekosistemler için belirgin ve uzun vadeli olumsuzluklara sebep olmaktadır. Toplamda oluşan karbon emisyon miktarının önemli bir kısmının ulaşım sektöründen kaynaklandığı bilinmekte olup literatürde bu sorunun çözümüne yönelik özellikle yeşil araç rotalaması üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur [1]. Ulaşım ve taşımacılıktaki araç kullanımından ortaya çıkan karbondioksit eşdeğeri emisyonların daha iyi bir planlama ile azaltılmasına odaklanan bu rotalama stratejisi, bazı çalışmalarda ekro-rotalama olarak da adlandırılmaktadır.

Günümüzde kullanımı oldukça yaygın olan navigasyon sistemleri, bir yerden bir yere ulaşımında sürücülere büyük kolaylık sağlamaktadır. Piyasadaki geleneksel navigasyon sistemleri, optimal rotanın belirlenmesinde ağırlıklı olarak en kısa mesafe, en hızlı ulaşım veya otoyol tercihli gibi seçenekler sunmaktadır. En kısa rota, trafiksiz durumda geleneksel araçlar için sera gazlarının emisyon miktarı bakımından en ekonomik seçenek olabilir. Fakat trafik yoğunluğuna bağlı olarak daha uzun ve daha az trafiğin olduğu bir rota, benzinli motorun verimlilik durumları göz önünde bulundurulduğunda emisyon miktarı açısından daha iyi bir tercih olabilmektedir. Rota ayrıtlarında (segment) oluşacak emisyon miktarlarının belirlenmesinde büyük rol oynayacak diğer bir faktör ise hibrit, şarj edilebilir hibrit ve bataryalı elektrikli araçların

trafik durumuna bağlı olan değişken araç dinamikleridir. Dolayısıyla alternatif enerji ile çalışan araç teknolojileri, optimum emisyonlu rotanın bulunması problemini yeni bir bakış açısı ile ele almayı gerektirmektedir. Bu çalışmada, mevcut rota optimizasyonu yöntemlerine detaylı bir bakış sunularak, alternatif enerji araçlarındaki heterojen yapı için yeni bir yaklaşım önerilmektedir.

Emisyon minimizasyonu ile bağlantılı çalışmalar, yeşil araç rotalaması ve ekro-rotalama kapsamındaki literatür taraması aşağıda belirtilmiştir.

Trafik koşulları, aracın hız-zaman bilgisini içeren sürüş çevrimini farklı şekillerde etkilemektedir. Karabaşoğlu ve Michalek [2], sürüş çevrimlerinin, hibrit ve şarj edilebilir elektrikli araçların yaşam döngüsü maliyetleri ve emisyonlarındaki etkisini çeşitli senaryolar ve sürüş şartlarına göre değerlendirerek sürüş çevrimlerinin yaşam döngüsü maliyetleri ve emisyonları üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Zhang vd. nin [3] arazi bilgisini hibrit araçların enerji yönetim sistemleri ile birleştirdiği çalışmada, arazi yapısı göz önünde bulundurularak enerji tüketiminin azaltılabileceği gösterilmiştir. Xiao vd. [4] araç yükünün klasik kapasiteli araç rota problemi üzerindeki etkisini araştırmış ve araç yükünün göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör olduğunu öne sürmüşlerdir. Tavares vd. [5] yapmış oldukları çalışmada araç ağırlığı ve yol eğiminin aracın verimliliğini etkilediğini göstermişlerdir. Rotalama stratejilerinde arazi yapısını göz önünde bulunduran çalışmalar, bulundurmaya oranla yolculuk boyunca harcanan enerjiyi %8'e kadar yükselttiği

gözlemlenmiştir. Poonthalir ve Nadarajan [6] çalışmalarında geleneksel araçlar için iki amaçlı bir Yakıt Verimli Yeşil Araç Rotalama Problemini (F-GVRP), değişen hız kısıtlamasıyla birlikte Yeşil Araç Yönlendirme Probleminin (G-VRP) bir uzantısı olarak ele almıştır. F-GVRP, hedef programlama kullanılarak hem yolculuk maliyetini hem de yakıt tüketimini en aza indirecek şekilde modellenmiştir.

Yi vd. [7] yapmış oldukları çalışmada eko-rotalama problemi için batarya ve trafik koşullarına dayalı kısıtlamaların etkilerini çalışmışlardır. Zamana bağlı değişken ağırlıklar tanımlayarak eko-rotalama mimarisinde çoklu hedef fonksiyonlarının kullanıldığı Chenjuan [8] tarafından yapılan çalışmada EcoSky adlı bir metodoloji tasarlamıştır. Huang ve Huei [9], seyahat süresi kısıtlarını göz önünde bulundurarak ekolojik sorunlara veri odaklı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Behnke vd. [10], yük, mod ayrımı ve araç ağırlığı gibi güç aktarma parametrelerine dayanan bir eko-rotalama stratejisi oluşturmuşlardır. Chang ve Edward [11] çalışmalarında rotalama stratejisine, belirli bir seyahat süresi içerisinde toplam yakıt tüketimini minimize edecek şekilde belirli bir güç aktarma sistemi için hız profilleri optimizasyonuna göre karar veren bir sistem geliştirmişlerdir. Bu çalışma, araç ağırlığı ve yol eğiminin aracın yakıt tüketimini etkilediğini göstermiştir. Boriboonsomsin [12] yaptığı çalışmada ağır vasıtalar için yol sınıfının ve karayolu türünün yakıt tüketimi ve emisyonu üzerindeki etkisine odaklanılırken; Bottiglione [13] çalışmasında eko-rotalama yaklaşımlarında belirli bir güç aktarım sınıfı mimarisi için parametre kombinasyonunun önemli olduğunu belirtmiştir. Ericsson ve diğerleri [14], yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmak için, en kısa yol tahmini yapan geleneksel navigasyon sistemlerinin yerine en düşük yakıt tüketimine odaklı bir rota belirleme sistemi geliştirmişlerdir. Ahn ve Rakha [15], rota tercihlerinin aracın enerji tüketimine ve emisyon oranlarına etkisini araştırmışlar ve otoyol tercihli rotaların her zaman çevreci ve en az yakıt tüketimli olmadığını göstermişlerdir. Barth ve Boriboonsomsin [16] yol eğimlerinin araçların yakıt tüketimine ve emisyonlarına olan etkisini araştırmış ve düz yol ile eğimli yollarda aracın tüketim değerlerini karşılaştırmışlardır. Artmeier vd. [17] klasik en kısa yol algoritmasını genişleterek, minimum enerji tüketimini sağlayacak bir navigasyon modeli önermişlerdir.

Bu modelde şarj edilebilir bataryaların enerji verimliliğine etkisinden yola çıkarak, geleneksel en kısa yol algoritması üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. Karabasoglu ve Qiao [18], gelişmiş araçlar için minimum maliyetli ekonomik rotaları bulmak üzere araç güç aktarım organlarından alınan bilgilerin kullanıldığı bir rota optimizasyon stratejisi geliştirmişlerdir. Bu çalışma, [18]' önerilen rotalama stratejisinin yeşil rotalama odaklı geliştirilmesinin sonucudur.

Trafik koşullarının, yakıt tüketimini doğrudan etkileyen güç aktarım sistemlerinin verimliliğine büyük etkisi vardır. Benzer şekilde, araç tipi, batarya boyutu ve başlangıç batarya doluluk oranları, yolculuğun ne kadarının CO_2 emisyon miktarı düşük olan elektrikle, ne kadarının yüksek CO_2 emisyon miktarlı benzinle ve hangi verimlilikle gidileceğini belirler. Bu çalışmada yer alan, yukarıda belirtilen tüm faktörleri hesaba katan ve en düşük CO_2 emisyonlu optimal rotayı belirleyen sistem Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Araç güç aktarma sistemi bağlantılı yeşil rota optimizasyonu için oluşturulan sistem

En düşük CO_2 emisyonlu optimal rotanın belirlenmesinde araç aktarım sistemlerinin trafikteki performans farklılıklarının, büyük etkisi olmaktadır. Örneğin, geleneksel benzinli araçların yoğun trafikteki yakıt tüketimleri, dolayısıyla CO_2 emisyonları fazla olduğundan, daha az trafikli yollar tercih edilir. Verilen iki güzergâhtan biri diğerinden biraz uzun fakat daha az trafikli, diğeri ise daha kısa olmasının yanı sıra daha fazla trafikli olduğunda; geleneksel benzinli bir araç için en az CO_2 emisyonunu oluşturacak rota, daha uzun ama daha az trafikli olan yol olabilmektedir. Ancak,

yoğun trafik koşullarında, daha verimli motora sahip olması ve frenleme sırasında bataryasının şarj olabilmesi nedeniyle hibrit araçlar için optimal rota, kısa ve trafikli olan yol olabilir [2]. Sonuç olarak; CO_2 emisyonunu minimize etmek için hibrit elektrikli araç, trafikli olan kısa yolu seçerken, geleneksel benzinli araç uzun ve daha az trafikli yolu tercih edebilmektedir.

Benzer şekilde, elektrikli araçlardaki başlangıç batarya doluluk oranları, minimum CO_2 emisyonlu rotanın belirlenmesinde etkili olabilir. Başlangıç batarya doluluk oranının, elektrikli kullanım menzili (All Electric Range (AER)) üzerinde doğrudan etkisi vardır. Elektrikli kullanım menzili, aracın benzin tüketmeye başlamadan elektrik kullanarak gidebileceği maksimum mesafedir. Elektrik, benzine göre daha az CO_2 emisyonuna sebep olduğundan dolayı elektrikli kullanım menzilin CO_2 emisyon miktarına büyük bir etkisi vardır. Eğer sürücü, yolculuğunu daha yüksek batarya doluluk oranıyla başlatırsa, araç için en düşük CO_2 emisyonlu yol kısa ve trafikli bir yoldan ziyade daha az trafiğe sahip uzun bir yol olabilir.

Araç rotalamada; araç güç aktarma sistemleri, bileşen durumları ve bunların trafik koşullarıyla etkileşimlerinin girdi olarak kullanılması sürecin yararına olabilir. Bu çalışmada, araç dinamiklerini rota optimizasyonu stratejisine entegre edip "Araç Güç Aktarma Sistemi Bağlantılı Yeşil Rota Optimizasyonu (Vehicle Powertrain Connected Green Route Optimization (VPCRO))" olarak adlandırılan bir sistem önerilmektedir. Ardından, önerilen sistemin, CO_2 emisyon miktarını azaltması ve CV, HEV, PHEV ve BEV gibi farklı araç teknolojileri için rota değişikliği üzerindeki etkisi analiz edilmektedir.

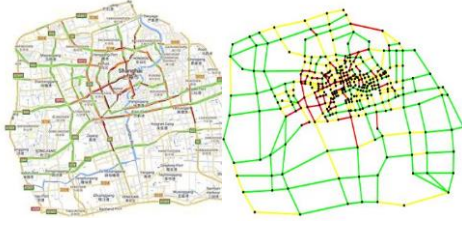
2. Kullanılan Metot

Bu bölümde, araç aktarma sistemi dinamikleri, bileşen verimlilikleri, kontrol modları, enerji depolama sistemi spesifikasyonları ve başlangıç durumu girdilerini rotalama optimizasyonuna entegre eden bu çalışmaya konu olan yeşil rota optimizasyonu sistemi tanıtılmaktadır. Bu faktörler nihai olarak yolculuk ayrıtlarındaki CO_2 emisyon miktarlarını değiştiren aktarma sistemi bileşenlerinin verimini etkileyebilir. Benzer şekilde; araç tipi, batarya boyutu, ilk batarya şarj durumu (SOC) ile birlikte trafik akışı da gezinin yüzde kaçının etkin bir şekilde elektrikle veya benzinle yapılacağını belirler. Bu

makalede önerilen, Şekil 1'de gösterilen rotalama stratejisi yukarıda belirtilen tüm faktörleri göz önüne alarak; araç güç aktarımı ve başlangıçtaki sistem durumuna özel en düşük CO_2 emisyonlu optimal yolun bulunmasını sağlar. Daha sonra da önerilen stratejinin geleneksel ve elektrikli araçlar için sonuçları, en kısa mesafe yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu rotalama stratejilerini simüle etmek için ilk adım, trafik bilgisi içeren bir ağ modeli oluşturmaktır. Sonraki adım ise araç modellerini tasarlayıp, belirlenen hız profilleri için simüle ederek gereken verimlilik değerlerini elde etmek olacaktır. Son aşamada ise optimizasyon problemi formüle edilip, belirlenen algoritma ile çözüldükten sonra sonuçlar analiz edilecektir.

2.1. Trafik ağ modelinin oluşturulması

Ulaşım ağını inşa etmek için Şangay, Çin haritasındaki düğüm (node) ve ayrıt (segment) verileri toplandıktan sonra, Google Haritalarından pazartesi günleri 08:00 - 08:30 saatleri arasındaki geçmiş veriler kullanılarak ortalama trafik durumu ile harita ayrıtları eşlenmiştir. Şekil 2, Google Haritalarda Şangay haritasını ve onun için inşa edilmiş trafik ağını göstermektedir. Ağ üzerinde kavşakları ve yolları temsil eden 352 düğüm ve 615 ayrıt bulunmaktadır, dolayısıyla toplam 61776 Kaynak-Hedef (O-D) çifti oluşabilmektedir. Şekil 2'deki kırmızı, sarı ve yeşil bölümler sırasıyla yoğun, ortalama ve düşük trafiği göstermektedir. Google Haritalar'dan toplanan trafik koşulları, belirli sürüş çevrimleriyle temsil edilebilir; çünkü trafik akışı, aracın zaman içindeki hızını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Burada, her bir ayrıtın trafik koşullarına aşağıdaki sürüş çevrimleriyle yaklaşılabileceği varsayılmaktadır: Düşük trafik koşullarında, Otoyol Yakıt Ekonomisi Testi (HWFET) sürüş çevrimi; ortalama trafik koşulları için, Kentel Dinamometre Sürüş Programı (UDDS) sürüş döngüsü seçilmiştir. Yoğun trafik için ise New York City (NYC) sürüş döngüsü, sık sık durulan yoğun trafiği yansıttığı için kullanılmıştır.



Şekil 2. Şangay için trafik ağı modeli

Trafik ağı, $D = \{X, S\}$ yönlendirilmiş bir graf ile temsil edilir; burada X , düğümleri ve S de yönlendirilmiş ve iki yönlü ayrıtları temsil eder. $s_{ij} \in S$ ayrıtı n_i ile n_j düğümlerini birbirine bağlar. X kümesi, trafik ağı modelindeki 352 düğümden oluşur ve her düğüme bir dizin numarası i atanır ve Google Haritaları'ndan toplanan ilgili 2-B koordinatlarıyla ilişkilendirilir. 2-B koordinatları, her n_i düğümü için sırasıyla boylam ve enlemi metre cinsinden göstermek üzere (n_i^{boy}, n_i^{en}) vektörü şeklinde belirtilmiştir.

S kümesi ise ağı 615 ayrıtı içerir ve her ayrıtı iki tür ağırlık bilgisiyle ilişkilendirilmiştir; s_{ij} ayrıtının uzaklığı ($d_{s_{ij}}$) ve CO_2 emisyon miktarı ($e_{s_{ij}}$) olmak üzere sırasıyla, $w_{s_{ij}}^d$ ve $w_{s_{ij}}^e$ dir. Bu ağırlık faktörleri, bölüm 2.3'te ayrıntılı olarak ele alınan araç rotalama optimizasyonunda kullanılmaktadır. Herhangi iki n_i, n_j düğümü arasındaki mesafe $d_{s_{ij}}$, Denklem 2'de tanımlanmıştır. $C_d = 62.137$ mil / m, metre birimini mile dönüştürmek kullanılan ölçeklendirme faktörüdür. Eğer n_i ve n_j düğümleri birbirine bir ayrıtıyla bağlıysa;

$$d_{s_{ij}} = C_d \sqrt{(n_i^{boy} - n_j^{boy})^2 + (n_i^{en} - n_j^{en})^2} \quad (2)$$

değilse $d_{s_{ij}} = \infty$

2.2 Yenilikçi araç güç aktarma sistemlerinin modellemesi

Bu makalede Konvansiyonel (Conventional Vehicle (CV)), Hibrit elektrikli araç (Hybrid Electric Vehicle (HEV)), Plug-in hibrit araç çeşitleri (Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV20), (PHEV40), (PHEV60)), ve bataryalı elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicle (BEV100)) olmak üzere altı farklı güç aktarma sistemine sahip araç sistemleri, iki farklı

rotalama stratejisi; en kısa mesafe, ve önerilen VPCRO ile en düşük CO_2 emisyon miktarı için simüle edilmiştir. Araçları tasarlamak ve simülasyon için Güç Aktarma Sistemi Analiz Araç Takımı (Powertrain System Analysis Toolkit (PSAT)) kullanılmıştır. Bu çalışmada, Karabasoglu ve Michalek [2]'in ilgili yayınındaki araç modelleri kullanılmıştır. Tablo 1 kullanılan araç güç aktarma sistemlerinin bileşen boyutlarını listeler. Makalede bahsi geçen CV ve HEV araç modelleri sırasıyla Toyota Carolla ve Toyota Prius modellerini baz almaktadır. PHEV modelleri, artan pil boyutuna sahip MY13 PHEV konfigürasyonuna dayanmaktadır ve BEV modeli, PSAT'ta modifiye edilmiş orta büyüklükte bir elektrikli güç aktarma sistemi ile oluşturulmuştur. F/R ağırlık oranı 06/04, sürüklenme katsayısı 0,26, ön alan $2,25 m^2$ 'dir. HEV için başlangıç SOC ve hedef SOC %60 olarak ayarlanmıştır. PHEV'ler ve BEV'ler için, CD modunda ilk SOC %90 olarak ve hedef SOC ise %30 olarak belirlenmiştir; CS modu için hem başlangıç hem de hedef SOC, %30'dur. Araç varsayımları ve verimlilik haritaları ile ilgili ek bilgiye Karabasoglu ve Michalek [2] tarafından yapılan çalışmadan ulaşılabilir.

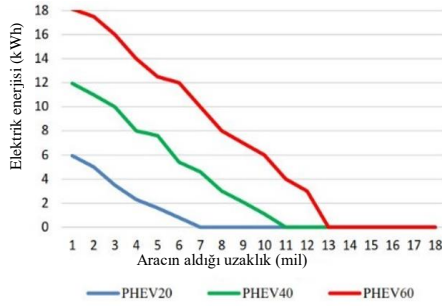
Tablo 1. Araç konfigürasyonları [2]

Araç türü	Makine (kW)	Motor (kW)	Batarya (kWh)	Ağırlık (kg)
CV	110	-	-	1371
HEV	73	60	1.3	1424
PHEV20	73	78	9.9	1569
PHEV40	73	88	19.9	1793
PHEV60	73	98	30.2	2027
BEV100	-	120	54.0	2265

Rotalama sürecinde optimal sonuca etki eden en belirgin faktör, araç güç aktarmalarının farklı yol koşullarında verimliliklerinin değişmesidir. CV ve HEV için, araç verimliliği trafik koşullarına göre değişirken; PHEV araçlar için trafik koşullarının yanısıra katedilen mesafe de enerji tüketimini etkilemektedir.

Plug-in hibrit araçlar bir yolculuğun başında şarj azalan (Charge Depleting (CD)) moda işlemekteyken; batarya şarj durumu belli bir alt limite ulaştığında otomatik olarak şarj koruma

(Charge Sustaining (CS)) moduna geçer ve yolculuğa benzin ile devam ederler. Sadece batarya ile çalışan bataryalı elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicle (BEV)), mevcut elektrik enerjisi tükendiğinde, şarj etme veya batarya değiş tokuşu gerektirecektir. Simüle edilen ulaşım ağında, mümkün olan en yüksek enerjiyi talep eden yolculukta dahi BEV100'deki mevcut tüm batarya enerjisi tamamen kullanmadığından, bu araç grubunun tüm yolculuk boyunca sadece CD modunda çalıştığı varsayılmaktadır. Kalan elektrik enerjisine etki eden diğer faktörler göz ardı edildiğinde, Şekil 3'te PHEV ler için mevcut enerji ile sürüş mesafesi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Elektrikli kullanım menzili, aracın benzin tüketmeye başlamadan elektrik kullanarak gidebileceği mesafedir. AER lerine göre üç farklı PHEV tasarımı olan; PHEV20, PHEV40 ve PHEV60 için sırasıyla aracın elektrik enerjisiyle katedebileceği yollar 20, 40 ve 60 mildir. Araç güç aktarımının sürüş ve trafik koşulları ile etkileşimi nedeniyle AER %40'a kadar değişebilmektedir[2].



Şekil 3. Bataryada kalan elektrik enerjisi ile sürüş mesafesi arasındaki ilişki

Tablo 1'deki araç konfigürasyonları PSAT'de modellenerek güç aktarım sistemleri simüle edilmiş ve dönüşüm faktörleri çeşitli sürüş çevrimleri altında hesaplanmıştır. Önerilen üç sürüş döngüsünün her biri altındaki farklı güç aktarım sistemlerinin başlangıç elektrik enerjileri $E_{başl}$ ve CD ve CS modları için dönüşüm faktörleri olan μ Tablo 2'de belirtilmiştir [2].

Tablo 2. Farklı araç güç aktarım sistemleri için dönüşüm faktörü değerleri

Araç tipi	Sembol	Birim	HWFET	UDDS	NYC
ACV	μ_{CS}	mil/gal	52.8	32.1	16.4
HEV	μ_{CS}	mil/gal	59.7	69.5	48.0
PHEV 20	μ_{CD}	mil/kWh	5.7	6.2	4.2
		mil/gal	58.6	69.4	45.7
PHEV 40	μ_{CD}	mil/kWh	5.7	6.0	4.1
		mil/gal	58.2	68.0	43.1
PHEV 60	μ_{CD}	mil/kWh	5.6	5.7	3.8
		mil/gal	57.8	65.8	40.3
BEV 100	μ_{CD}	mil/kWh	4.8	5.2	3.1

Tablo 3. Farklı araç güç aktarım sistemlerinin başlangıçtaki mevcut enerjisi [2]

Araç türü	$E_{başl}$ (kWh)
PHEV 20	5.94
PHEV 40	11.94
PHEV 60	18.12

Plug-in araçların verimliliğini etkileyen bir diğer önemli faktör de başlangıç batarya şarj durumu (SOC) dur. Başlangıç batarya şarj durumu, mevcut enerji $E_{başl}$ üzerine direkt olarak ve yolculuğun CD ve CS modunda seyahat edilen miktarları üzerinde dolaylı olarak etki eder. Bir sürücü yolculuğuna yeterli elektrik enerjisi içermeyen bir batarya ile başlarsa, yakın zamanda enerjisi biterek beklenenden daha erken CS moduna geçecektir. Bu makalede PHEV ve HEV için SOC alt limiti/hedefi % 30 olarak kabul edilmiştir. Tablo 4 te, Karabasoglu ve Michalek [2]'in çalışmasından alınan birim benzin ve elektrik için CO_2 emisyon miktarı gösterilmektedir.

Tablo 4. Birim enerji başına düşen CO_2 emisyon miktarı

e_{ele} (kg/kWh)	e_{gas} (kg/galon)
0.752	11.34

2.3 Rota optimizasyonu

Gelişmiş araçlar için en düşük CO_2 emisyonlu rota optimizasyonu motor verimliliği, enerji fiyatları, trafik koşulları, aktarma sistemleri, kontrol modları ve ilk batarya şarj durumu gibi bileşen verimlilikleri hakkında bilgi gerektirir. Sonuçta tüm bu faktörler araç dönüşüm faktörlerini değiştirmektedir. Rota optimizasyon probleminin amaç fonksiyonlarını, en kısa mesafe veya en düşük CO_2 emisyonu olmak üzere sırasıyla 3 ve 4 numaralı denklemlerde gösterildiği gibi tanımlayabiliriz.

$$\text{En kısa rota} \quad \text{minimize} \quad \sum_{i,j \in R} w_{sij}^d \quad (3)$$

$$\text{En düşük } CO_2 \text{ emisyonlu rota} \quad \text{minimize} \quad \sum_{i,j \in R} w_{sij}^e \quad (4)$$

Burada R kümesi, ilk düğümden hedef düğüme giden olası patikalar; i ve j ise bu patika üzerindeki düğüm indisleridir. Her iki düğüm arasında bulunan ayrıtlar için iki farklı ağırlık tanımlanmıştır. Bu ağırlıklar, iki ayrıt arasındaki uzaklık ve CO_2 emisyon miktarı olmak üzere sırasıyla w_{sij}^d ve w_{sij}^e olarak tanımlanmıştır. Simülasyon ağındaki 61776 olası seyahatin rota optimizasyonunu çözmek için Dijkstra algoritması kullanılmıştır [22]. Problemdaki her bir w_{sij}^d ve w_{sij}^e negatif olmayan değerlere sahiptir. Tek kaynaklı, negatif olmayan ağırlıklı yönlendirilmiş graflarda en kısa yol problemi için Dijkstra algoritmasının kullanılması uygundur. Bahsedilen her iki amaç fonksiyonu için ayrı ayrı Dijkstra algoritması uygulanarak geleneksel en kısa yol ve önerilen yeşil rotalama stratejisinin sonuçları kıyaslanmıştır.

Dijkstra algoritmasına girdi olarak $D(X,S)$ yönlü grafını ele alıyoruz, burada X düğümler ve S de iki yönlü ayrıtlar kümesini ifade etmektedir. Her bir ayrıta atanmış olan ağırlık değeri w_{sij}^k ile gösterilmektedir ve burada k üst indisi başlangıç noktasından hedefe giden rota boyunca minimize edilecek olan amacı ifade etmek için kullanılmıştır (d: uzaklık ve e: emisyon). İlk olarak, algoritmanın uygulanması, X kümesindeki düğümlerin potansiyel bir $W^k(j)$ ile etiketlenmesine bağlıdır. Potansiyel $W^k(j)$ değeri, D grafindaki bir ayrıt ile bağlantılı olan herhangi iki genel düğüm n_A ve n_B için ($n_A, n_B \in X$) sonlu olacaktır. Başlangıç düğümlerinden oluşan N kümesinin ($n_m \in N$) elemanlarını

temsil eden n_m için bu potansiyel sıfır iken; doğrudan bağlı ayrıtları olmayan diğer tüm düğümler için ise $W^k(j) = \infty$ dır. V, hedef düğümlerden oluşan n_v eleman kümesini temsil etsin, P kümesi ziyaret edilen düğümleri gösterirken; Q ise henüz ziyaret edilmemiş düğümlerin kümesini temsil etmektedir. P kümesi ilk olarak başlangıç düğümü olan n_m 'i içerecektir. Başlangıç n_m düğümünden, ziyaret edilmemiş tüm komşu düğümler dikkate alınarak bunların potansiyel $W^k(j)$ değerleri, birbirine bağlı olduğu ayrıtın geçici ağırlıkları olan (w_{sij}^k) olarak güncellenir. Bu işlem yeni bir düğüme yapılan bir ziyareti veya önceden işlenmiş bir düğüme en kısa yoldan tekrar gelen bir ziyareti gösterir. Gelecek adımlarda, güncelleme kuralı sadece potansiyelin mevcut değerleri önceliklerden küçükse geçerlidir. Ardından gelen güncellemeler tamamlandıktan sonra, komşu düğümlerden en küçük potansiyele sahip olanı P kümesine ekleyip Q kümesinden çıkartırız. Atanmış olan bu düğüm bir sonraki adımda başlangıç düğümü olarak belirlenir ve P'deki tüm düğümlerin potansiyelleri $W^k(j)$ sonlu bir değer alana kadar işleme devam edilir, Q kümesi ise geri kalan düğümleri içermektedir. İterasyon işlemine Q kümesinde hiç eleman kalmayınca kadar devam edilir ve D grafindaki tüm düğümler kendi potansiyelleriyle etiketlendiğinde işlem sona erer.

Dolayısıyla her $n_m \in X$ başlangıç noktası için bu R_m prosesi iki rotalama stratejisi için ayrı ayrı komuta edilir. Araç rotalama problemi için iki ayrı amaç fonksiyonu olarak keyfi bir n_m başlangıç düğümü ile keyfi bir varış düğümü n_j arasındaki en kısa yol yada en düşük CO_2 emisyonu ele alınmaktadır. Bu makalede, $n_j \in V$ için potansiyeller $W_f^d(j)$ ve $W_f^e(j)$ olarak gösterilmiştir. Dijkstra algoritmasının R_m prosesi bir n_m başlangıç düğümü için aşağıdaki şekildedir.

$$\begin{aligned} W_0^k(i) &= w_{s_{mi}}^k \\ W_1^k(j) &= \min_{s_{ij} \in S} \{w_{s_{ji}}^k + W_0^k(i)\} \\ W_2^k(j) &= \min_{s_{ij} \in S} \{w_{s_{ji}}^k + W_1^k(i)\} \\ &\vdots \\ W_f^k(j) &= \min_{s_{ij} \in S} \{w_{s_{ji}}^k + W_{n-1}^k(i)\} \end{aligned} \quad (6)$$

R_m prosesi $W_n^k(j)$ değişmeyi durdurduğunda sona erecektir.

$$W_f^k(j) = W_{f-1}^k(j) \quad (5)$$

Herhangi bir başlangıç düğümü n_m den n_j ye minimum CO_2 emisyonu $W_f^k(j)$ ile gösterilmiştir ve buradaki üst indis k yerine, stratejiye bağlı olarak en kısa yol için d veya en düşük CO_2 emisyonu için e olarak kullanılmıştır. Alt indis f , kendisi sonuncu olmak üzere, iterasyon sayısını; j ise bir sonraki düğüm olan n_j yi temsil etmektedir. R_m prosesi sona erdikten sonra, ağdaki bir başka başlangıç düğümü için R_{m+1} prosesi başlayacaktır. Tüm başlangıç düğümleri kapsadığında, olası tüm O-D (Başlangıç-Hedef) kombinasyonları için seyahatin mesafesi ve CO_2 emisyonu için iki

farklı değerden oluşan bir arama tablosu oluşturulur.

Her bir s_{ij} ayrıtı için $w_{s_{ij}}^d$ ve $w_{s_{ij}}^e$ ağırlıkları en kısa yol için 7 nolu denklemde ve en düşük CO_2 emisyonlu rota bulunurken CV, HEV, PHEV ve BEV araç tipleri için sırasıyla 8,9,10 ve 11 nolu denklemlerde gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

Farklı güç sistemleri için CD ve CS modlarındaki dönüşüm faktörleri olan μ değeri Tablo 2'den alınmış ve sırasıyla μ_{CD} ve μ_{CS} olarak adlandırılmıştır. e_{gas} ve e_{ele} sırasıyla yakıt ve elektrik enerjisi kullanımında birim enerji başına düşen CO_2 emisyon miktarlarını göstermektedir. (Bu değerler Tablo 4'ten alınmıştır). PHEV araçlar için bataryada kalan elektrik enerjisi miktarı E_{rem} değişkeni ile gösterilmektedir.

$$\text{En kısa rota} \quad w_{s_{ij}}^d = C_d \sqrt{(n_i^{boy} - n_j^{boy})^2 + (n_i^{en} - n_j^{en})^2} \quad (7)$$

$$\text{CV} \quad w_{s_{ij}}^e = e_{gas} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CS}} \quad (8)$$

$$\text{HEV} \quad w_{s_{ij}}^e = e_{gas} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CS}} \quad (9)$$

$$\text{En düşük } CO_2 \text{ emisyonlu rota} \quad w_{s_{ij}}^e = \begin{cases} e_{gas} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CS}}, & E_{rem} \leq 0 \\ e_{ele} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CD}}, & E_{rem} \geq \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CD}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{PHEV} \quad w_{s_{ij}}^e = \begin{cases} e_{gas} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CS}}, & E_{rem} \leq 0 \\ e_{ele} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CD}}, & E_{rem} \geq \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CD}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{BEV} \quad w_{s_{ij}}^e = e_{ele} \frac{d_{s_{ij}}}{\mu_{CD}} \quad (11)$$

3. Bulgular

Bu bölümde, bu makalede uygulanan VPCRO algoritması ve geleneksel en kısa yol rotalama algoritması sonuçlarının karşılaştırılmasından elde edilen bulgular açıklanmaktadır. Bölüm 3.1'de, taşıt aktarma sistem tiplerinin en düşük CO_2 emisyonlu optimal rotalama üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bölüm 3.2'de, başlangıç batarya şarj durumunun optimum rota ve seyahat CO_2 emisyon miktarı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

3.1. Araç teknolojisinin optimal yeşil rota üzerindeki etkisi

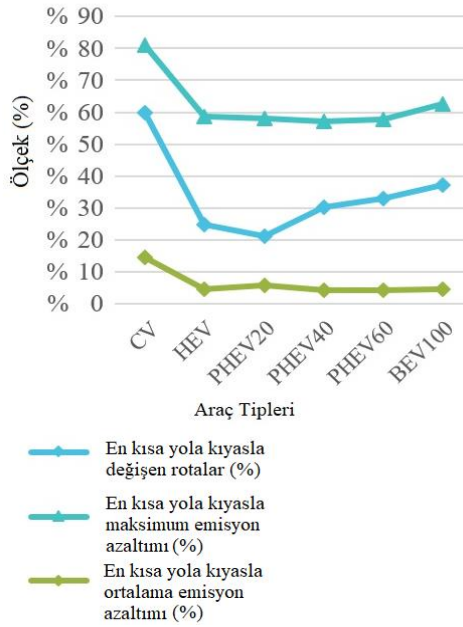
Araç güç aktarım organlarının teknolojisi, seyahat süresince salınan CO_2 emisyon miktarlarını etkileyebilmektedir. Farklı

boyuttaki bileşenlerden (elektrikli motor, benzinli motor ve batarya) oluşan güç aktarma sistemleri, belirli trafik koşullarında birbirleriyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde farklı etkinliklere sahip olabilmektedirler.

3.1.1 Yeşil rotalama yöntemi ile değişen rota yüzdesi ve maksimum emisyon tasarrufu

Bu çalışmada önerilen yeşil rotalama yöntemi kapsamında, değişik aktarma sistemleri için en kısa mesafe stratejisine kıyasla değişen rotaların yüzdesi ile ortalama ve maksimum emisyon tasarrufları Şekil 4'te gösterilmektedir. Sırasıyla geleneksel ve elektrikli araçlar için en kısa mesafe algoritmasına kıyasla önerilen optimizasyon algoritması kullanıldığında yolculukların CV için yaklaşık %80'i ve elektrikli

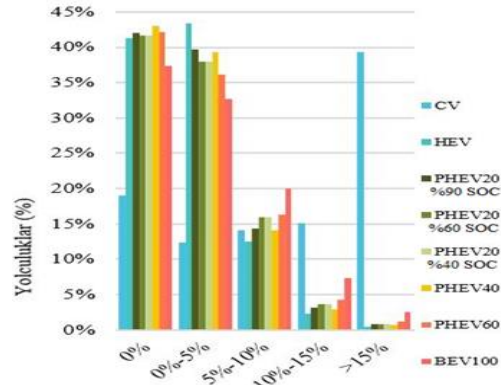
araçlar içinse %60'ı yeni optimal yeşil rotalara sahip olmaktadır. Bu durum, seyahatlerin büyük çoğunluğunda emisyonları minimize eden VPCRO stratejisinden yararlandığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, önerilen strateji sayesinde, en kısa yol stratejisine kıyasla, sırasıyla CV ve elektrikli araçlar (HEV ve PHEV20) için sırasıyla %60 ve %30'a kadar emisyon tasarrufu sağlanmaktadır. VPCRO stratejisi uygulandığında değişen optimal rotalardaki tasarruf edilen ortalama emisyon miktarları da Şekil 4'te görülebilir. CV ve BEV'ler için kıyaslandığında ise önerilen yöntem sayesinde; değişen rotalarda sırasıyla %15 ve %6 ortalama emisyon azaltımı elde edilmektedir.



Şekil 4. Farklı araç teknolojileri için en kısa mesafe stratejisi ile karşılaştırıldığında, VPCRO kapsamında değişen yeşil rotaların ve emisyon tasarrufunun yüzdesi

3.1.2 En kısa yola kıyasla yeşil rotalama ile elde edilmiş emisyon miktarlarının dağılımı

En kısa yol ile karşılaştırıldığında, VPCRO yöntemi sayesinde farklı araç tipleri için elde edilen emisyon tasarruf dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir.

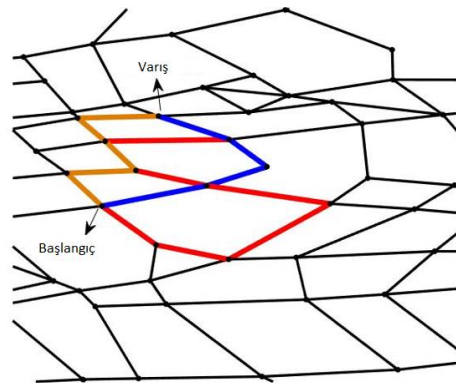


Şekil 5. VPCRO kullanıldığında, en kısa yol stratejisine göre emisyon düşüşlerinin yüzdesel dağılımı

Histogramdan görüldüğü üzere, eko-rotalama en kısa mesafe optimizasyonuna kıyasla geleneksel ve elektrikli araçlarla yapılan seyahatlerin, sırasıyla % 80 ve % 60'ı için Şekil 5'de gösterildiği gibi farklı oranlarda emisyon düşüşlerine sebebiyet vermektedir.

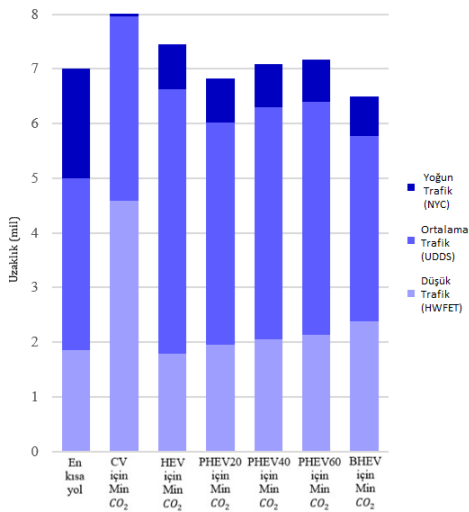
3.1.3. Değişen rotalara genel bakış

Şekil 6'da en düşük CO_2 emisyon miktarlı optimal rotanın farklı araç güç aktarma sistemleri için farklı olabileceği gösterilmektedir. Bir başlangıç düğümünden, hedef düğümüne, optimal rotalar gösterildiğinde: mavi yol (1) en kısa yol stratejisi tarafından bulunan rotayı, kırmızı (2) ve sarı (3) yollar ise sırasıyla VPCRO stratejisinden elde edilen CV ve HEV araçlar için en düşük CO_2 emisyon salınımlı rotaları göstermektedir.



Şekil 6. VPCRO, farklı araç tipleri için farklı en düşük CO_2 emisyon miktarlı optimal rotalar

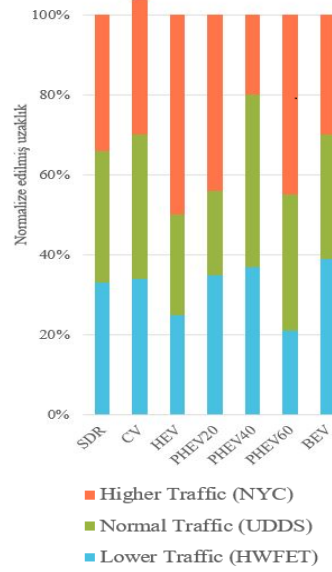
Bu durum, rota optimizasyonu sırasında araç güç aktarma sistem türlerini dikkate almanın önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca bir aracın çeşitli trafik koşullarındaki CO_2 emisyon miktarının belirlenmesi için trafiik şartlarına bağlı dönüşüm faktörü de kilit bir öğedir. En kısa yol rotalama stratejisi, araç dinamikleri ve güç aktarma sistemi hakkında bilgiyi kullanmaz. Dolayısıyla bu stratejisinin optimal rotada yoğun trafiğe sahip bir ayrıtı seçmesi olasıdır. Şekil 6'da gösterilen patikalar analiz edildiğinde, Şekil 7'den en kısa yolun bir trafik sıkışıklığından geçtiğini görebiliriz. Yeşil rotalamada, CV'nin en verimli şekilde performans gösterdiği düşük trafik koşullarına sahip bölümlerden oluşan en uzun yolu kullandığı görülebilir (CV motoru, düşük torklu, düşük hız koşullarında düşük verimliliğe sahiptir). Öte yandan, HEV benzer şartlarda CV'den daha verimlidir, bu nedenle HEV için en düşük CO_2 emisyonlu yol CV'ye kıyasla trafiğe daha fazla tolerans gösterebilir, fakat yine de en kısa yolda olduğu kadar toleranslı değildir.



Şekil 7. Örnek bir yolculukta optimal rotanın farklı araç tipleri için mesafe ve trafik ile kompozisyonu

Ortalama bir VPCRO rotasının trafik kompozisyonu ile en kısa yol rotasının kompozisyonu (SDR) karşılaştırılmak üzere Şekil 8'de analiz edilmektedir. Grafikteki turuncu, yeşil ve mavi bölümler sırasıyla, ağır (NYC), normal (UDDS) ve düşük trafik (HWFET) koşullarını temsil ederler. CV'ler, HWFET sürüş

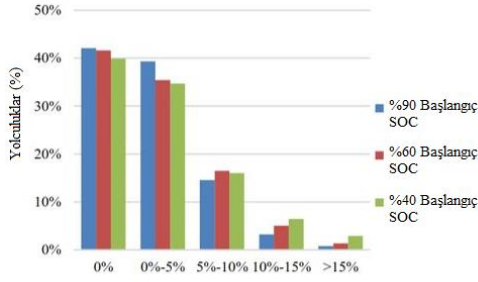
çevrimi gibi düşük trafik koşullarında daha yüksek dönüşüm faktörlerine sahip olduklarından, VPCRO, en kısa yola kıyasla daha az trafikli olan daha uzun rotaları tercih eder. Elektrikli araçlar UDDS sürüş döngüsü altında en yüksek dönüşüm faktörlerine sahiptir, bu nedenle onlar için optimal rotaların çoğu UDDS tarafından temsil edilen trafik koşullarından oluşur.



Şekil 8. En kısa yol ve VPCRO'nun verdiği ortalama bir yeşil rotanın trafik kompozisyonu karşılaştırması

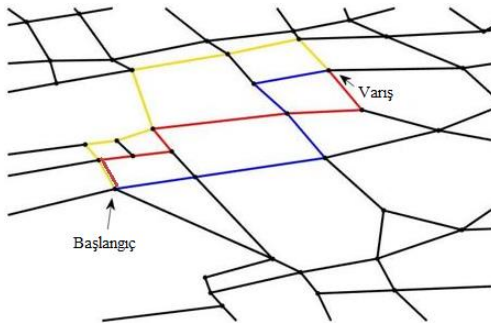
3.2 Başlangıç Batarya Doluluk Oranının Eko-Rotalama üzerine etkisi

Elektrikli araçlar için başlangıç batarya şarj miktarının (SOC), optimal eko-rotaları önemli ölçüde değiştirdiği bulunmuştur. Başlangıç SOC seviyesi %90 dan %60 a değiştirildiğinde en kısa yol stratejinin verdiği sonuçlara kıyasla eko-rotalama, rotaların %3 ünde farklı optimal rotalar bulmuştur. Benzer şekilde başlangıç SOC %90 dan %40 a azaltılarak yapılan kıyaslamada da rotaların %10 u için patika farklılıkları gözlemlenmiştir. Şekil 9'dan da görülebileceği üzere; düşük başlangıç şarj düzeyli PHEV araçlar için VPCRO stratejisinin kullanımı daha fazla önem kazanmaktadır.



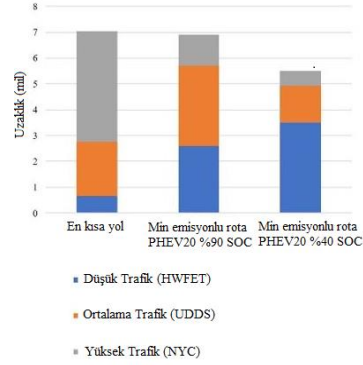
Şekil 9. En kısa rota ile kıyaslandığında, VPCRO stratejisinin PHEV20 için farklı SOC değerlerinde CO_2 emisyon miktarı kazanımları

Şekil 10'da, ağ modelindeki belirli bir başlangıç noktasından varış noktasına yolculuk yapacak bir PHEV araç için, mavi çizgi (1) en kısa yol rotasını işaretlerken, kırmızı (2) ve sarı (3) çizgiler; sırasıyla %90 ve %40 başlangıç SOC li PHEV araçlar için minimum CO_2 emisyonlu rotaları göstermektedir.

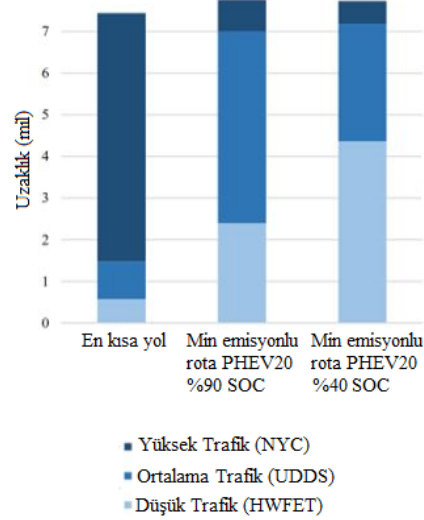


Şekil 10. Elektrikli bir araçta, farklı başlangıç batarya SOC'si için elde edilen farklı optimal eko-rotalar

Farklı şartlar altındaki optimal patikaların trafik yoğunluk dağılımlarına göre karşılaştırıldığı Şekil 11'den; aracın düşük başlangıç şarj durumunda benzinli motora daha fazla bağlı olduğu ve daha düşük yoğunluklu yolları tercih ettiği görülmektedir. Başlangıç şarj durumunun daha yüksek olduğu araçlarda ise elektrik motorunun yüksek veriminden dolayı ortalama ve yoğun trafiği yol uzaklığını minimize edecek şekilde serbestçe seçebildikleri görülmüştür.



Şekil 11. Farklı başlangıç batarya SOC'li elektrikli araçlar için örnek bir seyahatin yeşil rotalamasında mesafe ile trafiğin ilişkisi



Şekil 12. PHEV20 araçlarda farklı başlangıç batarya SOC leri için bulunan optimal rotanın CO_2 emisyon miktarlarının karşılaştırılması

Şekil 12, farklı başlangıç batarya doluluk oranlı PHEV20 araçlar için en kısa yol ve VPCRO ile bulunan optimal yeşil rotalarının farklı başlangıç SOC'ler için trafik kompozisyonlarını göstermektedir. Daha yüksek SOC'de yolculuğa başlandığında, PHEV araç benzinli motor yerine çoğunlukla elektrik motorunu kullanır. Ancak, düşük başlangıç SOC'li PHEV araç, benzinli motora daha fazla güvenir ve daha çok bir HEV gibi hareket eder.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu makalede, yeni bir araç rotalama stratejisi olan Araç Güç Aktarma Sistemleri Bağlantılı Yeşil Rota Optimizasyonu, araç rota kararlarının aracın güç aktarım organlarından gelen sensör bilgilerden ve değişken trafik koşulları gibi dış bilgilerden faydalandığı durumlar için önerilmiştir. Gelişmiş araçlar için rotalama kararları yalnızca mesafeden değil, aynı zamanda araç güç aktarma sisteminin tipi, bataryanın boyutu, şarj durumu ve geleneksel yönlendirme sistemleri tarafından dikkate alınmayan çeşitli trafik koşullarında elektrik ve benzinli motorların verimliliğinin değişmesi gibi diğer faktörlerden de etkilenmektedir. Mesafe ve trafik arasındaki ilişkinin seyahatin emisyon miktarı üzerindeki etkisi, araç teknolojisi ve bileşen dinamikleri ile değişebilmektedir. Sonuç olarak, en düşük CO_2 emisyonlu yollar, en kısa mesafeli veya en az trafikli yollardan farklı olabilir. VPCRO'yu uygulamak için Dijkstra Algoritması kullanılmıştır ve geliştirilen stratejinin CO_2 emisyon avantajları Şangay'daki bir ulaşım ağı modeli için en kısa mesafe stratejisine göre karşılaştırılmıştır. Farklı araç teknolojileri için ve farklı başlangıç batarya şarj durumlarında (SOC) olan elektrikli araçlar için optimum patikaların önemli ölçüde değişebileceğini tespit edilmiştir. Geleneksel araçlar için, rotaların % 80'e varan kısmında % 60'a varan CO_2 emisyon tasarrufu olduğu, ve elektrikli araçlar için ise % 30'a varan CO_2 emisyon tasarrufuyla rotaların % 60'ının değiştiği bulunmuştur. VPCRO, yeşil rotalamada CV'ler için daha az trafik içeren uzun yolları tercih ederken, HEV'lerin ağır trafik koşullarındaki yüksek verimliliği nedeniyle HEV için daha yüksek trafik içeren daha kısa yolları tercih ettiği görülmüştür. Öte yandan, ilk batarya SOC'leri sırasıyla %90'dan %60'a ve %40'a değiştiğinde, seyahatlerin %3'ü ve %10'unun farklı optimal yeşil rotalara sahip oldukları görülmektedir. Ulaştırma sektörünün büyüklüğü göz önüne alındığında, önerilen yeşil rotalama sistemi her türlü araç için CO_2 emisyon tasarrufuna belirgin katkıda bulunabilmektedir.

4.1 Çalışmadaki Sınırlamalar

Bu makaledeki bazı sınırlamaların VPCRO yeşil rotalama yaklaşımının bildirilen faydaları üzerinde bir etkisi olabilir. Bu çalışmada temel olarak, kontrol stratejisi parametrelerine göre önemli ölçüde değiştiği için, PHEV'nin

harmanlanmış çalışma modu (blended mode) yerine genişletilmiş menzilli elektrikli araçlara (Extended-Range Electric Vehicles (EREV)) odaklanılmıştır [18, 19, 20, 21 ve 23]. Elektrikli araçlar için, batarya ömrü, aracın verimliliğini etkilediği için rotalama kararını etkileyebilir. Bu makalede, bataryanın iyi koşullarda bulunduğu ve bir bozulmaya sahip olmadığı varsayılmaktadır. Dahası, seçilen ağdaki mesafe aralığı olarak, bütün seyahat boyunca BEV'nin CD modunda çalışabileceği varsayılmaktadır. Bu varsayım, hiçbir yolculuğunun BEV'nin kapsayabileceği mesafeden daha uzun olmadığı bilgisine dayanmaktadır. Trafik ağı modelindeki trafik koşulları Google haritalarından alınmıştır ve araçların sürüş düzenleri bu bilgiye göre varsayımlanmıştır. Gerçekte hız-zaman profilleri farklı olabilmekle beraber, yazar sonuçlarda belirgin bir değişiklik beklememektedirler. Ayrıca, 8:00-08:30 arasındaki Google Harita'sındaki trafik durumu seçilmiştir. VPCRO'nun bildirilen faydaları, günün farklı zaman dilimlerindeki farklı trafik düzeylerine göre değişkenlik gösterebilir. Güç aktarma sistemi mimarileri, hava koşulları, arazi vb. gibi diğer bazı faktörler gelecekteki çalışmalar için bırakılmıştır.

5. Teşekkür

Bu makaledeki düzenlemeler ve geri bildirimleri için yazar, öğrencileri Gülce Haner, Merve Türk ve Mert Yüksel'e teşekkür eder.

Referanslar

- [1] Belbağ S., "Yeşil Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi: Bir Literatür Taraması." Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 19/1, (2017) sf.345-366.
- [2] Karabasoglu O., and Michalek J., "Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains", Energy Policy 60 (0) (2013) 445 - 461.
- [3] Zhang C., Vahidi A., Pisu P., Li X., and Tennant K., "Role of terrain preview in energy management of hybrid electric vehicles", Vehicular Technology, IEEE Transactions on 59 (3) (2010) 1139-1147.
- [4] Xiao Y., Zhao Q., Kaku I., and Xu Y., "Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem", Computers Operations Research 39 (7) (2012) 1419 - 1431.
- [5] Tavares G., Zsigraiova Z., Semiao V., Carvalho M., "Optimization of {MSW} collection routes for minimum fuel consumption using 3d {GIS} modelling", Waste Management 29 (3) (2009) 1176 - 1185.

- [6] Poonthair G., and Nadarajan R. (2018). A Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint (F-GVRP). *Expert Systems with Applications*, 100, 131-144. doi:10.1016/j.eswa.2018.01.052.
- [7] Yi, Zonggen, and Peter H. Bauer. "Optimal Stochastic Eco-Routing Solutions for Electric Vehicles." *IEEE transactions on Intelligent Transportation Systems* 99 (2018): 1-11.
- [8] Chenjuan G., "Ecosky: Reducing vehicular environmental impact through eco-routing." *Data Engineering (ICDE), 2015 IEEE 31st International Conference on. IEEE, 2015.*
- [9] Huang X., and Hwei P., "Eco-Routing based on a Data Driven Fuel Consumption Model." *arXiv preprint arXiv:1801.08602* (2018).
- [10] Behnke M., Kirschstein T., and Bierwirth C., "An Emission-Minimizing Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles and Pathway Selection." *Operations Research Proceedings 2016. Springer, Cham, 2018. 285-291.*
- [11] Chang D.J., and Edward K.M., "Vehicle speed profiles to minimize work and fuel consumption." *Journal of transportation engineering* 131.3 (2005): 173-182.
- [12] Boriboonsomsin K., "Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13.4 (2012): 1694-1704.
- [13] Bottiglione F., "The fuel economy of hybrid buses: the role of ancillaries in real urban driving." *Energies* 7.7 (2014): 4202-4220.
- [14] Ericsson E., Larsson H., Brundell-Freij K., "Optimizing route choice for lowest fuel consumption potential effects of a new driver support tool", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14 (6) (2006) 369 - 383.
- [15] Ahn K. and Rakha H., "The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 13 (3) (2008) 151 - 167.
- [16] Barth M., Boriboonsomsin K., "Traffic congestion and greenhouse gases", *ACCESS Magazine* 1 (35).
- [17] Artmeier A., Haselmayr J., Leucker M. and Sachenbacher M., "The shortest path problem revisited: Optimal routing for electric vehicles" (2010).
- [18] Zhiqian Q., and Karabasoglu O., "Vehicle Powertrain Connected Route Optimization for Conventional, Hybrid and Plug-in Electric Vehicles." *arXiv preprint arXiv:1612.01243* (2016).
- [19] Tulpule P., Marano V. and Rizzoni G., Effects of different PHEV control strategies on vehicle performance, *American Control Conference, 2009. ACC '09., vol., no., pp. 3950-3955, 10-12 June 2009.*
- [20] Sciarretta A., Back M., Guzzella L., 2004. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12 (3), 352-363.
- [21] Sciarretta A., Guzzella L., 2007. Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems* 27 (2), 60-70.
- [22] Dijkstra, Edsger W. "A note on two problems in connexion with graphs." *Numerische mathematik* 1.1 (1959): 269-271.
- [23] Moura S.J., Fathy H.K., Callaway, D.S., Stein, J.L., 2011. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19 (3), 545-555.