

Akıllı Şebekelerde Dinamik Enerji Fiyatlandırılması Üzerine Bir Çalışma

A Study on Dynamic Energy Pricing in Smart Grids

Zehva Yalçınöz^{*1} , Asım Kaygusuz² ¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

(zehva.yalcinoz@inonu.edu.tr, asim.kaygusuz@inonu.edu.tr)

Received:Sep.08,2022

Accepted:Sep.16,2022

Published:Oct.10,2022

Özetçe— Üreticiler ve tüketiciler arasında karşılıklı haberleşmenin sağlandığı akıllı şebekelerde (SG) talep tarafı yük yönetimi (DSLMM), yük tahmini ve bunlarla bağlantılı olan dinamik enerji fiyatlandırması günümüzde ve gelecekte büyük önem arz etmektedir. Dinamik enerji fiyatlandırması ile elde edilen sinyallerin sunucular aracılığıyla yayınlanması talep tarafı yönetim ve enerji piyasası için çok önemli bir başlıktır. Dinamik enerji fiyatlandırması tabanlı çalışmaların genelinde dağıtık üretim koşullarına rağmen enerji dengesi talep tarafı yönetim ile korunmaktadır. Enerji fiyat sinyallerinin dinamik yapıda olmasıyla ve yük tahmini ile dağıtık üretimden kaynaklanan belirsizliklere yanıt verilmektedir. Bu çalışmada talep yanıtı (DR) yöntemleri ve akıllı fiyatlandırma planları olan kullanım süresi (ToU), kritik tepe fiyatlandırması (CPP) ve gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP) ayrıntılı olarak incelenmiştir. Akıllı şebekelerde yapılan çalışmalar, avantajları, dezavantajları incelenmiş ve akıllı fiyat planları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : *Dinamik Enerji Fiyatlandırma, Dağıtık Üretim, Enerji Dengesi, ToU, CPP, RTP*

Abstract— Demand-side load management (DSLMM), load forecasting, and dynamic energy pricing are critical in smart grids (SG) where there is mutual communication between manufacturers and consumers today and in the future. The transmission of signals obtained with dynamic energy pricing via servers is a very important topic for demand management and the energy market. Despite the distributed generation conditions, the energy balance is maintained by the demand side management during dynamic studies based on energy prices. With the dynamic structure of energy price signals and load forecasting, uncertainties arising from distributed generation are responded to. This study details demand response (DR) methods and smart pricing plans such as time-of-use (ToU), critical peak price (CPP), and real-time price (RTP). Studies, advantages, and disadvantages of smart grids are examined, and smart tariff plans are compared.

Keywords : *Dynamic Energy Pricing, Distributed Generation, Energy Balance, ToU, CPP, RTP*

1. Giriş

Son yıllarda dünya genelinde enerji ihtiyacının göz ardı edilemeyecek şekilde artmasıyla ekonomik açıdan düzenlemeler zorunlu hale gelmiştir. Çünkü enerji bir toplumun kalkınması için önemli bir unsurdur. Bu sebeple çoğu ülkede ve Türkiye’de zaman içerisinde yeni reformlar yapılmış, elektrik piyasası; tüketicilerin ve özel kuruluşlarında katıldığı daha yenilikçi bir statü kazanmıştır. Böylece genel olarak enerji sektöründe büyüme başlamıştır (Arslan ve Ertuğrul, 2022; Çetintaş ve Bicil, 2015). Teknolojinin yoğun ve süratli şekilde ilerlemesi artan enerji talebine sebep olmuş ve enerji üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır (Tanrıöven vd., 2011). Enerji piyasasında ülkeler arasında enerji ticaretinin başlamasına sebep olan artan enerji ihtiyaçları ülkelerin enerji alt yapılarını güçlendirme çalışmaları için sebep oluşturmuştur (Arslan ve Ertuğrul, 2022). Enerji piyasasında 1980’li yıllarda Şili’de başlayan serbestleşme hareketinin zamanla diğer ülkelerde uygulanıp geliştirilmesiyle enerji fiyatlandırmasında yenilikçi bir yaklaşım başlamış ve bu model şeffaf olma özelliğinden dolayı başarıya ulaşmıştır. 1990 yılında ise İngiltere’nin piyasa kapsamında yaptığı özelleştirme ile enerji piyasasında büyük bir değişim yaşanmıştır (Anonim, 2022). Enerji piyasasında üretici ve tüketici topluluğu kadar sistem ve piyasa operatörleri de önemlidir. Piyasa, elektrik havuzu ve ikili anlaşmalara dayalı bir sistemle işletilmektedir. Herhangi bir ürünün satışında olduğu gibi elektrik piyasasında da alıcılar en düşük fiyattan ürünü satın almak isterken üreticiler bu ürünü en yüksek fiyattan satıp kar sağlamak isterler. Tek taraflı havuz sisteminde tüketim veya alım miktarına

bakılmaksızın piyasa operatörleri tarafından tahmini talep verileri gönderilirken, iki taraflı havuz sisteminde talep edilen enerji miktarına göre işlem yapılmaktadır. Havuz 24 saatlik talep verilerini karşılamaya dayalı esas ile çalışmakta olup bu durum üreticiler arasında rekabet ortamı oluşturmaktadır. Bir havuz; gün öncesi, günlük ve gerçek zamanlı olarak çalışabildiğinden enerji fiyatları buna göre değişim gösterebilir. İkili anlaşmalara dayanan model ise üretici ve tüketici arasında elektrik fiyatı, enerji miktarı ve ticaret zamanına dayanan bir sistemdir (Onaiwu, 2010).

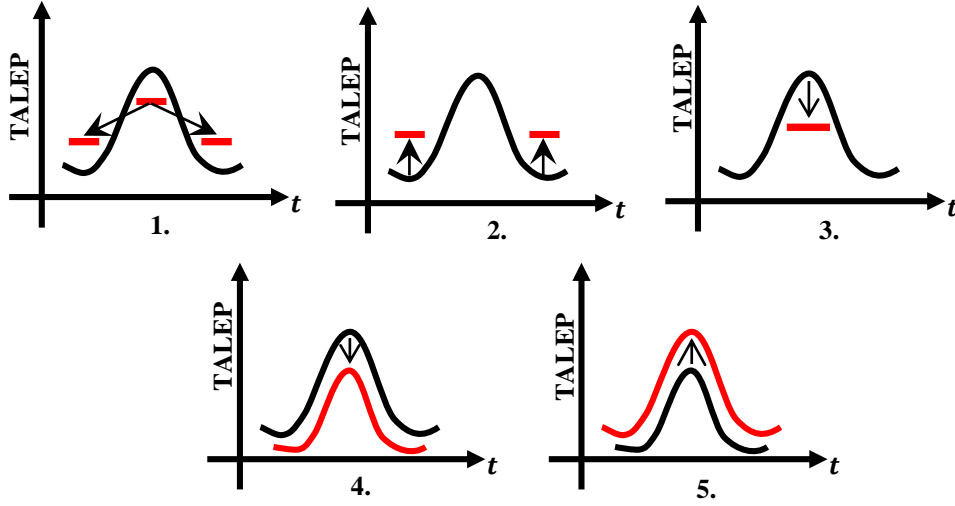
Nüfus çoğalması ile enerjiye olan ilgi ve talebin her geçen gün artması, fosil kaynakların tükenme riskini gündeme getirmektedir (Alagoz vd., 2013; Khan vd., 2016). Mevcut durumda bulunan fosil kaynakların çevresel zararları ve günden güne azalması ile gelecekte oluşacak yetersiz enerji durumu göz önüne alınarak, kaynak kullanımı optimize edilmeli, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmalı, kaynak yönetimi mevzuu gündeme getirilmelidir. Mevcut durumda kullanılan geleneksel şebekelerde kullanıcılar (tedarikçi, tüketici ve dağıtıcı) arasında bilgi akışını sağlayan teknoloji yoktur (Khan vd., 2016). Bu sebeple enerji piyasası üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla birlikte bilgi akışının sağlanması amacıyla SG konusu gündeme gelmiştir (Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). SG, bünyesinde bulunan bilgi teknolojileri ve akıllı sayaç uygulamaları ile enerji yönetiminde aktif rol oynayacaktır. Enerji piyasası katılımcıları arasında enerji alışverişine imkan sağlayan ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (Renewable Energy Sources, RES) sisteme dahil edilmesine olanak tanıyan akıllı şebekeler ağ içinde kalite, hız, kontrol yöntemleri ve verimlilik gibi kavramları birleştirmesinden dolayı elektrik şebekeleri ve onun tüm teknolojileri için kaçınılmaz bir eğilimdir (Sun vd., 2011). Şebekelerin verimli olmasını sağlayan ana unsur enerjinin arzından başlayıp tüketime kadar olan süreçte son kullanıcıya kadar kayıpsız ulaşmasıdır (Khattak vd., 2020).

SG temel hedefleri arasında olan RES 'in sisteme entegrasyonu ve fazla olan üretimin depolanması ile yüksek enerji talebi zamanında enerji yetersizliğinin önüne geçilmiş olacaktır (Khan vd., 2016; Yan vd., 2018). DR eylemleri olarak adlandırılan bu yöntemin temel amaçları enerjide verimi sağlamak, en iyi sistem yönetimini otonom bir şekilde ayarlamak, çevresel zararları en aza indirmektir. DSLM araçlarının bir parçası olan dinamik fiyatlandırma şemalarının temel amacı tüketim planını oluşturmak, tüketici kullanımlarını, optimize etmek ve yoğun olmayan zamanlara kaydırmak, üretimden kaynaklı maliyetleri en uygun hale getirmektir. Enerji piyasasının önemli bir unsuru olan enerji fiyatlarının en uygun şekilde hesaplanması ve iletim, dağıtım ve çeşitli vergilerin tüketici grubuna adil bir şekilde yansıtılması önemli araştırma konusudur (Zeng vd., 2008)

Bu çalışmada dinamik fiyat planları olan CPP, ToU ve RTP üzerine kısa bir araştırma yapılmıştır. Mevcut çalışmalar incelenmiş ve fiyata dayalı bu programların avantaj ve dezavantajları incelenmiştir. Sonuç olarak hangi programın tüketici tarafında daha aktif ve verimli olduğu belirtilmiş ve gelecek hakkında görüşler bildirilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısımları şu şekilde planlanmıştır. 2. kısımda DSLM ve araçları incelenmiş, avantajları üzerinde görüşler bildirilmiştir. 3. kısımda DR hakkında bilgiler verilmiştir. 4. kısımda akıllı fiyatlandırma programları ayrıntılı şekilde anlatılmış, kendi aralarında bir kıyaslama yapılmıştır. Son bölümde genel olarak sonuçlar verilmiş ve hangi fiyata dayalı talep yanıtı programının tüketici tarafında daha verimli olduğu tartışılmıştır.

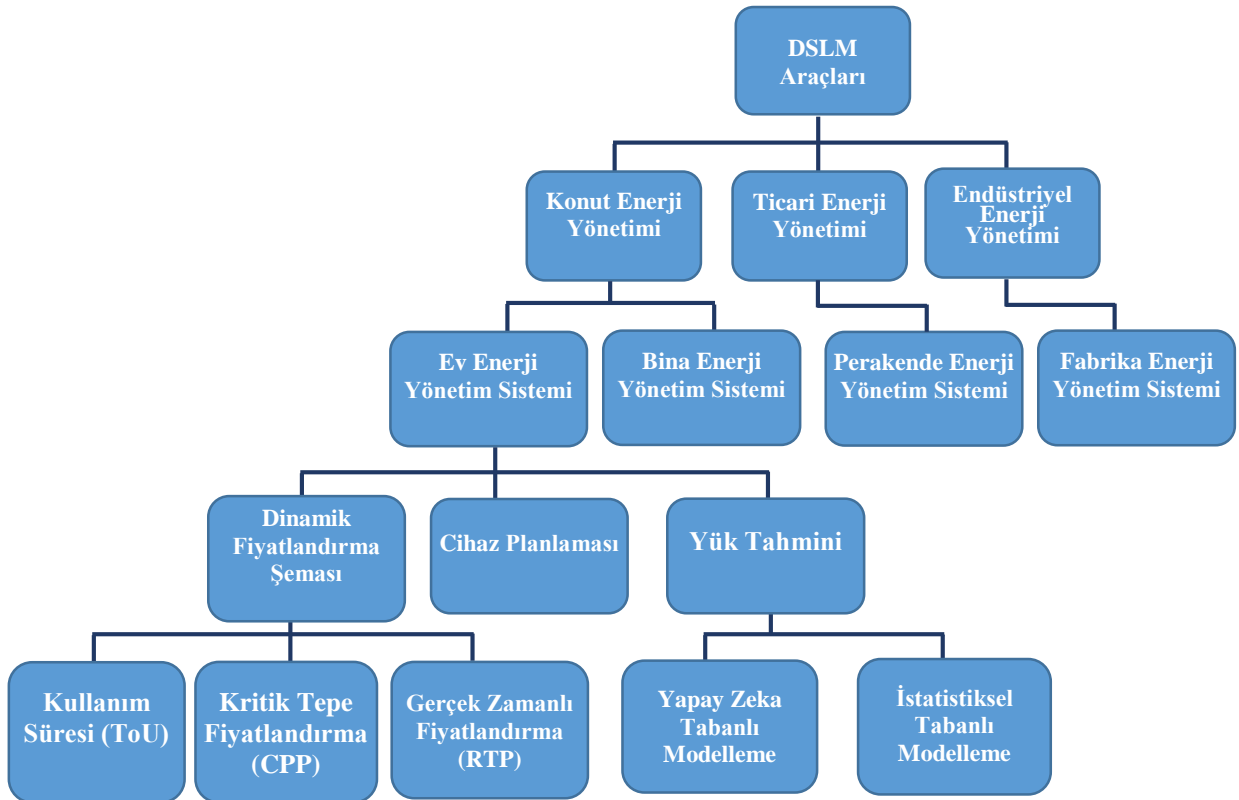
2. DSLM

DSLM enerjinin tüketici kısmında sistemi daha iyi yapmak adına gerçekleştirilen birtakım işlemlerdir (Palensky ve Dietrich, 2011). DSLM güç şebekelerinde enerjide verimi sağlamaktadır. DSLM ile tüketiciler enerji fiyatının yüksek olduğu yoğun tüketim zamanlarında enerji yönetimi ile tüketimlerini istedikleri hedef doğrultusunda değiştirebilir ve kontrol altına alabilir (Khan vd., 2016). Tüketiciler şebekede belirli işlemler yaparak şebekeye fayda sağlayabilirler. Bu işlemler genel olarak yük kaydırma, vadi doldurma, tepe kesme, stratejik yük büyütme, yük tasarrufudur ve Şekil 1 de ayrıntılı olarak verilmiştir (Gellings, 1985; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021; Zehir ve Bağrıyanık, 2013).



Şekil 1. DSLM Stratejileri, 1. Yük Kayması, 2. Vadi Doldurma, 3. Tepe Kesme, 4. Talep Tasarrufu, 5. Talep Büyümesi

DSLİM araçlarının tüketici tarafındaki 3 önemli unsuru; dinamik fiyatlandırma, yük tahmini ve cihaz planlamasıdır. DSLİM şeması Şekil 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir (Khan vd., 2016). DSLİM ile enerji arz ve talep dengesi sağlanmakta olup, tüketim planlanarak enerji fiyatlarının düşmesine, tepe yükünün ve dolayısıyla maliyetin azalmasına sebep olarak verim sağlanmaktadır (Akçin vd., 2013).



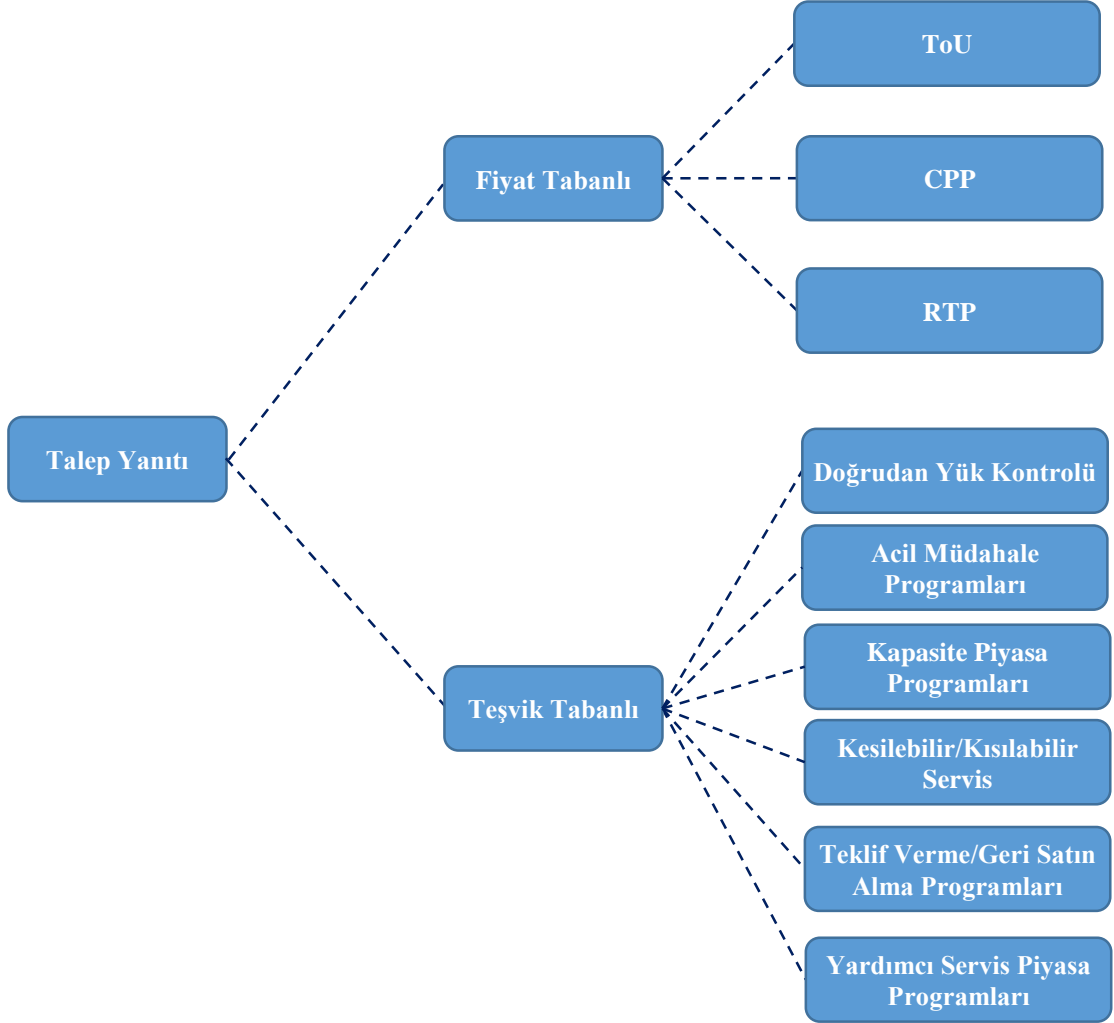
Şekil 2. DSLİM Araçları

DSLİM’nin faydaları ve gelecek için avantajları sırasıyla aşağıda verilmiştir (Khan vd., 2016):

- Üretimdeki belirsizlikler azalmaktadır,
- İşletme verimliliğini artırmaktadır (iletim ve dağıtım üzerine yapılan iyileştirmeler ile),
- RES’e sahip sistemlerde arz ve talep dengesini sağlamaktadır.

3. DR

DR tüketicilerin enerji taleplerini ve yüklerini azaltmak anlamına gelmektedir. Bu sebeple tüketicileri bu zamana kadar alıştıkları enerji tüketim modellerini değiştirmeyi amaçlar (Huang vd., 2019; Nazar vd., 2012). Üretimde olan belirsizlik ve tüketimde talep dalgalanmalarının üstesinden gelmek adına önemli bir araç olan DR, tüketicilerin enerji tüketimlerini farklı periyotlara aktarmak ve kritik tepe yükünü azaltmak için elektrik fiyat sinyallerini kullanmaktadır. Böylece tüketim davranışları gözle görülür ölçüde, değişen fiyat sinyallerine göre düzenlenmektedir (Huang vd., 2019). DR fiyat ve teşvik tabanlı olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Fiyata dayalı talep yanıtı, dinamik fiyat tarifeleri olup bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenmiştir ve genel olarak elektrik fiyatlarına bağlı olarak tüketicilerin elektriği hangi zamanda kullanmak istediklerine olanak tanır. Elektrik fiyatını kontrol sinyali olarak kullanarak tüketicilerin fiyat sinyallerine göre tüketimlerini değiştirmelerini amaçlar (Yan vd., 2018). Teşvik tabanlı talep yanıtı ise elektrik piyasasının geliştirilmesi için birtakım işlemleri kapsamaktadır. Doğrudan yük kontrolü, talep teklifi ile geri satın alma gibi işlemleri içerir (Khan vd., 2016; Nazar vd., 2012). Konu ile ilgili ayrıntılı çalışmalar verilen referansta ayrıca incelenebilir (Huang vd., 2019). DR; manuel, yarı otomatik ve tam otomatik olmak üzere 3 ayrı yolla gerçekleştirilir. Manuel talep yanıtında tüketiciler enerji tüketimlerini ve cihaz kontrollerini farklı zaman dilimlerine kaydırmasıyla gerçekleştirilir. Yarı otomatik talep yanıtı daha önceden programlanan ve kontrolünün merkezi bir sistem tarafından başlatılıp tüketici eliyle devam eden talep yanıtıdır. Tam otomatik talep yanıtı haberleşme sinyalleri aracılığıyla, insan müdahalesinin olmadığı talep yanıt sistemidir. Şekil 3'te DR kategorilere ayrılmış ve tam liste olarak sunulmuştur (Yan vd., 2018).



Şekil 3. DR Kategorileri

4. Enerji Fiyat Tarifeleri ve Dinamik Fiyat Şemaları

Statik ve dinamik fiyatlandırma olarak iki gruba ayrılan bu tarifeler içerisinde talep yoğunluğuna göre, statik enerji fiyatlandırması fiyatı sabit tutarken, dinamik enerji fiyatlandırmasında enerji fiyatı tepe yüküne göre değişiklik göstermektedir (Dutta ve Mitra, 2017). Yeni şebeke alt yapısına göre daha geleneksel olan enerji fiyat tarifeleri 3 kısımda incelenmektedir. Bunlar tek zamanlı tarife, 3 zamanlı tarife ve dinamik fiyat tarifesidir. Fiyata dayalı talep yanıtı, DR programının bir parçası olup, enerji fiyatını fiyat sinyalleri ile kontrol etmektedir. Bu tür sinyaller ile sistemi kontrol etmekte ki temel amaç tepe yükünü ya azaltmak ya da yoğun olmayan saatlere kaydırmaktır. Fiyata dayalı talep yanıtı en başta yüksek enerji maliyetleri daha fazla enerji tüketim fiyatına denk geleceği için üretim hizmetleri firmalarında kullanılmaktadır. Akıllı sayaç uygulamalarının kullanılması ile tüketim verileri, gerçek zamanlı olarak saatlik hatta dakikalık olarak izlenebilecektir. Literatürde olan fiyata dayalı talep yanıtı programları sırasıyla; gerçek zamanlı fiyatlandırma (RTP), Kritik tepe fiyatlandırması (CPP) ve kullanım süresi (ToU) 'dur (Yan vd., 2018). Şekil 2'de de gösterildiği gibi dinamik fiyatlandırma ev yönetim sisteminde ve DSLM içerisinde aktif role sahiptir (Chakraborty vd., 2014). DR programları ile enerji tüketimlerini yönetebilen tüketiciler hem arz ve talebi dengeler hem de enerji üretim aşamasında enerji maliyetleri düşebilir (Keleş, 2017; Yan vd., 2018).

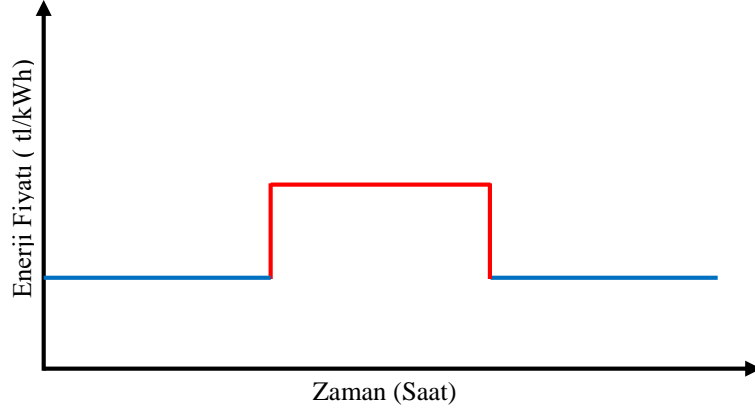
4.1. Fiyata Dayalı Talep Yanıt Programları

Kilowatt saat (kWh) başına belli bir tutara karşılık gelen, enerjinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarından kaynaklı sabit tutar ve çalışma bedellerini kapsayan maliyetler ile tüketicilerin elektrik kullanımları faturayı belirlemektedir. Üretim aşamasından kaynaklanan maliyetlerin de belli bir miktarda eklenmesiyle tüketicilerin kWh başına tükettikleri enerji belli bir ücrete denk gelmektedir. Bu maliyetler tarife olarak bilinmektedir (Khan vd., 2016). Bu tarifeler genel olarak basit tarife, sabit oranlı tarife, blok oranlı tarife, iki parçalı tarife, maksimum talep tarifesi ve güç faktörü tarifesidir (Khan vd., 2016; Mehta ve Mehta, 2005). Bu tarifeler gelişen teknoloji ve dağıtık üretimin hayatımıza girmesiyle fiyatlandırma kapsamında eksik kalmaktadır. Bu sebeplerle akıllı fiyatlandırma programları mevcut durumda eksiklikleri tamamlamak üzere geliştirilmiştir. Bu fiyatlandırma planları Şekil 2 ve Şekil 3 ile verildiği gibi RTP, CPP ve ToU olmak üzere 3 kısma ayrılmaktadır. DSLM araçları içerisinde olan bu fiyatlandırma planları DSLM için önemli role sahiptir. DR, değişen fiyat doğrultusunda tüketicilerin enerji tüketimlerini değiştirmeye yarayan bir mekanizmadır (Chakraborty vd., 2014). DR sayesinde kontrol altına alınan tüketimlerle enerji fiyatlarında düşme gözlemlenebilir (Yan vd., 2018) ve DR elektriğin hangi zamanda kullanılacağını tüketicilerin tercihine bırakmaktadır. Akıllı fiyatlandırma planları sayesinde yük kontrol altına alınıp, SG uygulamalarında kullanışlı ve verimli olacaktır.

4.1.1. ToU

Elektriğin belirli zaman dilimlerinde kullanılması durumunda fiyatlandırma tarifesi olarak farklı fiyat seviyeleri sunan akıllı fiyatlandırma planıdır. Elektrik kullanımını 3 ayrı döneme ayırarak fiyatı düşürmeyi amaçlar. ToU Şekil 4'te gösterildiği gibi enerjinin kullanıldığı zaman diliminde fiyatı sabit tutmaktadır (Gyamfi vd., 2013). Yoğun saat dilimlerinde tüketilen elektriğin kWh başına ücreti yoğun olmayan saatlerdeki tüketime göre daha fazla olmaktadır. Bu sebeple enerji kullanımı yoğun olmayan saatlere kaydırılmalı ve enerji fiyatı düşürülmelidir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya teşvik eden bu akıllı fiyatlandırma programı ile tüketiciler yoğun saatlerdeki tüketimlerini yoğun olmayan saatlere kaydırıp, kendi üretimlerinden gelen enerjiyi yoğun olan saatlerde sisteme satabilirler. Böylece hem kar sağlarlar hem de kendi tüketimlerini azaltarak enerji fiyatlarını düşürebilirler (Jose ve Pahwa, 2010). ToU akıllı fiyat programı kapsamında zaman dilimlerinin yoğunluklarına bağlı olarak oluşturulan fiyatlar aylar öncesinden belirlenir. Tüketiciler için avantaj sağlayan bu durumda kullanıcılar enerji tüketimlerini önceden planlamaktadırlar (Khan vd., 2016). Bu akıllı fiyatlandırma planı diğer fiyatlandırma planlarına göre tüketiciyi yormamaktadır. Bunun başlıca sebebi diğer planlarda saatlik değişen fiyat sistemine göre tüketicilerin her an tüketimlerini, planlamak ve fiyata göre ayarlamak durumunda kalmasından dolayıdır (Shao ve Zhang, 2010).

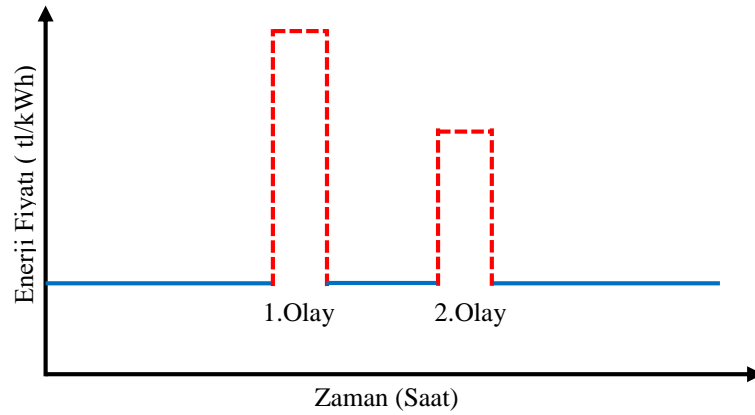
ToU dinamik fiyatlandırma kapsamında birçok çalışma yapılmıştır. Yan ve diğ. (2015), gerçek zamanlı olarak konut üzerine yaptıkları bu çalışmalarıyla ToU fiyatlandırma şeması kullanarak tepe kayması gerçekleştirmişlerdir. Talep yanıtı ve tahmini talep yapılandırma modülü üzerinde yapılan çalışmada 3 ayrı gerçek zamanlı fiyat oluşturulmakta ve tüketicilere talep yanıtlarıyla birlikte gönderilmektedir. Buna göre tüketiciler elektrik tüketimlerini gönderilen fiyat sinyallerine göre değiştirmektedirler (Yan vd., 2015). Bir diğer çalışma ile ToU fiyat tarifesiyle tepe yük kayması elde edilmiştir (Xu vd., 2015). Diğer çalışmayla Çin'de talep yanıt programlarının her zaman faydalı olup arz ve talep üzerinde denge kuracağı savunulmuştur (Wang vd., 2010). ToU fiyatlandırma ile geliştirilen kontrol algoritması ile elektrik harcamalarının en aza indirilmesi hedeflenmiş olup referansta belirtilmiştir (Pallonetto vd., 2016).



Şekil 4. ToU

4.1.2. CPP

ToU akıllı fiyat planlanmasının yapısına benzer olup, yıl içerisinde enerji talebine bakılarak belirli zaman dilimlerinde (soğuk kış ayları ve sıcak yaz günleri) tüketimin yoğun olduğu zamanları göstermektedir. CPP de fiyatlandırma tarifeleri yüksek miktardaki ücret aralığına sahip olup belirli dönemleri kapsamaktadır (Gyamfi vd., 2013). Belirli dönemlerde uygulanan CPP ile, tüketiciler ya tepe yük değerini azaltır ya da tüketimlerini yoğun olmayan zaman dilimlerine kaydırır. Sistem günlük olarak değişmez ve belli dönemleri kapsadığından dolayı CPP akıllı fiyatlandırma programı bir günlük talep yanıtından oluşmaz (Yan vd., 2018). ToU tarifesinde en yüksek miktarın (enerji üretim maliyeti) aşıldığı durumlarda fark edilemediğinden tüketici topluluğuna günlük tarifedeki en yüksek değerdeki ToU fiyat tarifesi uygulanmaktadır (Khan vd., 2016). Bu durumda üretim yapan hizmet grubu büyük zararlara uğramaktadır. CPP tarifesi ToU tarifesinin bu eksik ve kritik zamanında devreye girmektedir. ToU tarifesine süre ve fiyat aralığının değişimi dışında benzerdir. Bu farklılık Şekil 5’de gösterildiği gibi olup çizgili alanlar fiyat bölgesinin yatay ve dikey yönde sistem durumuna göre değişebileceğini göstermektedir. CPP tarifeleri genel olarak en yüksek enerji talebini düşürmek amacıyla kullanılmaktadır (Gyamfi vd., 2013; Khan vd., 2016). CPP fiyat tarifesi genellikle kritik günün bir gün öncesinden duyurularak, tüketicinin tüketimlerini düzenlemeyi amaçlar. Tüketici pik tepe seviyesindeki enerji taleplerini, bir gün öncesinden ilan edilen CPP fiyatlarına bağlı olarak yoğun olmayan zamana erteleyebilir. Böylece tepe kısımlarında çok fazla miktarda fiyata mal olan enerji fiyatı azaltılmış olacaktır. CPP ilanı yıl içinde birkaç defa olabileceğinden ToU fiyatlandırmaya göre tüketiciyi biraz daha yorsa da aslında her iki kullanımda da tüketici fiyatları yük ötelemeye azalmış olacaktır (Park vd., 2015). Genel olarak CPP de uygulanan değerler ToU fiyat planına göre daha yüksektir (Yan vd., 2018).



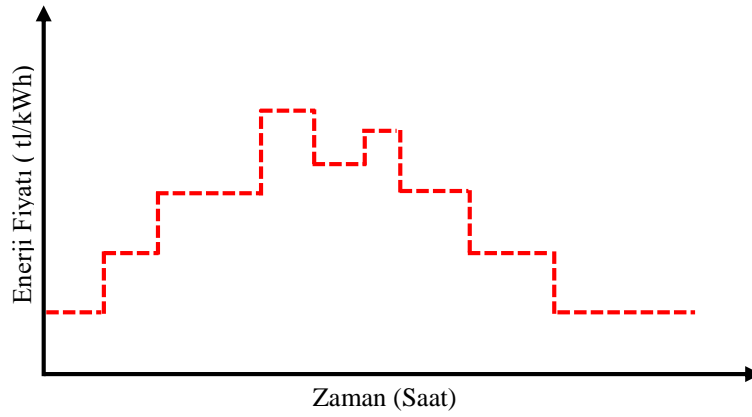
Şekil 5. CPP

CPP ile yapılan bir çalışmada rüzgar enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılması ve kar sağlanması amacıyla model oluşturularak DR programlarının gelecekte kullanım alanlarının artması tavsiye edilmiştir (Cui vd., 2015). Bir başka çalışmada talep fiyat esnekliği matrisi ile kritik ve kritik olmayan CPP zamanlarının belirlenmesiyle, CPP şemaları oluşturulmuş ve karşılaştırmalı sonuçları elde edilmiştir (Zhang vd., 2009). Herter ve Wayland (2010), 2004 yılı temmuz-eylül arasında birçok konutu kullanarak iki farklı fiyat seviyesiyle regresyona dayalı olarak yaptıkları yaklaşımla CPP etkilerini incelemiş ve talep yanıtının daha çok, düşük fiyat seviyesinde olduğunu belirtmişlerdir (Herter ve Wayland, 2010). Bir diğer çalışma Tayland genelinde en uygun üretim maliyetleri dikkate alınarak en uygun CPP şemasını belirlemek üzerine optimizasyon yöntemleri kullanılarak yapılmıştır ve CPP programının tepe fiyatı ve kritik günde tüketici ve üreticiler için önemli olduğunu belirtmişlerdir (Boonchuy

vd., 2017). Bir başka çalışma enerji talebinin kontrolünü sağlamak amacıyla CPP programını incelemektedir. CPP programının tüketici davranışlarına etkisi incelenmiş ve yüksek fiyat karşısında tüketicilerin tüketimlerini azaltma eylemlerinden bahsetmiştir (Kii vd., 2014).

4.1.3. RTP

Enerji üretimi sırasında oluşan maliyeti en doğru şekilde tüketime yansıtabilen akıllı fiyatlandırma programı olan RTP, saatlik ve gün öncesi fiyatlandırma olmak üzere iki yolla gerçekleştirilmektedir. RTP enerji toptan fiyatı üzerinden değişime uğramaktadır (Yan vd., 2018). Çeşitli deneyler ile bazı ülkelerde denenmiş olan RTP uygulamalarının fiyatta esneklik oluşturduğu görülmektedir (Khan vd., 2016). Şekil 6'da belirtildiği gibi zamana göre değişkenlik gösteren fiyat, noktalı gösterimden anlaşılmaktadır (Gyamfi vd., 2013). Saatlik uygulanan RTP planında her saat başı açıklanan fiyat listeleri mevcutken, gün öncesi planına göre tepe yükü ve talep tahmini yapılarak enerji fiyatı bir gün öncesinden paylaşılmaktadır. Gün öncesi fiyat şeması tüketimin anlık değişmesi ve tüketicilerin tüketim şemalarını oluşturmaları için RTP planı içerisinde daha etkin olmaktadır (Khan vd., 2016). RTP planı günlük kullanımlara göre enerji fiyatını diğer fiyatlandırma programlarına (ToU ve CTP) göre daha iyi yansıtılmaktadır. RTP toptan satış fiyatlarını son tüketiciye kadar iletmektedir (Palensky ve Dietrich, 2011). RTP planı en verimli fiyatlandırma şeması olup, gereksiz üretimi azaltacağı için üretim maliyetlerini azaltmaktadır. Tüketicilerin kendi tüketimlerini ayarlayıp enerji tüketimlerini doğru planlamasına olanak tanıyan RTP, ayrıca kontrol sistemlerinin otomatik katılımlarıyla enerji talebini optimize etmektedir (Khan vd., 2016).



Şekil 6. RTP

Genel olarak RTP üzerine yapılan çalışmalar diğer çalışmalara benzer olarak tüketici davranışları değiştirmek ve kar sağlamak üzerine olmuştur. Bir çalışmada elektriği toptan ya da perakende olarak satın alan iki tüketici grubu üzerinde etkisi incelenen RTP fiyat programının faydaları üzerinde durulmuştur ve tedarik fonksiyon modeli kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. RTP fiyat programının bir grup tüketicilerin refah seviyelerini artırdığını diğer grubun ise RTP programından uzak durduğunu belirten çalışma genel olarak RTP'nin gelecek vaat ettiğini belirtmiştir (Boom ve Schwenen, 2021). Bir başka çalışmada, dağıtık üretimin belirsiz üretim koşullarına yönelik sabit oranlı fiyatlandırma ve RTP üzerine yapılarak ikisi arasında geçiş yapan kullanıcıların avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir (Pahle vd., 2016). Diğer bir çalışma arz, talep ve fiyat durumları için gerçek zamanlı analiz ile güç sistemlerinin kararlılık analizini incelemektedir (Roosbehani vd., 2012). Gerçek zamanlı fiyatlandırma birçok çalışmada kontrol teknikleri kullanılarak çalışılmıştır (Alagoz vd., 2013, 2013; Alagoz ve Kaygusuz, 2016; Alagöz ve Kaygusuz, 2014; Kaygusuz, 2019; Yalçınöz ve Kaygusuz, 2021). Bu çalışmalarda genel olarak kontrolörler tarafından sağlanan fiyat sinyali ile anlık üretim ve tüketim denge noktasına getirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan kontrolör, fiyat sinyali sağlayarak arz ve talep arasındaki farktan kaynaklanan kontrol hata fonksiyonu sinyalini 0'a yaklaştırmaya çalışmıştır. Bir başka çalışmada RTP modelleri ile DR kazanımları sağlanarak gerçek zamanlı modeller oluşturulmuştur (Danxi vd., 2017; Duan, 2016). Bir diğer çalışma RES kullanımı ile anti-yırtıcı parçacık sürü optimizasyonu kullanarak gerçek zamanlı fiyat yöntemi sunmakta ve aynı zamanda parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak karşılaştırmalı sonuç ilişkisi vermektedir (Anand ve Ramasubbu, 2018). Gerçek zamanlı enerji fiyat modelleri için talep tarafı yönetim üzerine algoritma geliştirilen bir başka çalışmada gerçek zamanlı fiyatlandırma modellerinin kullanılabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır (Song ve Qu, 2014). Bir başka çalışmada akıllı sayaçtan alınan bilgilerin enerji piyasasından alınan veriler ile önceden yapılan fiyat tahminlerini yapay sinir ağı modelleri oluşturularak düzeltmeye çalışmışlardır (Datta ve Datta, 2016).

Verilen genel bilgiler ve çalışmalar doğrultusunda RTP, CPP ve ToU fiyatlandırma programları üzerine yapılan çalışmaların genel hatlarıyla tüketici alışkanlıklarını değiştirmeyi sağlayarak fiyat üzerinde değişiklik yapmaya çalıştığı görülmektedir. Çoğu çalışmada tüketicilerin alışkanlıklarını yoğun olmayan saatlere kaydırmalarıyla tepe yükünde ve dolayısıyla enerji fiyatında düşüşlerin olduğu görülmektedir. Tablo 1’de genel olarak fiyata dayalı talep yanıt programlarının avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir.

Tablo 1. Fiyata Dayalı Talep Yanıt Programlarının Karşılaştırmalı Sonuçları

	Avantaj	Dezavantaj
ToU	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tüketici ve üreticiler için takip edilmesi ve uygulanması kolaydır. ✓ Günlük katılım oranı istikrarlı ve yüksektir. ✓ Yoğun saatlerde enerji talebini azaltır. ✓ Tüketim yorgunluğuna sebep olmaz. ✓ Dönemlere ayrılan fiyat uygulamasında kendi içerisinde fiyatta istikrar vardır ve bu fiyat kendi dönem içerisinde değişmez. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tüketicilerin tüketimlerini anlık olarak değiştirmelerinden dolayı yoğun olmayan saatlerde talep artışı gösterir.
CPP	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Takip edilmesi kolaydır. ✓ Tepe yük değerinin değiştirilmesinde etkindir. ✓ Olay odaklı tarife sistemi olmasından dolayı tüketici katılımı yüksektir. ✓ CPP değerleri gün öncesinden tüketicilere iletilir ve olayların çözümünü hızlandırır. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ CPP de uygulanan tepe değeri diğer akıllı fiyatlandırma programlarına kıyasla daha yüksektir. ✓ Enerji verimi sağlamada, üretim maliyetlerini düşürmede, karbon emisyonunu azaltmada etkili değildir. ✓ Günlük olarak uygulanmaz.
RTP	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Enerji verimliliği sağlar. ✓ Tüketici topluluğu kendini RTP programına ve aşamalarına adapte olursa çok iyi yanıt verir. ✓ Enerji üretim maliyetlerini diğer fiyata dayalı talep yanıt programlarına göre daha iyi yansıtmaktadır. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sürekli değişen enerji fiyatlarından dolayı tüketici yorgunluğu oluşturmaktadır. ✓ Hâlihazır sistem üzerinden akıllı sayaç uygulamaları olmadan ilk başta uygulamak zordur. Yeterli donanım desteği olmak zorundadır.

5. Sonuçlar

Dinamik fiyatlandırma programları olan RTP, CPP ve ToU, DSLM planlarının uygulanmasında hem tüketicilere hem de üreticilere fayda sağlamaktadır. Bu çalışmada DSLM, DR ve dinamik fiyatlandırma şemalarının ayrıntılı bir şekilde incelemesi verilmiştir. Dinamik fiyatlandırmanın tüketicilerin değişken taleplerine karşılık olarak değişken fiyat sergilediği görülmüştür. Dinamik fiyat şemaları arasında en verimli planın RTP

olduğu görülmüştür. CPP ve ToU'nun kendi uygulama alanlarındaki faydaları ayrıca belirtilmiştir. Tablo 1'de çalışmaların genel sonucu olarak fiyata dayalı talep yanıt programlarının avantaj ve dezavantajları kısaca anlatılmıştır (Yan vd., 2018).

ToU fiyatlandırma planı her dönem aynı fiyatları koruduğundan dolayı tüketicilerin fiyat değişimlerini takip etmeleri ve tüketimlerini planlamaları diğer iki fiyata dayalı talep yanıt programına göre daha kolay ve kullanışlıdır. Diğer fiyata dayalı talep yanıt programlarına kıyasla günlük katılım daha yüksek olmaktadır. ToU fiyat programında kendi avantajı bir süre sonra dezavantajına dönüşmektedir. Bunun sebebi yoğun saatlerde tüketicilerin yoğun olmayan saatlere yüklerini kaydırmasıyla yoğun olmayan saatlerde talepte pik oluşmakta ve bu durumda belli dönemlerde fiyat artışına sebep olmaktadır. Tüketim planlanması tüketici tarafında yapılarak olası enerji kesintilerinin önüne geçilebilir. CPP akıllı fiyatlandırma programı genellikle olay odaklı zamanlara dayanması sebebiyle günlük olarak uygulanmamaktadır. CPP diğer akıllı fiyatlandırma programlarıyla birlikte uygulanmaktadır. RTP diğer uygulamalara nazaran arz ve talep esnekliğini elektrik fiyatlarına daha doğru şekilde yansıtılmaktadır. Yayınlanan dinamik fiyat sinyallerine göre tüketiciler duruma kendilerini adapte edebilir. Fakat sürekli değişen sinyallere tüketicilerin anlık cevap vermeleri talep yorgunluğuna sebep olmaktadır. Otomasyon ve anlık gözlemlerle birleştirilen RTP sinyalleri ile üreticiler, operatörler ve tüketiciler diğer akıllı fiyatlandırma programlarına göre daha fayda göreceklerdir. Elde edilen sonuçlar eşliğinde eğer gerekli altyapı sağlanır ve kullanıcılara gerekli eğitim verilebilirse enerji fiyatlarının düşeceği tahmin edilmektedir. Akıllı sayaç uygulamalarıyla elde edilebilecek çift yönlü bilgi teknolojisinin sağlanmasıyla DR sistemi ve uygulamaları gelecek zaman içerisinde enerji piyasasında önemli yere sahip olacağı söylenebilir. Bu konular üzerine olan gerekli eğitimlerin kullanıcı topluluğuna verilmesi gerekmektedir.

Kaynakça

- Akçin, M., Alagöz, B. B., Keleş, C., Karabiber, A., ve Kaygusuz, A. (2013). Dağıtık kontrol ile akıllı şebekelerde geniş-alan yönetimi ve geleceğe dönük projeksiyonlar Wide-area management of smart grid by distributed control and near future projections. *Sakarya üniversitesi fen bilimleri dergisi*, 17(3), 457–470.
- Alagoz, B. B., ve Kaygusuz, A. (2016). Dynamic energy pricing by closed-loop fractional-order PI control system and energy balancing in smart grid energy markets. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38(5), 565–578. <https://doi.org/10.1177/0142331215579949>
- Alagöz, B. B., ve Kaygusuz, A. (2014). Kapalı Çevrim Kesir Dereceli PI Kontrolör ile Dinamik Enerji Fiyatı Kontrolü ve Akıllı Şebekelerde Otomatik Enerji Arz- Talep Dengelemesi Uygulaması. *TOK, Kocaeli*, 535–539.
- Alagoz, B. B., Kaygusuz, A., Akcin, M., ve Alagoz, S. (2013). A closed-loop energy price controlling method for real-time energy balancing in a smart grid energy market. *Energy*, 59, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.074>
- Anand, H., ve Ramasubbu, R. (2018). A real time pricing strategy for remote micro-grid with economic emission dispatch and stochastic renewable energy sources. *Renewable Energy*, 127, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.016>
- Anonim. (2022). *Elektrik piyasası*. Vikipedi. [https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_piyasası#:~:text=Her elektrik piyasasının faaliy et alanı,pazarlar ulusal sınırların ötesine geçebilir](https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_piyasası#:~:text=Her%20elektrik%20piyasasının%20faaliyet%20alanı,pazarlar%20ulusal%20sınırların%20ötesine%20geçebilir)
- Arslan, B., ve Ertuğrul, İ. (2022). Çoklu regresyon, arıma ve yapay sinir ağı yöntemleri ile türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 20(1), 331–353. <https://doi.org/10.11611/yead.988146>
- Boom, A., ve Schwenen, S. (2021). Is real-time pricing smart for consumers? *Journal of Regulatory Economics*, 60(2), 193–213. <https://doi.org/10.1007/s11149-021-09440-5>
- Boonchuay, K., Optimization, B., ve Peak, C. (2017). Optimal Critical Peak Pricing Scheme with Consideration of Marginal Generation Cost. *2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 226–229.
- Çetintaş, H., ve Bicil, İ. M. (2015). Elektrik piyasalarında yeniden yapılanma ve türkiye elektrik piyasasında yapısal dönüşüm. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 2(2), 1–15.
- Chakraborty, S., Ito, T., ve Senjyu, T. (2014). Smart pricing scheme: A multi-layered scoring rule application. *Expert Systems With Applications*, 41(8), 3726–3735. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.12.002>
- Cui, Q., Wang, X., Liu, C., ve Hou, F. (2015). Decision model of critical peak pricing coordinating wind power generation. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 775–779.

- Danxi, L., Bo, Z., Yan, Q., ve Yu-jie, X. (2017). Optimal Control Model of Electric Vehicle Demand Response Based on Real - time Electricity Price. *EEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 1815–1818.
- Datta, A. R., ve Datta, S. (2016). Electricity Market Price-spike Classification in the Smart Grid. *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5.
- Duan, Q. (2016). A Price-Based Demand Response Scheduling Model in Day-Ahead Electricity Market. *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5.
- Dutta, G., ve Mitra, K. (2017). A literature review on dynamic pricing of electricity. *Journal of the Operational Research Society*, 68(10), 1131–1145. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0149-4>
- Gellings, C. W. (1985). The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, 73(10), 1468–1470.
- Gyamfi, S., Krundieck, S., ve Urmee, T. (2013). Residential peak electricity demand response—Highlights of some behavioural issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.006>
- Herter, K., ve Wayland, S. (2010). Residential response to critical-peak pricing of electricity : California evidence. *Energy*, 35(4), 1561–1567. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.022>
- Huang, W., Zhang, N., Kang, C., Li, M., ve Huo, M. (2019). From demand response to integrated demand response : review and prospect of research and application. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 4(1), 1–13.
- Jose, A. A., ve Pahwa, A. (2010). Economic evaluation of small wind generation ownership under different electricity pricing scenarios. *North American Power Symposium 2010*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2010.5618946>
- Kaygusuz, A. (2019). Closed loop elastic demand control by dynamic energy pricing in smart grids. *Energy*, 176, 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.036>
- Keleş, C. (2017). *Akıllı Şebekelerde Yenilenebilir Enerji Üretimine Sahip Akıllı Evlerin Enerji Ve Yük Yönetimi*. (Doktora Tezi) , İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Khan, A. R., Mahmood, A., Safdar, A., Khan, Z. A., ve Khan, N. A. (2016). Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1311–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.117>
- Khattak, H. A., Tehreem, K., Almogren, A., Ameer, Z., Din, I. U., ve Adnan, M. (2020). Dynamic pricing in industrial internet of things : Blockchain application for energy management in smart cities. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2020.102615>
- Kii, M., Sakamoto, K., Hangai, Y., ve Doi, K. (2014). The effects of critical peak pricing for electricity demand management on home-based trip generation. *IATSS Research*, 37(2), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2013.12.001>
- Mehta, V. K., ve Mehta, R. (2005). *Principles of Power System: Including Generation, Transmission, Distribution, Switchgear and Protection: for BE/B. Tech*. S. Chand Publishing.
- Nazar, N. S. M., Abdullah, M. . P., Hassan, M. Y., ve Hussin, F. (2012). Time-based electricity pricing for Demand Response implementation in monopolized electricity market. *IEEE Student Conference on Research and Development*, 178–181.
- Onaiwu, E. (2010). How Does Bilateral Trading Differ From Electricity Pooling? *University of Dundee*, 3–6.
- Pahle, M., Schill, W., Gambardella, C., ve Tietjen, O. (2016). Renewable Energy Support , Negative Prices , and Real-time. *Energy*, 37, 147–170.
- Palensky, P., ve Dietrich, D. (2011). Demand Side Management : Demand Response , Intelligent Energy Systems , and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388.
- Pallonetto, F., Oxizidis, S., Milano, F., ve Finn, D. (2016). The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling. *Energy & Buildings*, 128, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.041>
- Park, S. C., Jin, Y. G., Song, H. Y., ve Yoon, Y. T. (2015). Designing a critical peak pricing scheme for the profit maximization objective considering price responsiveness of customers. *Energy*, 83, 521–531.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.057>

- Roozbehani, M., Dahleh, M. A., ve Mitter, S. K. (2012). Volatility of Power Grids Under Real-Time Pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 1926–1940.
- Shao, S., ve Zhang, T. (2010). Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration. *IEEE PES T&D 2010*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484336>
- Song, X., ve Qu, J. (2014). An improved real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid. *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2509–2513.
- Sun, Q., Ge, X., Liu, L., Xu, X., Zhang, Y., Niu, R., ve Zeng, Y. (2011). Review of smart grid comprehensive assessment systems. *Energy Procedia*, 12, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.031>
- Tanrıöven, K., Yararbaş, S., ve Cengiz, H. (2011). Geleceğin Elektrik Dağıtım Şebekesi Smart Grid. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu 2011*, 52–55.
- Wang, J., Bloyd, C. N., Hu, Z., ve Tan, Z. (2010). Demand response in China. *Energy*, 35(4), 1592–1597. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.020>
- Xu, F. Y., Zhang, T., Lai, L. L., ve Zhou, H. (2015). Shifting Boundary for price-based residential demand response and applications. *Applied Energy*, 146, 353–370. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.001>
- Yalçınöz, Z., ve Kaygusuz, A. (2021). Dynamic price control using pole placement method in smart grids. *Computer Science*, 411–421. <https://doi.org/10.53070/bbd.982884>
- Yan, X., Ozturk, Y., Hu, Z., ve Song, Y. (2018). A review on price-driven residential demand response. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.003>
- Yan, X., Wright, D., Kumar, S., Lee, G., ve Ozturk, Y. (2015). Real-Time Residential Time-of-Use Pricing: A Closed-Loop Consumers Feedback Approach. *Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference*, 132–138. <https://doi.org/10.1109/GREENTECH.2015.19>
- Zehir, M. A., ve Bağrıyanık, M. (2013). Akıllı şebekelerde gelişmiş yerel talep yönetimi. *V. Enerji verimliliği ve kalitesi sempozyumu*, 14–18.
- Zeng, S., Li, J., ve Ren, Y. (2008). Research of Time-of-Use Electricity Pricing Models in China : A Survey. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2191–2195. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2008.4738260>
- Zhang, Q., Wang, X., ve Fu, M. (2009). Optimal Implementation Strategies for Critical Peak Pricing. *International Conference on the European Energy Market*, 1–6.