

# AYNI GÜÇ ÜRETİMİ İÇİN TERMAL VE RÜZGÂR BARALARININ YAKIT MALİYETİ VE EMİSYON AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet Güçyetmez<sup>1</sup>, Ertuğrul Çam<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ahi Evran Üniversitesi, <sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi  
<sup>1</sup>mgucuyetmez@ahievran.edu.tr, <sup>2</sup>cam@kku.edu.tr

## ÖZET

Rüzgâr, güneş enerjisi gibi dağıtık üretim birimlerinin geleneksel güç sistemine her geçen gün artan oranlarda eklenmesi ile birlikte oluşan yeni enterkonnekte sistem yakıt maliyeti ve çevre emisyonu bakımından analiz edilmeye ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel bir enerji üretim kaynağının dağıtık ve yenilenebilir bir enerji kaynağına dönüştürülmesi yakıt maliyeti, küresel ısınma gibi çevresel etkiler ve özellikle ülke ekonomisine olan etkileri açısından oldukça önemlidir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de rüzgâr enerjisi hızla gelişmekte olan bir enerji türüdür. Türkiye'nin kurulu gücü göz önüne alındığında mevcut 5000 MW'a yaklaşan rüzgâr gücü ve hedefteki 20000 MW toplam güç anlam kazanmaktadır. Enerji sistemlerinin toplam yakıt maliyeti ve diğer etkileri güç akış programları ya da algoritmalar tarafından hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel termal enerji üretim birimlerinden oluşan bir sistemin kapasitesine eşdeğer bir rüzgâr üretimi olması durumunda yakıt maliyeti ve emisyon miktarlarındaki değişimler hesaplanmıştır. Böylece rüzgâr enerjisinin geleneksel güç sistemini ne şekilde etkilediği görülmüştür. Bu amaçla etkin bir güç akış analiz algoritması olan Öğrenme-Öğretme Optimizasyon Algoritması (Teaching Learning Based Optimization (TLBO) Algorithm) kullanılmıştır. Sonuçlar geleneksel sistemlerin etkilerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle rüzgâr enerjisinin öneminin farklı açılardan anlaşılması açısından önemlidir.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda rüzgâr, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojisinin gelişmesi, bu alanlara yapılan yatırımlar ve çevreye olan duyarlılık enerjinin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesinin önemini gündeme getirmiştir. Özellikle rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerde rüzgârdan üretilen elektriğin birim maliyetinin düşük olması nedeniyle yeni rüzgâr türbinleri kurulmaya başlanmıştır [1]. Enerji çeşitliliği ve potansiyellerine göre rüzgâr-güneş gibi yenilenebilir kaynaklar birlikte de tesis edilebilmektedir.

Enterkonnekte güç sistemleri elektrik enerjisinin santrallerdeki üretim aşamasından son alıcı olan tüketicilere kadar kesintisiz, kaliteli, düşük maliyetli ve çevreye zarar vermeyen şekilde üretimini sağlamaya çalışan sistemlerdir. Elektrik enerjisinin daha düşük maliyetle ve çevreye daha az zararla üretilmesi, santrallerin üretim maliyeti, yatırım maliyeti, işçilik maliyeti, bakım onarım maliyeti gibi giderler açısından son derece önemlidir. Tüm bu maliyetler göz önüne alındığında geleneksel enerji üretim birimlerinin yenilenebilir olanlara dönüştürülmesi önem kazanmaktadır.

Elektrik enerjisinin yakıt maliyetinin hesaplanmasında ve bu maliyet temel alınarak sera gazı emisyonu hesaplamalarında optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar sonucunda güç sistemindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının etkileri tespit edilmektedir [2].

## 2. GELENEKSEL VE YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN GÜÇ AKIŞ ANALİZİ İLE YAKIT MALİYETİ VE EMİSYON HESABI

Geleneksel bir güç sistemi için yakıt maliyeti

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{n_g} (\alpha_i + \beta_i P_{g_i} + \gamma_i P_{g_i}^2) (\$/h) \quad (1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ve  $\gamma_i$  termal generatörler için yakıt maliyet katsayıları ve  $P_{g_i}$ , i. generator için aktif güç ve  $n_g$  sistemdeki generatörlerin sayısıdır.

Rüzgar türbinlerin sürekli ortalama güç ile çalıştıkları kabul edilerek güç sistemine rüzgâr türbinlerinin eklenmesi ile yakıt maliyeti

$$F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^{n_g} (\alpha_i + \beta_i P_{g_i} + \gamma_i P_{g_i}^2) + \sum_{j=1}^{n_w} (d_j w_j) (\$/h) \quad (2)$$

olmaktadır [3]. Burada  $d_j$  j. rüzgar generatörü için doğrudan maliyet katsayısı ve  $w_j$  j. rüzgar generatöründen elde edilen planlanan rüzgar gücü ve  $n_w$  sistemdeki rüzgar generatörlerinin sayısıdır. d değeri rüzgar turbine kazanç katsayısıdır ve genellikle 1 olarak alınmaktadır.

**Çizelge 1.** Termal kaynaklardan oluşan 8 baralı bir güç sistemi

Gen No.	Power Plant	Fuel Type	$\alpha_i$ (\$)	$\beta_i$ (\$/MW)	$\gamma_i$ (\$/MW <sup>2</sup> )	$P_{i_{\min}}$ (MW)	$P_{i_{\max}}$ (MW)
1	Hamitabat	N. Gas	6595.5	7.0663	0.0168	190	1120
2	Ambarlı	Fuel Oil	7290.6	7.2592	0.1270	245	1350
3	Dgaz	N. Gas	6780.5	5.6820	0.0106	318	1432
4	Seyitömer	Coal	1564.4	3.1288	0.0139	150	600
5	SomaB	Coal	5134.1	6.2232	0.0168	210	990
6	Yeniköy	Coal	1159.5	3.3128	0.0210	110	420
7	Kemerköy	Coal	1697.0	3.2324	0.0137	140	630
8	Yatağan	Coal	1822.8	3.4720	0.0147	140	630

Çizelge 1'de 8 baralı termal bir güç sistemi verisi verilmiştir [4]. Geleneksel güç sisteminde buhar türbinli termal sistemlerin maliyet hesaplamasında kullanılan katsayılardan  $\alpha$  katsayısı klasik olarak 1000 ve katları gibi oldukça yüksek olmasına karşın rüzgâr güç sisteminde bu değer 1 olarak alınmaktadır. Bu ise rüzgâr enerjisinin işletme maliyetinin neden daha az olduğunu açıklamaktadır.

Yakıt maliyeti formülleri incelendiğinde geleneksel bir güç sistemi yerine rüzgâr enerjili bir güç sistemi kullanmanın birçok avantajları olduğu görülmektedir. Bu avantajların belli başlıcaları şunlardır:

- Yakıt maliyet hesabı daha basittir. 3 farklı yakıt katsayısı yerine tek kazanç katsayısı ile işlem yapılmaktadır.
- Optimum güç değeri hesaplama süresi daha azdır.
- Daha az adımlı ve küçük bir optimizasyon algoritması ile hesaplama yapılmaktadır.

- Şebekedeki geleneksel güç sistemi yükünü azaltmasından dolayı şebeke frekansını düzenleyici yönde etkisi vardır.

Emisyon hesabı geleneksel ve rüzgârla üretim güç sistemleri için ele alındığında geniş çaplı hesaplamalar gerektiren bir alandır. Rüzgarla enerji üretiminde karbon emisyonu ve emisyon maliyeti rüzgar güç sistemini oluşturan kurulum, kule, rotor ve naşel gibi parçalar ve bu parçaların yapıldığı beton, demir, fiberglas, paslanmaz çelik, bakır, alüminyum gibi malzemelerin toplam maliyetinden oluşmaktadır. Ayrıca rüzgar türbini kurulacak bölgenin kapasite faktörü ve türbin ömürleri de emisyon ve emisyon maliyetini etkilemektedir [5, 6, 7, 8]. Bu çalışmada rüzgar enerjisi ile emisyon maliyetinde sadece enerji üretimi ile ilgili maliyetleri ele alınmıştır. İlerleyen yıllarda teşvikler ve seri üretim gibi faktörler göz önüne alındığında üretim dışı malzemelerin maliyetlerinde değişimler olması durumunda toplam  $CO_2$  emisyon maliyeti de azalacaktır.

### 3. TLBO ALGORİTMASI

Güç akış analizinde çok sayıda optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır [9, 10, 11, 12]. Bu algoritmalarından birisi de TLBO algoritmasıdır. TLBO algoritması bir sınıftaki öğrenciler ve öğretmen arasındaki etkileşime dayanan bir sosyal tabanlı optimizasyon algoritmasıdır [13]. Öğrencilerin öğrenme kabiliyeti öğretmenin kapasitesi ile yakından ilişkilidir. Algoritmanın her safhasında başarılı öğrenciler seçilerek en iyi öğrencilerin tespiti yapılır.

TLBO algoritması sınıftaki öğrencilerin sayısı, sınıfların sayısı ve iterasyon sayısı olmak üzere üç temel parametreye sahiptir. Algoritma öğretmen ve öğrenci safhası olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

Öğretmen safhasında öğrenciler öğretmenlerinden bilgiyi taklit etmek suretiyle öğrenmektedirler. Öğretmen, öğrencilere bilgiyi vermekte ve sınıfının ortalama bilgi düzeyini artırmaya çalışmaktadır. Öğretmen sınıftaki en deneyimli ve en bilgili insandır dolayısıyla öğrenciler en fazla öğretmen kadar öğrenebilmektedirler.

Öğretmen ve öğrencilerin öğrenme kapasitesi arasında ortalama fark olarak adlandırılan ve (3) ile tanımlanan bir fark bulunmaktadır,

$$Difference\_Mean_{j,i} = r_i (X_{j,kbest,i} - T_f M_{j,i}) \quad (3)$$

Burada  $r_i$  0 ve 1 arasında bir rastgele sayı,  $X_{j,kbest,i}$  öğretmenin sonucu (en iyi sonuç) ve  $T_f$  1 ile 2 arasında alınan öğretim faktörüdür.

$T_f$ , (4)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$T_f = round[1 + rand(0,1) \{1,2\}] \quad (4)$$

Eğer ortalama fark halihazırdaki sonuçtan daha iyi ise, (3), (5)'deki gibi düzenlenir,

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + Difference\_Mean_{j,k,i} \quad (5)$$

burada  $X'_{j,k,i}$  kabul edilen en iyi sonuçtur.

Öğretmen safhasından sonra, tüm en iyi fonksiyon sonuçları öğrenci safhasında kullanılmak üzere kaydedilir.

Öğrenci safhasında, öğrenciler bilgiyi birbirleri ile tartışarak ve etkileşime girerek öğrenirler. Eğer bir öğrenci daha bilgili ise diğeri kendisini etkileşim ile günceller.

P ve Q rasgele öğrenciler olmak üzere,  $X'_{total-P,i}$  ve  $X'_{total-Q,i}$

$$X'_{total-P,i} \neq X'_{total-Q,i} \quad (6)$$

Burada  $X'_{total-P,i}$  ve  $X'_{total-Q,i}$   $X_{total-P,i}$  ve  $X_{total-Q,i}$  nin güncellenmiş sonraki değerleridir.

Eğer  $X'_{total-P,i} > X'_{total-Q,i}$  ise,  $X''_{j,P,i}$  (7)'deki gibi elde edilir.

$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i (X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}) \quad (7)$$

ve eğer  $X'_{total-Q,i} > X'_{total-P,i}$  ise  $X''_{j,P,i}$  (8)'deki gibi hesaplanır.

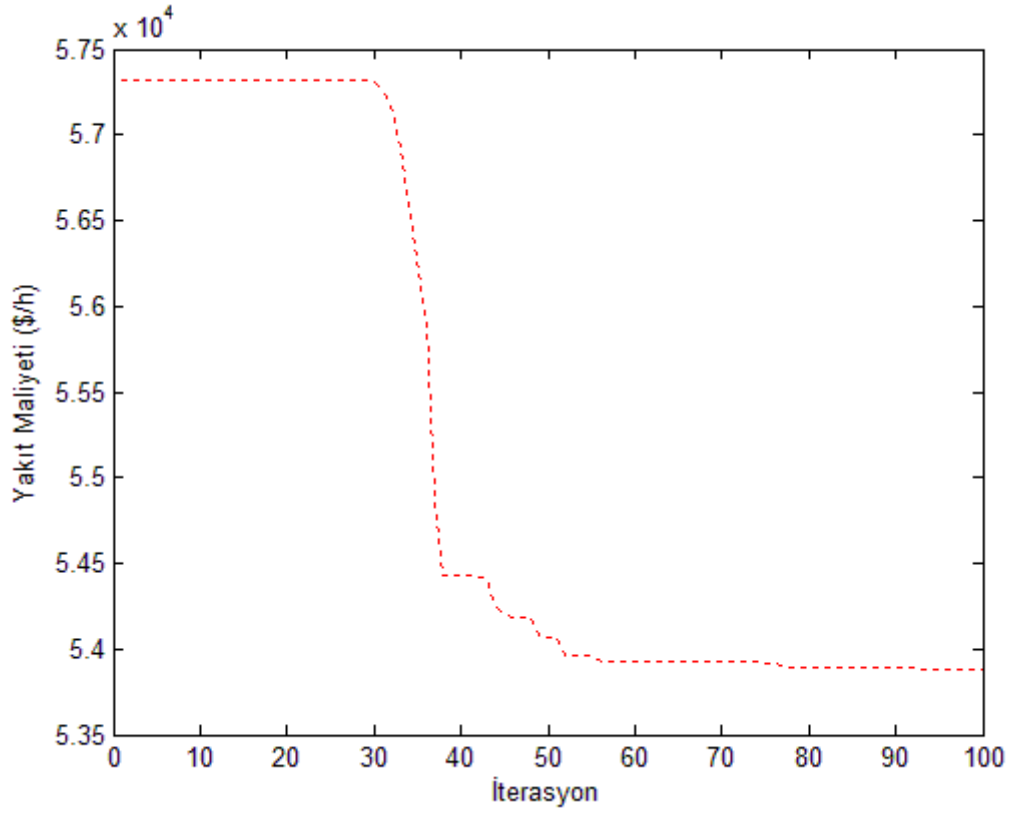
$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i (X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}) \quad (8)$$

$X''_{j,P,i}$  en iyi fonksiyon değeri olarak hesaplanmaktadır [14].

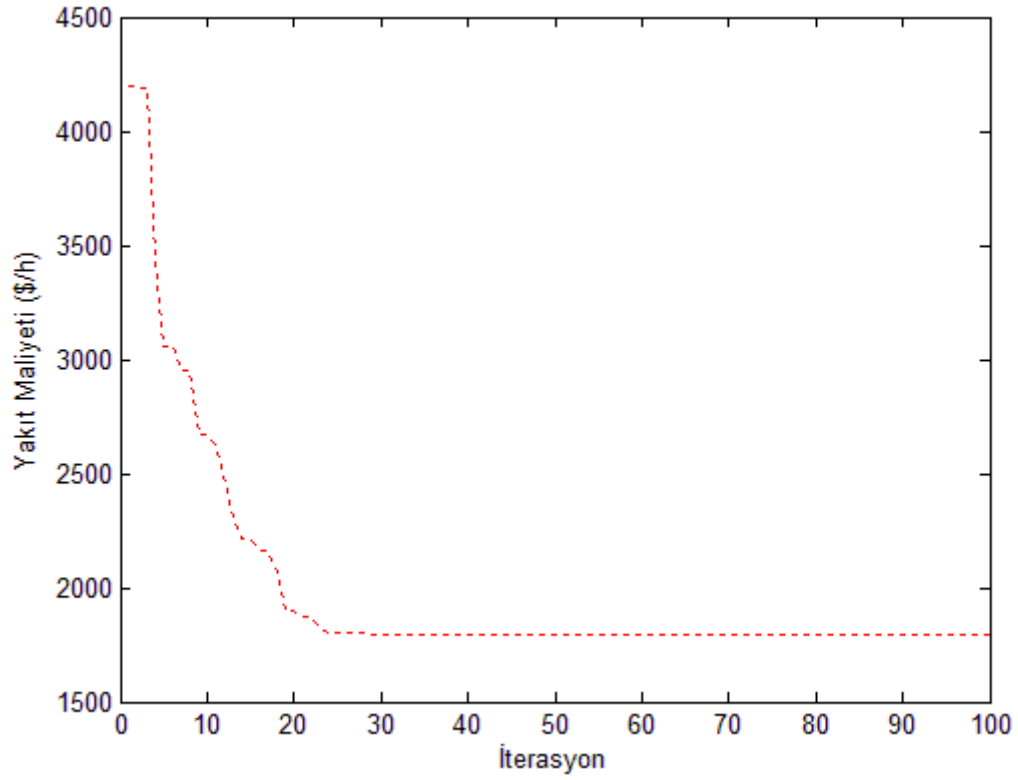
#### 4. TERMAL ENTERKONNEKTE SİSTEME GÜÇ AKIŞ ANALİZİ UYGULAMASI

8 baralı toplam olarak 7172 MW kurulu güce sahip bir termal güç sisteminin yakıt maliyeti çıkartılmıştır. Aynı sistem bara sayısının aynı olduğu rüzgâr çiftlikleri kabulü ile 2 MW'lık rüzgâr türbinleri göz önüne alınarak yeniden analiz edilmiştir. Bunun sonucunda termal ve rüzgâr baralarından oluşan sistemler için yakıt maliyeti grafikleri Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Ayrıca 7172 MWh güç değeri için emisyon miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 2 ve 3'de özetlenmiştir.

Çizelge 2'de emisyon hesabında  $CO_2$  değerleri ortalama olarak alınmıştır. Bu değerler kömür için 820 g/KWh, doğalgaz için (kombine) 490 g/KWh, rüzgâr için 11 g/KWh' dir [15, 16]. Toplam 7172 MWh için hesaplama yapılmış olup bu gücün 3902 MWh'i doğalgaz, 3270 MWh'i kömür kaynaklı olarak hesaba dâhil edilmiştir. Bu maliyetler enerji üretim maliyetleri olup inşaat gibi maliyetler hesaplama dâhil edilmemiştir.



Şekil 1. Termal kaynaklarla elde edilen yakıt maliyeti eğrisi



Şekil 2. Rüzgâr enerjisi ile elde edilen yakıt maliyeti eğrisi

**Çizelge 2.** Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin yakıt maliyeti açısından karşılaştırılması

Enerji Sistemi (7172 MW)	En İyi Yakıt Maliyeti (\$/h)
Termal Enerji Sistemi	53882,97
Rüzgâr Enerji Sistemi	1793,02
Yakıt Maliyetindeki Tasarruf	52089,95

**Çizelge 3.** Termal ve rüzgâr enerji sistemlerinin emisyon açısından karşılaştırılması [7-8]

Enerji Sistemi (7172 MW)	Emisyon Miktarı (ton)
Termal Enerji Sistemi (Kömür ve Doğalgaz)	4801.94
Rüzgâr Enerji Sistemi	78,9
Emisyon Miktarındaki Azalma	4723.04

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada aynı kurulu güç değeri için termal ve rüzgar enerjili güç sistemlerinin yakıt maliyeti ve emisyon açısından hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplamalarda rüzgâr enerjisinin neden geleneksel enerji kaynaklarından termal enerjiye göre daha uygun maliyetli ve çevreye daha az zararlı bir üretim şekli olduğu açıklanmıştır. Rüzgâr enerjisi ve rüzgârdan enerji elde etmenin avantajları ve geleneksel enerji üretim kaynaklarından yenilenebilir bir kaynak olan rüzgâr enerjisine dönüşümün gerekliliğinden bahsedilmiştir. Küresel ısınma ve artan dünya nüfusu göz önüne alındığında bu dönüşümün yapılması gerektiği hesaplamalarla ortaya konulmuştur. Rüzgar enerjisinin emisyon miktarı ve karbon maliyeti enerji üretim aşaması için diğer kaynaklara kıyasla çok düşük olmasına karşın ek maliyetler emisyon ve emisyon maliyetleri açısından rüzgar enerjisinin önünde oluşan bir sınırlama olmaktadır. Geleneksel enerji üretim kaynaklarından rüzgâr enerjisine geçişin diğer maliyetler düzenlenerek en kısa zamanda yapılması gerektiği görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Gökçınar R. E., Uyumaz A.,** 2008. Rüzgar Enerjisi Maliyetleri ve Teşvikleri VII. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008*. İstanbul s. 699-706.
- [2] **Pazheri, F.R., Othman, M.F., Malik, N.H., Al-Ammar, E.A., Rohikaa, M.R.,** 2012. Optimization of Fuel Cost and Transmission Loss in Power Dispatch with Renewable Energy and Energy Storage, *IEEE International Conference on Green Technologies, Proc. of ICGT 2012*, s. 293 – 296.
- [3] **Hetzer J., Yu C. D., Bhattarai K.,** 2008. An economic dispatch model incorporating wind power, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, s. 603-611.
- [4] **Başaran, Ü.** 2004. Türkiye'deki 380 kV'luk Enterkonnekte Güç Sisteminde Çeşitli Güç Akışı ve Ekonomik Dağıtım Analizleri, Y. Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [5] **Abeliotis K., Pactiti Despina.,** 2014. Assessment of the Environmental Impacts of a Wind Farm in Central Greece during its Life Cycle, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.4(3), s.580-585.
- [6] **Peter Lang,** A report of Cost and Quantity of Greenhouse Gas Emissions Avoided by Wind Generation, <http://docs.wind-watch.org/lang-wind-power-co2-emissions.pdf>, s. 1-14.
- [7] **Leung Dennis Y.C., Caramanna G., Valer Maroto Mercedes M.,** 2014. An Overview of Current Status of Carbondioxide Capture and Storage Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, s. 426-443.

- [8] **Kherfane N., Kherfane R.L., Younes M., Khodja F.**, 2014. Economic and Emission Dispatch with Renewable Energy Using HSA, *Energy Procedia, Proc. of TMREES14*. Vol. 50, s. 970–979.
- [9] **Arabali A., Ghofrani M., Etezadi-Amoli M.**, 2013. Cost Analysis of a Power System Using Probabilistic Optimal Power Flow with Energy Storage Integration and Wind Generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, s. 832–841.
- [10] **Mandal B., Roy K. P.**, 2013. Optimal Reactive Power Dispatch Using Quasi- Oppositional Teaching Learning Based Optimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, s. 832–841.
- [11] **Kılıç U., Ayan K.**, 2013. Optimizing Power Flow of AC-DC Power Systems Using Artificial Bee Colony Algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, s. 592-602.
- [12] **Osman M.S., Abo-Sinna M.A., Mousa A.A.**, 2004. A Solution to the Optimal Power Flow Using Genetic Algorithm, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 155(2), s. 391–405.
- [13] **Rao R.V, Patel V.** 2012. An Elitist Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm for Solving Complex Constrained Optimization Problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, s. 535-560.
- [14] **Boucekara H.E.R.H, Abido A. M, Boucherma M.**, 2014. Optimal Power Flow Using Teaching-Learning-Based Optimization Technique. *Electric Power System Research* Vol. 114, s. 49–59.
- [15] **Schlömer S., Bruckner T., Fulton L., Hertwich E., McKinnon A., Perczyk D., Roy J., Schaeffer R., Sims R., Smith P., Wiser R.**, 2014. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Editors: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 1329-1356.
- [16] **Krey V., O. Masera., Blanford G., Bruckner T., Cooke R., Fisher-Vanden K., Haberl H., Hertwich E., Kriegler E., Mueller D., Paltsev S., Price L., Schlömer S., Ürgel-Vorsatz D., Van Vuuren D., Zwickel T.**, 2014. Annex II: Metrics & Methodology. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Editors: Edenhofer, O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., Von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 1281-1328.

