**TÜRKİYE'DE BİYOETANOL ÜRETİMİ İÇİN ÖNGÖRÜ**

ÖZET

Biyoyakıtlar, fosil yakıtlara alternatif olarak artan enerji ihtiyacını karşılamak ve yüksek fosil yakıt fiyatlarına alternatif olarak giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji teknolojileri kapsamında hem ülkemiz hem de dünyada biyoyakıtlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları giderek artmaktadır. Biyorafineri teknolojilerinin bir sonucu olarak biyoyakıtların hayatımızda artarak yer alacağı öngörülmektedir. Biyorafineriler petrol rafinerilerinden farklı olarak biyoyakıtlar üretmekte ve hammadde olarak petrol yerine biyokütle kullanmaktadır. Biyorafineri ve biyoyakıt teknolojileri sürdürülebilirlik ve yeşil ekonomi açısından değerlendirildiğinde bu alanda gerçekleştirilecek öngörü ve çevresel değerlendirme çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Biyoyakıtlar üretim şekli ve hammadde türüne göre birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü kuşak biyoyakıt olarak sınıflandırılmaktadır. Günümüzde halen birinci kuşak motor biyoyakıtları olan biyodizel ve biyoetanol ticari olarak kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda tasarımda değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilecek yağ asidi metil esteri olarak tanımlanan biyodizel ile şekerli ve nişastalı kaynaklardan üretilen biyoetanol birinci nesil biyoyakıtlar içerisinde yer almaktadır.

Biyoyakıtların önemli bir türü olan biyoetanol şekerli ve nişastalı bikilerin fermantasyonu veya selülozik kaynakların asidik hidrolizi ile üretilebilen bir yakıttır. Antitoksik özelliğe sahip olan ve önemli bir alternatif motor yakıtı olan biyoetanol benzinin yerine geçerek doğrudan yakıt olarak kullanıldığı gibi yakıt katkısı olarak da kullanılabilmektedir. Biyoetanol, konvansiyonel benzinin oktan sayısını artırmada ve bununla birlikte yapısında bulunan oksijen ile benzinin daha verimli ve temiz yanmasına yardımcı olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. İthal edilen petrole önemli bir yerel alternatif olan yakıt etanolü petrol kökenli ürünlere olan bağımlılığı büyük ölçüde azaltarak ekonomik, politik, çevresel ve bilimsel alanlarda önemli konuma gelmektedir. Biyoetanolün yenilenebilir hammadde kaynaklarından elde edilmesi ve bu kaynakların da sürdürülebilirliğinin sağlanması etanol üretiminin sürdürülebilir olarak gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.

Dünya ve Türkiye'de biyoetanol kullanımına dair yürürlüğe konulan yasal düzenlemeler ile biyoetanol kullanımının yaygınlaşması ve biyorafineri üretim kapasitelerinin artması beklenmektedir. Biyorafinerilerin artan üretim miktarlarıyla doğru orantılı olarak artış gösteren hammadde gereksinimleri ve üretim proseslerinin iyileştirilmesi teknik, ekonomik, tarımsal ve enerji açısından büyük bir önem taşımaktadır. Tarımsal kökenli hammadde kullanılarak üretilen biyoetanolün yakıt alternatifi ve katkı şeklinde artan kullanımının sonucu olarak tarım sektöründeki etkisi son yıllarda dikkat çekici boyuta ulaşmıştır. Hem kaynaklar hem de üretilen etanol açısından sürdürülebilirlik politikaları göz önüne alındığında hammadde üretim ve kullanım süreci ile etanol üretim süreci üzerinde teknik ve ekonomik öngörüler ile çevresel değerlendirmelerin doğru ve etkin bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu aşamada kaynak yönetimi kavramı ön plana çıkmaktadır. Hammadde aşamasından biyoetanolün kullanımının son aşamasına kadar olan süreçteki tüm üretim ve tüketim aşamaları başta kaynak yönetimi olmak üzere yeşil ekonomi, tarımsal ekonomi ve enerji ekonomisi açısından değerlendirilmelidir. Özellikle tarımsal ekonomi ve kaynak yönetimi alanında biyoetanol ile ilgili gerçekleştirilen tüm öngörü, modelleme ve optimizasyon çalışmaları ülkelerin ve kurumların yakıt etanolü ile ilgili gelecek stratejilerini belirlemede büyük rol oynamaktadır. Biyoetanol sektöründeki gelişme ve ilerlemeler başta tarım ve enerji sektörlerini de içine alarak etanolün uzun dönemli sosyo ekonomik ve diğer ekonomik etkileri üzerine yapılan çalışmaların artmasına neden olmaktadır. Biyoetanol ile ilgili yapılan birçok ekonomik temelli çalışma, giderek genişleyen biyoetanol endüstrisinin makro ekonomik performans üzerindeki global ve ulusal etkilerinin kısmi ve genel denge modelleri gibi ekonomik teoriler, tarımsal ekonomik modeller ya da simulasyon yöntemleri kullanılarak tespit edilmesi üzerine olmaktadır. Bunun yanısıra önemli bir ekonomik girdi olan ve biyoetanolün üretim süreci ve sonrasındaki tüm ekonomik sonuçları etkileyen hammadde miktarının belirlenmesi ve bununla ilgili yapılan tüm öngörü çalışmaları için farklı öngörü yöntemleri kullanılmıştır. Kaynak yönetiminin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi ve biyoetanol üretim sürecinin sürdürülebilir olarak yapılabilmesi için öngörü çalışmaları ve modelleri büyük bir önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen öngörü çalışmaları ile yalnızca hammadde miktarının belirlenmesi değil, kaynak kullanımının tarım ve enerji sektörü ile diğer ilişkili olduğu tüm sektörlerdeki etkileri de yorumlanabilmektedir. Öngörü için kullanılan yöntemlerin her biri öngörünün doğruluk derecesine göre farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olsa da hammadde ve gıda arzını düzenlemek ile enerji üretim planlamalarını gerçekleştirmek için kullanılmaktadırlar. Bu amaçla öz bağlanımlı model, öz bağlanımlı hareketli model ortalama hareketli model, yapay sinir ağları tarımsal kaynaklı hammadde üretimi öngörüsü ile enerji kaynaklarının üretimi öngörüsü için kullanılabilir. Bu modellerin bir kısmı tek başına, farklı model ya da ilavelerle yeniden düzenlenerek biyoetanol ile ilgili farklı çalışmalar için uygun olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında biyoyakıtların önemli bir türü olan birinci nesil biyoetanolün Türkiye’deki üretimi için öngörü çalışması yapılması amaçlanmaktadır. Mevcut biyoetanol üretiminde kullanılan ve olası yeni kaynakların tarımsal üretim potansiyelleri ve gelecekteki durumu değerlendirilerek, birinci nesil biyoetanol üretimi Türkiye öngörüsü ortaya konulmuştur. Hammadde üretim değerleri üzerinde yapılan öngörünün yanısıra Türkiye yıllık benzin tüketim değerleri üzerinde de tahmin yapılarak mevcut yasal düzenlemeler ve alternatif katkı yüzdeleri doğrultusunda gerekli olabilecek biyoetanol miktarı öngörülmüştür. Çalışmada tarım, enerji teknolojileri ve düşük karbon ekonomisi üçgeninde, yapılan öngörü çalışmalarının biyoetanol üretimi politikası için yol haritası ölması hedeflenmiştir. Hammadde ve biyoetanol üretimi ile ilgili yapılan öngörülerin sonuçları incelendiğinde Türkiye'nin sürdürülebilirlik politikaları açısından tarım ülkesi olmasının da bir sonucu olarak önemli avantajlara sahip olduğu ve kaynaktan tüketimin son aşamasına kadar doğru bir biyoetanol üretim politikası ile bu kazanımların daha da artacağı görülmektedir.

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında birinci nesil biyoetanol üretiminde kullanılan hammaddeler, buğday, mısır, arpa ve şeker pancarı için lineer ve lineer olmayan modellerle yıllık potansiyel üretim arzı öngörülmüştür. Lineer model olarak öz bağlanımlı (Auto-Regressive: AR) model kullanılırken, lineer olmayan model olarak öz bağlanımlı ekzojen (Auto-Regressive eXogeneous: ARX) model, öz bağlanımlı ortalama hareketli ekzojen (Auto-Regressive Moving Average eXogeneous: ARMAX) model, özyinelemeli method (Recursive Method) ve yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks: ANN) kullanılmıştır. Bu modeller arasından özyinelemeli model öngörü yapmak için değil yalnızca model başarımlarını iyileştirmek için kullanılmıştır. Öngörünün ilk aşamasında model mertebesi belirlenmiş ve bu model mertebesi değerleri ile her bir hammadde üretim arzına ait zaman serileri modellenmiştir. Güvenilir, doğru sonuçlar veren bir model oluşturabilmek için model mertebesinin doğru tespit edilmesi gerekmektedir. Model mertebesi belirleme öz bağlanımlı model başta olmak üzere tüm modeller için en önemli aşamadır. Literatürde öz bağlanımlı modeller için olan bu tür model seçim kriterlerinin en yaygın kullanılanları ʺAkaike Bilgi Kriteriʺ (Akaike Information Criteria: AIC), ʺSchwarz Bilgi Kriteriʺ (Schwarz Information Criteria: SIC) ve ʺSon Öngörü Hatasıʺ’dır (Final Prediction Error: FPE). Tez çalışmasında AIC ve FPE kullanılarak en uygun model mertebeleri tespit edilmiştir. Öz bağlanımlı modelde buğday ve arpa yıllık üretim miktarı verileri için model mertebeleri 2 iken, mısır ve şeker pancarı için 1 olarak tespit edilmiştir. Aynı model mertebeleri karşılaştırma yapabilmek ve diğer modellerde de kullanıldığında kabul edilebilir sınırlar dahilinde modelleme sonuçları iyi olması nedenleriyle öz bağlanımlı model için bulunan model mertebeleri öz bağlanımlı ekzojen modelle öngörü yapılırken de kullanılmıştır. Öz bağlanımlı ortalama hareketli ekzojen model için ise model performansları göz önüne alınarak en uygun model mertebeleri seçilmiştir. Öz bağlanımlı ortalama hareketli ekzojen modelde buğday ve arpa için model mertebeleri {6,5} iken, mısır için {4,3} ve şeker pancarı için {3,2} olarak bulunmuştur. Öz bağlanımlı model, öz bağlanımlı ortalama hareketli ekzojen model ve öz bağlanımlı ekzojen model için belirlenen model parametreleri bu modeller özyinelemeli modelle kullanılırken de aynı değerleriyle kullanılmıştır. Yalnızca ARMAX model için özyinelemeli model kullanılırken modelin performansına göre model mertebesi kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarında da ilk aşamada giriş tabakası nod sayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Her hammadde değeri için diğer modellerle özellikle öz bağlanımlı modelle uyumlu olacak şekilde aynı mertebe seçilmiş ve buna ek olarak farklı nod sayıları da denenmiştir. Belirlenen model mertebeleri ve nod sayıları ile her hammaddeye ait veri serisi için modeller çalıştırılmış ve farklı öngörü ufku değerleri için (1, 5, 10, 15, 20 yıl gibi) performans testleri yapılmıştır. Model performanslarını değerlendirmek için en çok bilinen başarım kriterleri olan Kare kök ortalama (Root Mean Square: RMS), R-Kare (*R*2) ve Ki-Kare (Chi-Square: χ2) kullanılmıştır. *R*2 sonuçları yaklaşık olarak 1'e yakın olmuş, RMS ve χ2 ise kabul edilebilir sınırlar dahilindedir. Model performanslarının değerlendirilmesi aşamasında veri serisi ve model üzerinde etkili olan faktörler açıklanmıştır. Veri serisi kısa olduğunda bile uygulanan modelin başarımının yüksek olması bu modellerin kullanılan veri serileri için uygun olduğunu göstermektedir. Tez kapsamında kullanılan modellerde özyinelemeli model ise öngörü yapmak yerine, diğer modeller ile tahmin edilen sonuçlarıyla oluşturulan serilerin düzeltme terimleriyle düzeltilmesini gerçekleştirmektedir. Oluşturulan yeni serilerle model başarımlarını incelenmiş ve eğer başarımda küçük de olsa bir artış var ise özyinelemeli modelin kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir. Özyinelemeli model öngördüğümüz dataları gerçeğe daha yakınlaştırmak için özbağlanımlı, özbağlanımlı ekzojen ve özbağlanımlı ortalama hareketli ekzojen model için kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda öz bağlanımlı modelde tüm data serilerinde özyinelemeli model uygulanabilirken, mısır dataları için ki-kare ile özyinelemeli ortalama hareketli ekzojen modelin başarımı değerlendirildiğinde ve şeker pancarı dataları için R-kare ile özyinelemeli modelin başarımı değerlendirildiğinde beklenen artışlar sağlanamamıştır. Bu bölüm içerisinde model başarım hesaplamalarını takiben her veri serisi için farklı öngörü ufku değerleri ile öngörü yapılmış ve Türkiye'nin biyoetanol hammadde üretim değerleri ile ilgili olarak gelecekteki durumu ortaya konulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde öngörü ufku değeri arttıkça model başarımlarında olan düşüşe bağlı olarak ve modelin karakteristiği nedeniyle hammadde üretim değerleri tahminlerinde azalma görülmüştür. Bunun nedeni kullanılan modellerin bir adım sonrasını öngörmek için oluşturulan modeller olması ve daha uzun süreli öngörülerde başarımda azalma olmasıdır. Yapay sinir ağları sonuçlarındaki azalmanın daha düşük olduğu gözlenmemiştir. Hammadde üretim arzı ile ilgili yapılan çalışmaların aynıları Türkiye yıllık benzin tüketimi için de gerçekleştirilmiştir. Özbağlanımlı ve özbağlanımlı ekzojen model için model mertebesi 8 olarak belirlenirken, yapay sinir ağları için giriş tabakası nod sayısı 4 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yapay sinir ağlarıyla seçilen nod sayısı değerinde bulunan öngörü sonuçlarının değişen öngörü ufku değerlerine rağmen yakın olduğu tespit edilmiştir. Model mertebesini takiben her bir model için model performansları değerlendirilmiş ve benzin datalarının uzunluğu kısa olmasına rağmen iyi bir başarımla seçilen modellerin bu datalara uygulanabildiği tespit edilmiştir. Bunlardan sonra üretilmesi öngörülen hammadde miktarlarına bağlı olarak ton başına üretilebilecek biyoetanol miktarları hesaplanmıştır. Diğer taraftan tüketilmesi öngörülen benzin miktarı hesaplanarak bugün yasal olarak benzine katılması zorunlu olan biyoetanol yüzdesi ve diğer etanol harmanlama yüzdeleri üzerinden hesaplama yapılarak farklı öngörü ufku değerleri için gerekli olabilecek biyoetanol miktarları tespit edilmiştir. Bu iki sonuç karşılaştırılarak öngörülen biyoetanol arzının öngörülen biyoetanol gereksinimini karşılayabildiği ortaya konmuştur. Bu karşılaştırma yapılırken, her hammadde için iki farklı durum dikkate olabileceği öngörülerek her ikisi için de hesaplama yapılmıştır. İlk durumda seçilen her hammaddenin gıda, yemlik ve tohum olarak kullanma gibi öncelikli kullanım alanları dışındaki öngörülen miktarları üzerinden ton başına kaç litre biyoetanol üretilebileceği belirlenmiştir. İkinci durumda ise ilk durumdaki öncelikli alanlara ilave olarak ihracat değerleri de hesaba katılmadan üretilebilecek biyoetanol miktarları belirlenmiştir. Her model için (AR, ARX ve ANN) ayrı ayrı belirlenen bu değerler incelendiğinde benzin tüketimine bağlı olarak %1, %2, %3, %5, %10 biyoetanol harmanlaması durumundaki biyoetanol talebinin farklı öngörü ufku değerleri için (1, 5, 10, 15 yıl) karşılanabildiği görülmüştür. Öz bağlanımlı ortalama hareketli ekzojen model benzin tüketimi öngörüsü için sürdürülebilir sonuçlar vermediğinden bu model sonuçları için gerekecek biyoetanol miktarı verilmemiştir. Yapay sinir ağları kullanıldığında mısır ve şeker pancarı için iki farklı durumun yanı sıra iki farklı giriş tabakası nod sayısı değeri için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır. Ayrıca; yapay sinir ağlarıyla hesaplanan her hammaddeden elde edilebilecek biyoetanolün toplam arzdaki payının değişimi lineer olmamıştır. Türkiye'de biyoetanol üretimi ağırlıklı olarak şeker pancarı ve sonrasında mısırdan gerçekleştiriliyor olmasına karşın, biyoetanol arz grafikleri incelendiğinde buğdayın ve arpanın en büyük paylara sahip olabileceği tespit edilmiştir. Buğday için öngörülen biyoetanol arzındaki payının %70'lere kadar çıktığı tespit edilmiştir. Her iki durum için de elde edilen tüm model sonuçlarına göre gıda, tohumluk ve yem sektörlerindeki kullanımını etkilemeden, Türkiye'de üretimi yüksek seviyelerde olan bu iki hammaddenin de biyoetanol talebini karşılamada önemli bir paya sahip olacak olması ülkemiz açısından önemli bir avantajdır.

Çalışmanın son bölümünde öngörü yöntemleriyle belirlenen gelecekteki potansiyeli göz önüne alınarak biyoetanolün farklı harmanlama oranları ile (%1, %2, %3, %5, %10) benzine katkılandığında benzin tüketimine bağlı CO2 emisyonu değerleri hesaplanmıştır. Bu emisyon değerlerinin hesaplanması için üç farklı yaklaşım dikkate alınarak yakıt başına (L) yandığında oluşabilecek CO2 emisyonu değeri hesaplanmıştır. Artan biyoetanol kullanımı ve Türkiye'nin gelecekte de önemli bir biyoetanol üreticisi olacağının öngörüldüğü bu çalışmada çevreci bir yakıt olan biyoetanolün kullanımının motor yakıtı kaynaklı emisyon değerlerinde düşüş sağlayacağı öngörülmektedir. Emisyon hesaplamaları çevresel değerlendirme açısından; çalışmanın da amacı olan biyoetanol öngörüsü doğrultusunda, enerji kaynak üretimi ve düşük karbon ekonomisi perspektifinden ülkemiz için sürdürülebilir ve çevre dostu bir yakıt olduğunu göstermektedir. Öngörülerin tutarlılığı ve öngörülen arz potansiyelinin biyoetanol ihtiyacını karşılayabildiğinin ortaya konması biyoetanol üretiminin Türkiye açısından sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.