

Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi

Nilay AKGERMAN*, İlker TOPÇU

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programı, 34367, Maçka, İstanbul

Özet

Bu çalışmada önerilen hedef programlama modeli, binek otomobil üreticilerine yeni araç geliştirme veya mevcut araçlarının performanslarını iyileştirmeye yönelik stratejilerini oluştururken yol gösterecek niteliktedir. Modelin çalıştırılması neticesinde karar vericilere hedeflerine ulaşabilmeleri için araç portföylerinin hangi yakıt tipi, hangi motor tipi ve hangi egzoz tipi dağılımına sahip olmaları gerektiğinin yanı sıra ortaya koymuş oldukları stratejilerine yönelik de bir değerlendirme sunulmaktadır. Önerilen model, binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarını azaltma sorununa ait birbiri ile çelişen tüm hedefleri ve kısıtları dikkate almaktadır. Modelde yer alan hedeflerin ağırlıkları ise bir çok kriterli karar verme yöntemi olan analitik ağ süreci (ANP – Analytical Network Process) yönteminin uygulanması neticesinde elde edilmiştir. ANP yönteminin kullanılması ile birlikte hedef programlamanın en zor adımlarından biri olan hedeflerin önceliklendirilmesi veya ağırlıklandırılması aşaması sistematik bir yaklaşım ile oluşturulmuştur. Diğer taraftan, hedef programlamanın kullanılması ile bütçe, toplam yakıt kullanım miktarı, toplam araç sayısı gibi kısıtlar da göz önünde bulundurulurken ANP yönteminin önemli dezavantajlarından bir tanesi ortadan kaldırılmıştır. ANP ve hedef programlamanın birarada kullanılmasının en önemli nedeni de bu şekilde birbirlerinin zayıf taraflarını ortadan kaldırabiliyor olmalarıdır. Oluşturulan model için sonrasında duyarlılık analizi yapılarak farklı durumlarda sonuçların nasıl değiştiği de incelenmiştir. Önerilen model diğer araç ve hatta diğer sektörler için de söz konusu araç tiplerine veya sektörlerle ait dinamikler göz önünde bulundurulurken ve bu dinamiklere göre revize edilerek kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Çok kriterli karar verme, hedef programlama, ANP, CO₂ emisyon salınım miktarının azaltılması.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Nilay AKGERMAN. nilay.akgerman@daimler.com; Tel: (212) 867 39 97.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin analitik ağ süreci bazlı hedef programlama modeli ile değerlendirilmesi" adlı doktora tezinden yararlanılarak hazırlanmıştır. Makale metni 18.03.2010 tarihinde dergiye ulaşılmış, 20.04.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Akgerman, N., Topçu Y. İ., (2011) Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi", İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 2, 39-48" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Evaluation of CO₂ reduction strategies on passenger cars

Extended abstract

Climate change problem is being more and more important in the last decades and is one of the most important problems that humankind is facing. Climate change is the result of the global warming which is caused by the absorption of the sunlight by the greenhouse gases rather than deflection of it from the atmosphere. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), one of the leading organizations created by 2500 scientist from 150 different countries, makes research on climate change and states precisely that global warming depends to the greenhouse gases which results with human acts. Houghton et al. (1992) indicates that there is an increase of global warming with approximately 98% confidence level. On the other hand, it was stated with a confidence level greater than 90% that global warming is due to the greenhouse gases (Parry et al, 2007). Greenhouse gases are carbon dioxide (CO₂) with very high amounts in atmosphere, nitrous oxide, nitrogen oxide, methane, water vapor, ozone, and chlorofluorocarbons. Therefore, it comes out during the Climate Change Conferences and within the publications that the effective targets for reduction of CO₂ emissions have to be set-up immediately as from the developed countries. The climate change problem was examined via a detailed literature survey during this study. According to this survey, it has to be highlighted that the main reason of the climate change is due to the greenhouse gas effects and the energy sources which cause the production of the above mentioned greenhouse gases. The conflicting goals and constraints defined in accordance with survey results are making this problem more complex. That's why the scope of this study was limited with a specific application as defined in the following phrases. In the light of the literature survey results on CO₂ emission reduction, it comes out that each sector has its own dynamics to reduce CO₂ emissions. Therefore, the application area of this study is limited with a special sector to ensure more effective, sensitive, and robust proposals to solve this real problem. The scope of this study was identified as CO₂ emission reduction on transportation sector. When the transportation

sector was reviewed in detail, the results show that different vehicle types release different amount of CO₂ emission and the biggest portion with 81% in transportation sector is road transportation. The details of the 81% show that 63% of the transportation is made for passenger transportation and 37% for commercial transportation. Therefore, it was decided to apply the decision model to CO₂ emission reduction on passenger cars.

This study proposes a new ANP based goal programming model which guides the passenger car producers while they are building-up their CO₂ emission reduction related strategies. ANP is very helpful through its strength to deal with relationships and feedbacks among the criteria. The feedbacks and the relationships necessitate a very difficult evaluation of the decision makers. Therefore, a group decision making process based on ANP can be used for such decision problems to ensure the success of the study (Wey and Wu, 2007). On the other hand, the strength of the goal programming results from its ability to combine the conflicting goals and the constraints in a mathematical model to ensure an optimized result (Lee and Kim, 2001; Wey and Wu, 2007). The success of the combination of these two methods comes out from the elimination of other's weaknesses. The difficult step for a goal programming model is to define the importances and/or the priorities by decision makers at the beginning. This disadvantage was eliminated via including ANP method as a beginning step of the goal programming method. The main disadvantage of the ANP is that ANP does not take into account the resources limits and other constraints. The application of goal programming together with ANP solves this problem (Karsak et al., 2002). In our study, the results of the ANP are used as the importances of the goals in proposed model and the results of this model presents the optimized solutions in order to propose which strategies are to be taken into account, which motor types, exhaust types and fuel types are to be used for the new developed passenger cars or for the performance improvements of the existing cars.

Keywords: Multi criteria decision making, goal programming, ANP, reduction of CO₂ emission.

Giriş

İklim değişikliği, güneşten gelen ışınların yeryüzünden yansımaları esnasında atmosferde bulunan sera gazları tarafından tutularak yansımalarının engellenmesi neticesinde ortaya çıkan küresel ısınmanın bir sonucudur.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA - International Energy Agency), 2009'da hazırlamış oldukları "Dünya Enerji Görüşü 2009" (WEO-2009, World Energy Outlook 2009) raporunda bu konuda çok basit ve bir o kadar da güçlü bir mesaj ortaya koymuştur: "Eğer mevcut enerji politikaları ile devam edilirse, iklim değişikliğinin etkileri çok şiddetli olacaktır".

İklim değişikliği alanında yapılan bilimsel çalışmaların sonucunda ise, enerjinin günümüzde 2/3'lük oran ile emisyon gazlarının salınması konusunda büyük bir paya sahip olduğu ve bu sebeple de iklim değişikliği probleminin tam olarak kalbinde yer aldığı ortaya çıkmaktadır. Sera gazları; atmosferde çok yüksek miktarlarda bulunan karbondioksit (CO₂) ile nitroz oksit, azot oksit, metan, su buharı, ozon ve klorofloro-karbon olarak sıralanabilir.

Atmosferdeki sera gazlarının azaltılması küresel ısınma ivmesinin azaltılması açısından çok önemli olduğundan ve emisyon gazlarının salınımından 2/3'e denk gelen bir oran ile de enerji kaynakları sorumlu olduğundan, yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının kullanımını azaltmak, enerji kaynaklı emisyon salınımını azaltmak açısından çok önemlidir.

Bu alanda, gerek bilim dünyasındaki gerekse toplumdaki farkındalığın son yıllarda büyük bir ivme ile artmış olduğu, yapılan literatür taramasında da çok açık bir şekilde görülmektedir. Hem bilimsel alanda hem de toplumda bu farkındalığın artması, aslında konunun önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Bu nedenle bu çalışma kapsamında, insanoğlunu ciddi boyutlarda tehdit eden bu problemin çözümüne yönelik ortaya konulacak stratejilerin değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın sonuçlarının uluslararası bir otomotiv şirketinde kullanılacak olması sebebiyle, çalışma kapsamı ulaşım sektörü ile sınırlandırılmıştır.

Ulaşım sektörü hem yolcu hem de ticarî mal taşımacılığını kapsadığından, bu çalışma öncelikle yolcu taşımacılığına sonrasında ise her bir yolcu taşıma araç tipinin farklı özelliklere sahip olması nedeniyle sadece binek otomobillere odaklanarak konusunda özelleştirilmiştir.

Diğer sera gazları ile karşılaştırıldığında atmosferde çok yüksek miktarlarda bulunan gaz, CO₂ olarak tespit edilmektedir.

Yukarıda detaylandırılan süreç neticesinde bu çalışma kapsamında, atmosferde en büyük oranda bulunan CO₂ emisyon miktarının binek otomobillerde azaltılmasına yönelik stratejiler değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra değerlendirme neticesinde karar vericilere hedeflerine ulaşabilmeleri için araç portföylerinin hangi yakıt tipi, hangi motor tipi ve hangi egzoz tipi dağılımına sahip olmaları gerektiği de sunulmaktadır.

Literatür araştırması

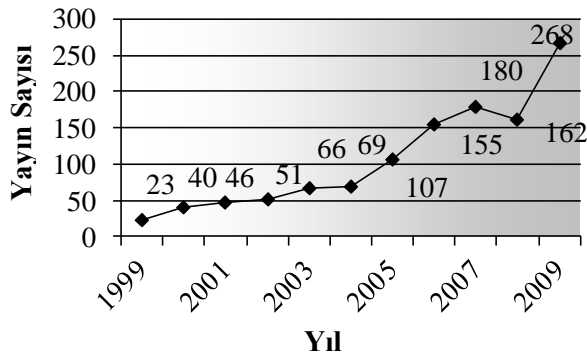
Bu çalışma kapsamında detayları ilerleyen paragraflarda verilen geniş bir literatür taraması yapılmış ve iklim değişikliği problemi derinlemesine incelenmiştir.

Houghton ve diğerleri (1992) yaklaşık %98'lik bir güven seviyesi ile küresel ısınmanın olduğuna dair hiçbir şüphe olmadığını belirtmektedirler. Diğer taraftan %90'dan daha büyük bir güven seviyesinde küresel ısınmanın sera gazlarından kaynaklandığı, Parry ve diğerlerinin (2007) çalışmalarında ortaya konmaktadır. Sera gazları; atmosferde çok yüksek miktarlarda bulunan karbondioksit (CO₂) ile nitroz oksit, azot oksit, metan, su buharı, ozon, kloroflorokarbon olarak sıralanabilir.

Güneşten gelen ışınların, yeryüzünden yansımaları esnasında atmosferde bulunan sera gazları tarafından tutularak yansımalarının engellenmesi neticesinde küresel ısınma meydana gelmektedir. Bu nedenledir ki; düzenlenen İklim Konferansları'nda ve yayınlanan bildiri ve imzala-

nan protokollerde gelişmiş ülkelerden başlayarak CO₂ emisyonları başta olmak üzere tüm sera gazı emisyonlarının düşürülmesine yönelik hedefler konulmuştur.

Literatür taraması 1999-2009 dönemi için yapıldığında, yıllar bazındaki dağılımı Şekil 1’de verilen 1167 yayına ulaşılmıştır. Yayınlar; enerji ve yakıtlar, çevre bilimleri, elektrokimya ve kimya mühendisliği gibi alanlardadır.



Şekil 1. CO₂ emisyon salınıminin azaltılmasına yönelik yayınların dağılımı

Criqui ve diğerleri (1999) yayınlarında Kyoto Antlaşması’na taraf ülkeler ile gelişmekte olan ülkelerin sera gazlarını azaltmaya yönelik sistemleri uygulamaya almalarının yaratabileceği ekonomik potansiyel ve tehditleri analiz etmişlerdir. Çalışmalarında marjinal emisyon azaltma maliyeti ile POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems)’te oluşturulan 2010 yılına ait referans senaryo karşılaştırılmıştır.

Galeotti ve Lanza (1999) çalışmalarını 110 farklı gelişmekte olan ülkenin ekonomik datalarını kullanarak yapmışlar ve ancak gayri safi yurtiçi hasıla artarsa CO₂ emisyonlarının azaltılabileceği sonucunu çıkarmışlardır.

Chen (2001) yayınında Tayvan için ancak gayri safi yurtiçi hasıla ile CO₂ emisyon salınımi arasındaki değiş-tokuş ilişkisini tahmin edebilmek için çok amaçlı programlamayı kullanmıştır. Yapılan çalışmada gayri safi yurtiçi hasılayı ençoklama ve CO₂ emisyonunu ise enazlama olmak üzere iki amaç bulunmaktadır.

Yapılan analizler neticesinde CO₂ emisyon salınıminin azaltma maliyetlerinin Tayvan’da çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle CO₂ emisyon seviyesinin 1990 yılı seviyelerinde tutulmaya çalışılması gayri safi yurtiçi hasılayı azaltacak ve ülke ekonomisini kötüye götürecektir.

Georgopoulou ve diğerleri (2003) çalışmalarında açığa çıkan emisyonların büyük bir kısmının enerji sektöründen kaynaklanması nedeniyle enerji sektöründe emisyon azaltılmasına yönelik alınabilecek aksiyonları, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan ELECTRE-3 (Elimination et Choix Tradusiant la Realite) ile değerlendirmiştir. Çalışmalarından çıkan sonuçlardan hareket edildiğinde seçilen bir yöntemin mutlaka maliyeti en düşük yöntem olması gerekmediği görülmüştür. CO₂ emisyonunun azaltılması birden fazla boyutta (ekonomik, sosyal, çevresel vb.) değerlendirilmesi gereken bir problem olduğundan farklı karar vericiler farklı önceliklere sahip olabilmektedir. Uygulama neticesinde Yunan enerji sektörü için ortaya konulan CO₂ emisyon azaltma aksiyonları önceliklendirilmiş ve bir aksiyon planı oluşturulmuştur.

Mirasgedis ve diğerleri (2004) Yunan konut sektöründe CO₂ emisyon salınıminin azaltmaya yönelik ortaya çıkarılan on dört farklı yöntemin değerlendirmesini yapmıştır. Değerlendirme esnasında öncelikle maliyet etkinlik analizi yapılmış ve bu analiz neticesinde seçilen yöntemler için maliyet/kâr analizi uygulanmıştır. Söz konusu analizler aracılığıyla uygun yöntemler önceliklendirilmiştir. CO₂ emisyonunu konut sektöründe azaltmaya yönelik seçilen yöntemler eski merkezî ısıtma kazanlarının değiştirilmesi, ışıklandırılmada düşük enerjili ampullerin kullanılması, çatı vantilatörlerinin kullanılması ve eski klimaların değiştirilmesi olarak sıralanabilir.

Ulaşım sektöründe CO₂ emisyonlarının azaltılması ile ilgili 1999-2009 dönemini kapsayan bir literatür araştırması yapılmış olup toplam 210 yayına ulaşılmıştır. Bu yayınların büyük kısmı enerji ve yakıt, çevre bilimleri, ulaşım, kimya mühendisliği ve elektrokimya üzerinedir ve son yıllarda ulaşım sektöründe CO₂ emisyonlarının

azaltılmasına yönelik yayın sayısında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar daha çok politika ve yakıt tiplerinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi üzerine odaklanmış olan yayınlardır.

Araştırma binek otomobillerle sınırlandırıldığında ise 1999-2009 döneminde yayınlanan toplam 10 yayına ulaşılabilmektedir.

Soria ve diğerleri (2007) yayınlarında geleceğin araçları olarak gösterilen hibrit araçlarda kullanılan pillerin güvenilir ve uzun ömürlü olması için gerekli olan geliştirme çalışmalarını sunmaktadır.

Yapılan literatür araştırması neticesinde ulaşım sektöründe binek otomobiller tarafından salınan CO₂ emisyon miktarını azaltmaya yönelik pek çok strateji ve hedef olduğu bilgisi elde edilmiştir. Ancak yapılan çalışmalar daha çok belli stratejilerin karşılaştırılması, değerlendirilmesi ve tartışılması üzerine olmuştur. Binek otomobillerde CO₂ emisyonunu azaltma problemi ile karşı karşıya kalan en önemli iki paydaş otomobil kullanıcıları ve otomobil üreticileridir. Otomobil kullanıcılarına hükümet tarafından dayatılan herhangi bir politika olmamakla birlikte otomobil üreticilerinin belli periyotlarda ulaşmaları gereken belli CO₂ emisyon salınım hedefleri bulunmaktadır. Hem binek otomobilleri müşteriye satabilecekleri maliyetlerde üretmek hem de hükümetler tarafından belirlenmiş olan hedeflere ulaşabilmek açısından binek otomobil üreticilerinin stratejilerini doğru ve net bir şekilde ortaya koymaları ve bu stratejilerini önceliklendirmeleri büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda birden fazla birbiri ile çelişen hedefin olduğu bu gerçek problemde hedef programlamanın uygulanarak en uzlaşık sonucun elde edilmesi istenmektedir.

Söz konusu problemin çözümünde kullanılacak yöntemi belirlemek amacıyla, kapsamlı bir literatür araştırması ise karar verme yöntemleri üzerine yapılmıştır. ANP, kriterler arasındaki ilişkilerin ve geri beslemelerin belirlenmesi aşamasında gösterdiği güçlü yanları nedeniyle karar vericilere yardımcı olmaktadır. ANP özel-

likle grup karar verme süreçleri ile birleştirilmesi neticesinde büyük problemlerin çözülmesinde ve sonuçların başarısının garanti altına alınması açısından uygulanabilecek uygun yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Wey ve Wu, 2008). Diğer taraftan, hedef programlamanın güçlü yanı ise birbiri ile çelişen hedefleri ve kısıtları bir matematiksel model içerisinde birleştirerek en uzlaşık sonucun bulunmasını sağlamasıdır (Lee and Kim, 2000; Wey ve Wu, 2008). Bu iki metodun birleştirilmesindeki başarı birbirlerinin zayıf yanlarını elimine ediyor olmalarında yatmaktadır. Bir hedef programlamada en zor aşama, karar vericilerin başlangıçta hedeflerin önceliklerini veya ağırlıklarını belirlemek zorunda olmasıdır. Bu dezavantaj ise hedef programlamanın ilk adımı olarak ANP'nin uygulanması ile ortadan kaldırılmaktadır. ANP'nin en önemli dezavantajı ise değerlendirme esnasında kaynak limitlerini ve kısıtları dikkate almamasıdır. Hedef programlamanın ANP ile birlikte kullanılması da bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır (Karsak vd., 2002).

Bu çalışmada ANP ile önerilen hedef programlama modeline ait hedeflerin ağırlıkları belirlenecek ve modelin çalıştırılması neticesinde elde edilen sonuçlar ise binek otomobil üreticilerine hem CO₂ emisyon azaltmaya yönelik stratejilerin belirlenmesi aşamasında yol gösterici olacak hem de hangi motor tipi, hangi egzoz tipi ve hangi yakıt tipine sahip araçları içeren bir ürün yelpazesine sahip olabileceklerine dair öneriler sunacaktır.

Karar verme

Karar verme, hemen hemen her kişisel, iş veya sosyoekonomi ile ilgili problemde her an karşı karşıya kaldığımız bir durumdur. Napoleon I'in de dediği gibi "*Karar verebiliyor olmak, her şeyden daha güç ve bu nedenle de daha değerlidir.*"

Aldığımız karar birden çok faktörü yani kriteri aynı anda dengeliyor olmalıdır (Belton ve Stewart, 2002). Literatürde karar verme sürecine ait pek çok yaklaşım bulunmaktadır (Jacquet-Lagrange ve Shakun, 1984; Kirkwood, 1997; Belton ve Stewart, 2002).

Bu kapsamda, bu çalışmada izlenen karar verme süreci şöyle özetlenebilir:

1. Problemin yapılandırılması

Problemin tanımlanması: Problem, yapılan literatür taraması neticesinde yukarıda verilen detay süreç kapsamında “Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılması” olarak tanımlanmıştır.

Değer ve amaçların belirlenmesi: Yapılan literatür taraması ve uzman kişilerle yapılan görüşmeler neticesinde belirlenmiştir.

Stratejilerin belirlenmesi: Stratejiler, yapılan literatür taraması ve uzman kişilerle yapılan görüşmeler neticesinde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında karayolu taşımacılığında kullanılabilir olmayan yakıtların kullanımını azaltmak ve yenilenebilir yakıtların kullanımını arttırmak, araç tipini (motor tipini) değiştirmek, egzoz tipini değiştirmek ve yakıt tüketimini azaltmak olmak üzere toplam beş strateji yer almaktadır.

2. Karar modelinin kurulması

Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi: Çalışma kapsamında dört küme içerisinde yer alan toplam yirmi kriter bulunmaktadır. Söz konusu kriterlerin ağırlıkları, ANP tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Kriterler de benzer şekilde, yapılan literatür taraması ve uzman kişilerle yapılan görüşmeler neticesinde belirlenmiştir.

Amaçların/hedeflerin ağırlıklarının belirlenmesi: ANP tekniğinin uygulanması neticesinde bulunan kriter ağırlıklarının toplanması ile hesaplanmıştır. Her bir amacın ağırlığının hangi kriter ağırlıklarının toplamı ile hesaplanacağı, hem literatür taraması sonuçlarına hem de uzman kişilerin görüşlerine göre belirlenmiştir. Probleme ait amaçlar stratejilerle ilişkilidir. Toplam yedi amaç bulunmakta olup; Avrupa Birliği Komisyonu tarafından konulan 20/20/20/20 hedefine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Amaçlar; karayolu taşımacılığında kullanılabilir yenilenebilir olmayan yakıtların kullanımını %20 azaltmak (1. amaç), yenilenebilir yakıtların kulla-

nımını arttırmak (2. amaç), yakıt mâliyetini %20 azaltmak (3. amaç), motor mâliyetini %20 azaltmak (4. amaç), egzoz mâliyetini %20 azaltmak (5. amaç), açığa çıkan CO₂ emisyon miktarını %20 azaltmak (6. amaç) ve yakıt tüketimini %20 azaltmaktır (7. amaç).

3. Problemin çözümlenmesi

Modelin çalıştırılması: Kurulan hedef programlama modeli, sözkonusu bu gerçek problem için tüm kısıtları da içinde barındırmaktadır. Modelde kullanılan parametreler Avrupa Birliği Komisyonu tarafından yayımlanmış yayınlardan elde edilmiştir (Url-1, Url-2, Url-3, Url-4, Url-5). Kurulan model, GAMS (General Algebraic Modeling System) programında çalıştırılmıştır. GAMS programı; doğrusal, doğrusal olmayan veya karışık tam sayılı matematiksel programlama ve eniyileme problemlerinin modellenmesinde kullanılan yüksek donanımlı bir sistemdir. GAMS programı, karmaşık ve büyük problemlerin çözümü için kullanılmakta olup modelde herhangi bir değişiklik olması durumunda ise kısa zamanda değişiklik yapabilme imkanı da sunmaktadır.

Sonuçların değerlendirilmesi: 20/20/20/20 modeli çalıştırıldığında uygun sonuçlar bulunmuş, ancak üçüncü ve yedinci hedef değerlere ulaşamamıştır.

Duyarlılık analizi yapılması: Duyarlılık analizi ile farklı senaryolar üzerinden çalışmalar yapılmış ve hedef değerlerdeki değişikliklerin amaçlara ulaşma düzeyini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Detaylı sonuçlar ilerleyen bölümlerde verilmektedir.

Farklı senaryolar kullanılarak yapılan duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi, doğrusal programlamadaki en önemli konulardan bir tanesidir.

Pek çok doğrusal programlama modelinde parametreler yani amaç fonksiyonundaki katsayılar, sağ taraf değerleri veya diğer teknik katsayılar belli durumlara göre değişebilmektedir.

Duyarlılık analizi ile bu değişiklikler olduğunda modelin sonuçlarında nasıl değişiklikler olduğu, başka bir deyişle en iyi sonucun parametrelerine ne kadar bağımlı olduğu izlenebilir. Böylece belli parametrelerdeki değişikliklerin orijinal problemin sonuçlarında nasıl bir değişikliğe neden olduğu saptanabilmektedir.

Bu kapsamda kurulan modelin belli parametrelerine olan bağımlılığı duyarlılık analizi ile detaylıca incelenmiştir. Duyarlılık analizi sonuçları, oluşturulan senaryo ve varsayımlara göre değişiklik göstermektedir. Duyarlılık analizi, detayları tablolarda verilen toplam dört senaryo bazında yapılmıştır.

Senaryo 1 için toplam üç tane farklı varsayım kullanılarak duyarlılık analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de verilen sonuçlara göre Senaryo 1 Varsayım 1 için, 3. hedef değerinin hiç bir koşulda sağlanamadığı görülmektedir.

Tablo 1. Senaryo 1 Varsayım 1’e göre karşılanamayan hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|---|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yenilenebilir olmayan yakıt tüketim hedef değeri %0-%100 aralığında azaltılarak hesaplanmıştır. | %0 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %5 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %10 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %20 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %30 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %40 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| * Yakıt mâliyeti hedefi 0.30 €/GJ | %50 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %60 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| * Egzos mâliyeti hedefi 403.23 € | %70 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %80 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| *Diğer hedef değerleri baz değerlerdir. | %90 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %95 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %100 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Senaryo 1 Varsayım 2’ye göre karşılanabilen ve karşılanamayan hedefler Tablo 2’de verilmektedir. Yenilenebilir olmayan yakıt kullanım hedefi %0-%80 aralığında azaltıldığında 3. ve 7. hedefler karşılanamazken hedef değer %90-%100 aralığında azaltıldığında ise 1., 2., 3. ve 7. hedeflerin karşılanamadığı tespit edilmiştir.

Tablo 2. Senaryo 1 Varsayım 2’ye göre karşılanamayan hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|---|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yenilenebilir olmayan yakıt tüketim hedef değeri %0-%100 aralığında azaltılarak hesaplanmıştır. | %0 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %5 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %10 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %20 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %30 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %40 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Yakıt mâliyeti hedefi 0.30 €/GJ | %50 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Egzos mâliyeti hedefi 403.23 € | %60 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %70 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| *Diğer hedef değerleri baz değerleri %20 azaltılarak hesaplanmıştır. | %80 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %90 | X | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %95 | X | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %100 | X | X | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Tablo 3. Senaryo 1 Varsayım 3’e göre karşılanamayan hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|--|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yakıt mâliyeti hedefi 0.30 €/GJ | %20 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %21 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Egzos mâliyeti hedefi 403.23 € | %22 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X |
| | %25 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X |
| | %26 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| * Yenilenebilir olmayan yakıt tüketim hedef değeri baz değer %20 azaltılarak hesaplanmıştır. | %27 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| | %30 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| | %40 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| | %50 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| | %60 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| *Diğer hedef değerleri baz değerleri %0-%100 aralığında azaltılarak hesaplanmıştır. | %63 | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X | X |
| | %64 | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X |
| | %66 | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X |
| | %80 | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X |
| | %90 | ✓ | ✓ | X | X | X | X | X |

Tablo 3 incelendiğinde ise yakıt mâliyeti, egzos mâliyeti ve yenilenebilir olmayan yakıt tüketimine ait hedeflerin dışında kalan diğer hedeflere ait değerlerin hesabında baz değerler %20 ve

%21 azaltıldığında yakıt mâliyetine ait 3. hedef ile yakıt tüketimine ait 7. hedef karşılanamazken, baz değerler %22 ile %25 aralığında azaltıldığında ise 3., 7. ve CO₂ emisyon miktarına ait 6. hedefin karşılanamadığı görülmüştür.

Benzer şekilde baz değerler %26-%63 aralığında azaltılarak yeniden hesaplandığında ise 3., 6., 7. ve egzoz mâliyetine ait 5. hedefin karşılanamadığı gözlemlenmiştir. %64-%90 aralığında azaltılarak yapılan hesaplamalar neticesinde model yeniden çalıştırıldığında ise 3., 5., 6., 7. ve motor mâliyetine ait 4. hedefin karşılanamadığı görülmektedir.

Her bir araç tipine ait yakıt tüketim değerleri Senaryo 2’de %20-%90 aralığında azaltılarak oluşturulan modeller, GAMS programında çalıştırılmıştır. Bu kapsamda Tablo 4’de görüldüğü üzere yakıt mâliyetine ait 3. hedef hiçbir durumda karşılanamamıştır.

Tablo 4. Senaryo 2’ye göre karşılanamayan hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|---|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yakıt mâliyeti hedefi 1.14 €/GJ. | %20 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| * Egzoz mâliyeti hedefi 433.33 €. | %30 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| * Her bir araç tipinin yakıt tüketim miktarları %20-%90 aralığında azaltılmış ve hedef değer 6,7 L/100km olarak alınmıştır. | %40 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| *Diğer hedef değerleri baz değerleri %20 azaltılarak hesaplanmıştır. | %50 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %60 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %70 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %80 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | %90 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Her bir araç tipine ait CO₂ emisyon salınım değerleri Senaryo 3 kapsamında %20-%90 aralığında azaltılarak oluşturulan modeller GAMS programı kullanılarak çalıştırıldığında ise Tablo 5’de görüldüğü üzere yakıt tüketimine ait 7. hedef hiç bir durumda karşılanamamıştır. Son bir duyarlılık analizi çalışması ise hedeflerin ANP’den gelen ağırlıklarının değiştirilmesi ne-

ticesinde elde edilmiştir. Criqui ve diğerleri (1999) yayınlarında sera gazlarını azaltmaya yönelik maliyetlerin ülkeden ülkeye ve bölgeden bölgeye değişkenlik gösterebileceğini vurgulamışlardır.

Tablo 5. Senaryo 3’e göre karşılanamayan hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|--|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yakıt mâliyeti hedefi 1.14 €/GJ. | %20 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Egzoz mâliyeti hedefi 433.33 €. | %30 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Her bir araç tipinin CO ₂ emisyon salınım miktarları %20-%90 aralığında azaltılmış ve hedef değer 130 gCO ₂ eq/km olarak alınmıştır. | %40 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| *Diğer hedef değerleri baz değerleri %20 azaltılarak hesaplanmıştır. | %50 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %60 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %70 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %80 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %90 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |

Bu kapsamda endüstrileşmeyi tamamlamış bir ülke için CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik hedefler daha önemli ve maliyet hedefleri daha önemsiz olabilirken, henüz gelişmekte olan ülkelerde ise hedef önemleri bu durumdan farklı çıkabilecektir. Bu nedenle daha geniş bir bakış açısı kazanabilmek adına ANP’den gelen 1., 2., 6. ve 7. hedeflere ait ağırlıklar %10-%95 oranında azaltılırken 3., 4. ve 5. hedeflere ait ağırlıklar ise tüm hedeflerin ağırlıkları toplamı 1 olacak şekilde yeniden hesaplanmıştır. Yeni hedef ağırlıklarına göre oluşturulan modeller GAMS programında çalıştırılmış ve Tablo 6’da detayları paylaşılan sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda ANP’den gelen 1., 2., 6. ve 7. hedeflere ait ağırlıklar ancak %80 seviyesinde azaltıldığında Senaryo1 Model 20/20/20/20’nin çalıştırılması neticesinde elde edilen araç tipi dağılımında bir değişiklik olduğu tespit edilmiş ve

Senaryo 1 Model 20/20/20/20 sonuçlarından farklı olarak DME yakıt ve bu yakıtı kullanan araç öneriler arasına girememiş ve bu aracın kullanmakta olduğu 2. tip egzoz da seçilememiştir.

Tablo 6. Senaryo 4'e göre karşılanamayan Hedefler

| | Değişim | Hedefler | | | | | | |
|---|---------|----------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| * Yakıt maliyet hedefi 0.30 €/GJ. | %10 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * Egzoz maliyet hedefi 403.23 €. | %20 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| *Diğer hedef değerleri baz değerleri %20 azaltılarak hesaplanmıştır. | %30 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| * ANP'den gelen 1., 2., 6. ve 7. hedeflere ait ağırlıklar %10-%95 aralığında azaltılmıştır. | %40 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %50 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %60 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %70 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| | %80 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X |
| | %90 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X |
| | %95 | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | X | X |

Hedefler karşılaştırıldığında ise Senaryo 1'deki Model 20/20/20/20 sonuçlarından farklı olarak CO₂ emisyon miktarının %20 azaltılmasına yönelik 6. hedefin de karşılanamadığı tespit edilmiştir.

Sonuçlar ve öneriler

Çalışma kapsamında kurulmuş olan hedef programlama modeli, GAMS programında çalıştırılmış ve sonuçlar stratejiler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- En uygun sonuç bulunmuştur.
- Model sonuçlarına göre yakıt olarak binek otomobillerde, %24 oranında çift yakıtlı CNG (Compressed Natural Gas), %18 oranında CNG (%100), %21 oranında etanol ve %37 oranında DME (Di-Metil-Eter) kullanılması önerilmektedir.

- Yakıt tiplerine uygun olacak şekilde etanol ile çalışan ve hibrit olmayan portlu püskürtmeli araç tipinden %16, CNG (çift yakıtlı) ile çalışan ve hibrit olmayan portlu püskürtmeli araç tipinden %28, DME ile çalışan, filtresiz kullanılan ve hibrit olmayan direkt sıkıştırılmalı püskürtmeli araç tipinden %29 ve CNG (100%) ile çalışan ve hibrit olan portlu püskürtmeli araç tipinden ise %27 oranında kullanılması önerilmektedir.

- Araç tiplerine uygun olacak şekilde normal egzoz tipinden %71 ve dizel araç için filtresiz egzoz tipinden ise %29 oranında kullanılması önerilmektedir.

- Sonuçlar incelendiğinde ortalama yakıt maliyetine ait olan 3. hedef ile yakıt tüketimine ait olan 7. hedefin karşılanamadığı görülmüştür.

- Strateji kümesi elde edilen bilgiler ışığında değerlendirildiğinde; yenilenebilir olmayan yakıt kullanımını azaltmak ve bununla birlikte de yenilenebilir yakıt kullanımını arttırmak, araç yani motor tipini ve egzoz tipini değiştirmek stratejilerinin uygulanabilirliği görülmektedir. Diğer taraftan yakıt tüketimini azaltma stratejisi bu kapsamda karşılanamamış olsa da, CO₂ emisyon salınımı binek otomobillerde istenilen düzeylerde azaltılmıştır.

Gelecek çalışmalar için; özellikle karayolu taşımacılığında başka ulaşım modlarının da olduğu düşünüldüğünde çalışmanın diğer ulaşım modları da dahil edilerek ulaşım sektörünün tümünü kapsayan daha geniş bir uygulamaya dönüştürülmesi önerilmektedir.

Diğer taraftan benzer bir çalışma diğer sektörler için de yapılabilir ve tüm sektörler için genel bir strateji değerlendirilmesi sunulabilir.

Elbette her bir sektör veya her bir ulaşım modu için matematiksel model ve kriterler farklılık gösterebilecektir ancak büyük resmi görmek ve bu resimden yola çıkarak diğer uygulamalar için modeli özelleştirmek gelecekteki çalışmalar için kolaylık sağlayacaktır.

Yapılan çalışmada hedeflerin ağırlıkları ANP kullanılarak elde edilmiştir. Ağırlıkların başka yöntemler kullanılarak da hesaplanması ve yöntemlerin farklılaşması ile ağırlıklarda nasıl bir değişiklik olduğunun ve bu değişikliğin sonuçları nasıl etkilediğinin de incelenmesi de mümkündür.

Kaynaklar

- Belton, V. ve Stewart, T. J., (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis, An Integrated Approach*, 100-120, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA.
- Chen, T.Y., (2001). The impact of mitigating CO₂ emissions on Taiwan's economy, *Energy Economics*, **23**, 2, 141-151.
- Criqui, P., Mima, S. ve Viguier, L., (1999). Marginal abatement costs of CO₂ emission reductions, geographical flexibility and concrete ceilings: an assessment using the POLES model, *Energy Policy*, **27**, 10, 585-601.
- Galeotti, M. ve Lanza, A., (1999). Richer and cleaner? A study on carbon dioxide emissions in developing countries, *Energy Policy*, **27**, 10, 565-573.
- Georgopoulou, E., Sarafidis, Y., Mirasgedis, S., Zaimi, S. ve Lalas, D.P., (2003). A multiple criteria decision-aid approach in defining national priorities for greenhouse gases emissions reduction in the energy sector, *European Journal of Operational Research*, **146**, 1, 199-215.
- Houghton, J.T., Callveer, B.A. ve Varney, S.K., (1992). *Climate Change 1992: The IPCC Supplementary Report*, 20-30, Cambridge University Press, Cambridge, UK..
- Karsak, E. E., Sozer, S. ve Alptekin, S. E., (2002). Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach, *Computer and Industrial Engineering*, **44**, 1, 171 - 190.
- Kirkwood, C.W., (1997). *Strategic Decision Making: Multiobjective Decision Analysis with Spreadsheets*, 40-50, Wadsworth Publishers, Belmont.
- Jacquet-Lagrange, E. ve Shakun, M.F., (1984). Decision support systems for semi-structured buying decisions, *European Journal Operations Research*, **16**, 1, 48-58.
- Lee, J.W. ve Kim, S.H., (2000). Using analytic network process and goal programming for interdependent information system project selection, *Computers & Operations Research*, **27**, 4, 367-382.
- Mirasgedis, S., Georgopoulou, E., Sarafidis, Y., Balaras, C., Gaglia, A., Lalas, D. P., (2004). CO₂ emission reduction policies in the greek residential sector: a methodological framework for their economic evaluation, *Energy Conversion and Management*, **45**, 4, 537 - 557.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. ve Hanson, C.E., (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 35-45, Engle.
- Soria, M.L., Trinidad, F., Lacadena, J.M., Valenciano, J. ve Arce, G., (2007). Spiral wound valve-regulated lead-acid batteries for hybrid vehicles, *Journal of Power Sources*, **174**, 1, 1-48.
- Wey, W.M. ve Wu, K.Y., (2008). Interdependent urban renewal project selection under the consideration of resource constraints, *Environment and Planning B-Planning & Design*, **35**, 1, 122-147.
-
- <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW/>, (10.01.2009)
- <http://www.energy.eu/>, (10.01.2009)
- http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFF_PUB/KS-70-07-038/EN/KS-70-07-038-EN.PDF, (11.01.2009)
- http://www.ceer-eu.org/portal/page/portal/ERGEG_HOME/ERGEG_DOCS/ERGEG_DOCUMENTS_NEW/CUSTOMER_FOCUS_GROUP/E07-CPR-10-03_E-UPriceReg.pdf, (11.01.2009)
- <http://www.mizuho-ir.co.jp/english/>, (01.02.2009)
- <http://europa.eu>, (09.01.2009)