



**Trakya Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

Cilt: 14

Sayı: 1

Haziran

2013

**TRAKYA
UNIVERSITY
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES**

Volume: 14

Number: 1

June

2013

Trakya Univ J Eng Sci

<http://jes.trakya.edu.tr>
e-mail: tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147 0308

**Trakya Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi**

Cilt: 14

Sayı: 1

Haziran

2013

**Trakya University
Journal of Engineering Sciences**

Volume: 14

Number: 1

June

2013

Trakya Univ J Eng Sci

<http://jes.trakya.edu.tr>
e-mail: tujes@trakya.edu.tr

ISSN 2147 0308

Dergi Sahibi / Owner

Trakya Üniversitesi Rektörlüğü
Fen Bilimleri Enstitüsü Adına
On behalf of Trakya University Rectorship, Graduate
School of Natural and Applied Sciences
Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN

Editör / Editor

Yrd. Doç. Dr. Altan MESUT

Yardımcı Editör / Associate Editor

Yrd. Doç. Dr. Deniz AĞIRSEVEN

Dergi Yayın Kurulu / Editorial Board

Başkan / Chairman

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN

Üyeler / Members

Yrd. Doç. Dr. Altan MESUT
Yrd. Doç. Dr. Deniz AĞIRSEVEN
Prof. Dr. Taner TIMARCI
Yrd. Doç. Dr. Derya ARDA
Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan ERDEM

Dizgi / Design

Taylan ŞAHİNBAŞ, taylansahinbas@hotmail.com
Yrd. Doç. Dr. Altan MESUT, altanmesut@trakya.edu.tr

Yazışma Adresi / Correspondence Address

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Binası, Balkan Yerleşkesi – 22030 Edirne / TÜRKİYE
E-mail: tujes@trakya.edu.tr
Tel: +90 284 2358230
Fax: +90 284 2358237

Baskı / Publisher

Trakya Üniversitesi Matbaa Tesisleri / Trakya University Publishing Centre

Trakya University Journal of Engineering Sciences

Danışma Kurulu / Advisory Board

Ahmet PINARBAŞI, Çukurova Üniversitesi, **ADANA**

Asım KURTOĞLU, Royal Institute of Technol, **SWEDEN**

Ayşegül AKDOĞAN EKER, Yıldız Teknik Üniversitesi, **İSTANBUL**

Burhan ÇUHADAROĞLU, Karadeniz Teknik Üniversitesi, **TRABZON**

Bülent DOYUM, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, **ANKARA**

Erhan AKIN, Fırat Üniversitesi, **ELAZIĞ**

Erhan COŞKUN, Karadeniz Teknik Üniversitesi, **TRABZON**

Fahri YAVUZ, Atatürk Üniversitesi, **ERZURUM**

H. Avni CİNEMRE, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, **SAMSUN**

İsmail H. TAVMAN, Dokuz Eylül Üniversitesi, **İZMİR**

Kadir KIRKKÖPRÜ, İstanbul Teknik Üniversitesi, **İSTANBUL**

Kai CHENG, Brunel University, Uxbridge, **West London, UK**

Mehmet Baki KARAMIŞ, Erciyes Üniversitesi, **KAYSERİ**

Mehmet BOZOĞLU, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, **SAMSUN**

Mehmet KOPAÇ, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, **ZONGULDAK**

Nadia ERDOĞAN, İstanbul Teknik Üniversitesi, **İSTANBUL**

Narayana BALASUBRAMANIAN, Center for the Study of Science, **Bangalore, INDIA**

Şazuman SAZAK, Trakya Üniversitesi, **EDİRNE**

Tülay YILDIRIM, Yıldız Teknik Üniversitesi, **İSTANBUL**

Türkan Göksal ÖZBALTA, Ege Üniversitesi, **İZMİR**

Visvalingam BALASUBRAMANIAN, Annamalai University, **CEMAJOR, Nagar, INDIA**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Organik Güneş Pilleri

Erdi AKMAN, Seçkin AKIN, Gamze KARANFİL, Savaş SÖNMEZOĞLU **1-30**

Boya Duyarlı Güneş Pilleri

Emre ÜNVER, Gamze KARANFİL, Seçkin AKIN, Savaş SÖNMEZOĞLU **31-58**

Tekirdağ İli Devlet Yollarında Aşırı Dingil Yüklerinin İncelenmesi

Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI **59-70**

Türkçe İçin Bilgi Tabanlı Yaklaşımla Kelime Anlamı Belirginleştiren Bir Uygulama

Özlem AYDIN **71-86**

Tel Çekme İşleminde Redüksiyon Oranının Akma ve Çekme Mukavemeti Üzerine Etkileri

Cem S. ÇETİNARSLAN, Serhan Karaman GENÇ, Ali GÜZEY **87-97**

ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ

Erdi AKMAN^{1,2}, Seçkin AKIN², Gamze KARANFİL³, Savaş SÖNMEZOĞLU^{1,2,*}

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Karaman

²Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Karaman

³Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Karaman

(*İletişim e-mail: svssonmezoglu@kmu.edu.tr)

ÖZET

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik aygıtların en önemlisi güneş pilleridir. Günümüze kadar güneş pillerinin üretim teknolojilerinde büyük ilerlemeler sağlanmış, kullanılan malzemenin kalınlığı ve maliyetinin düşürülmesi yönünde araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Güneş enerjisinden elde edilen verim güneş pilini oluşturan malzemenin cinsine, miktarına, elde edilme yöntemine ve birçok fiziksel/kimyasal parametreye bağlı olarak değişmektedir. Üretilen güneş pilinin ticari bir anlam kazanabilmesi için bir diğer önemli kriter ise elde edilme maliyetidir. İmal edilen güneş pillerinde elde edilen verim onun üretim maliyetini karşılama gerektirmektedir. Anorganik güneş pillerinin kullanımı yıllara göre artmasına rağmen üretim ve hammadde maliyetlerinin oldukça yüksek olması sebebiyle, bu artış istenilen ivmeyi kazanamamıştır. Bu maliyet dezavantajını azaltabilmek için, güneş pillerinin yapısında kullanılan maliyeti yüksek anorganik maddeler yerine, daha ucuz olan organik madde kullanımına doğru bir yöneliş vardır. Dolayısıyla da çalışmalar organik güneş pillerine doğru yoğun bir araştırma başlatılmasını sağlamıştır. Bu çalışmada çevreye duyarlı, üretim maliyeti düşük, yeni nesil organik güneş pillerinin detaylı olarak incelenmesi ve diğer güneş pili türleriyle maliyet, yöntem, çalışma prensibi ve ekolojik açıdan karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Güneş enerjisi, Güneş pili çeşitleri
Organik güneş pilleri

ABSTRACT

Solar cells are the most important of photovoltaic devices that converts solar energy into electrical energy directly. Until now, great progresses have been achieved in producing technologies of solar cells, research and development studies were carried out to reduce the cost and thickness of the used material. The efficiency obtained from solar energy depends on the type of materials forming the solar cell, its amount, producing method, and many physical/chemical parameters. Another important criterion is the acquisition cost of produced solar cells in order to gain a sense of commercial. The obtained efficiency of produced solar cells is required to meet the cost of its production. Despite the use of inorganic solar cells increases over the years, this increase was unable to obtain the desired acceleration due to the very high production and raw material costs. In order to decrease this cost disadvantage, an orientation towards the use of cheaper organic materials instead of the high cost inorganic materials used in the structure of solar cells. Therefore, these studies provide an intensive research towards the organic solar cells. In this study, a detailed investigation of environmentally friendly, low production cost of new generation organic solar cells and comparison with other types of solar cell in terms of the cost, method, working principle and ecology are aimed.

Keywords: Renewable energy sources, Solar energy, Solar cell types, Organic solar cells

1. GİRİŞ

Bugün artık enerji üretiminde küresel ısınmanın ve çevre kirliliğinin önlenmesi için yenilenebilir ve temiz enerji üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kaynaklar arasında önemli bir yere sahip olan güneş enerjisinden elde edilen elektrik tamamen yenilenebilir, çevreci ve sonsuz bir enerji kaynağı olup kullanım alanı çok geniştir. Öyle ki, şebeke elektriğinden istifade ile çalıştırılan tüm cihazlar ve sistemler daha ekonomik ve temiz olan bu enerji ile çalıştırılabilir. Bu anlamda yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, çözülmeye çalışılan enerji problemi için büyük ve önemli bir potansiyel sunmaktadır. Güneş enerjisi; tükenme olasılığının az olması, tehlikesiz olması, çevre sorunlarına neden olmaması, temiz ve güvenilir olması gibi nedenlerle gittikçe daha çok önem kazanmaktadır. Güneş enerjisinin bir diğer özelliği ise hiçbir ulaştırma harcaması olmaksızın her yerde sağlanabilmesidir. Güneş tüm dünya ülkelerinin yararlanabileceği bir enerji kaynağı olduğundan ülkelerin enerji açısından bağımlılıklarını da ortadan kaldıracaktır. Dünyada varlığı bilinen tüm klasik enerji kaynaklarının sağladığı enerjinin tamamından daha fazla miktardaki enerji, dünya yüzeyine güneş ışığı şeklinde gelmektedir. Hem ısınma hem de elektrik sağlayan bu enerji, dünyanın yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık 15.000 katına eşdeğerdir (Ültanır, 1996; Şen, 2002; Fischer & Pigneri, 2011).

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışan, üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşturan aygıtlardır. Temel olarak, yarıiletken bir diyot gibi çalışan güneş pilleri ile enerji kazanımı için güneş pili alanı ve pilin kalitesi, ışığın pile geldiği açı, havanın nem oranı, güneş pilinin kurulduğu coğrafi konum oldukça önemli faktörlerdir.

Güneş enerjisini kullanıma sokacak teknolojiler her geçen gün daha verimli ve ulaşılabilir hale gelmektedir. Günümüzde bu hususta, bilimsel olarak yapılan çalışmalar, anorganik ve organik bazlı olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Silikon içerikli olan güneş pilleri anorganik, organik içerikli olan güneş pilleri ise organik güneş pilleri olarak adlandırılır. Anorganik güneş pilleri maliyetinin yüksek olması, güneş pili yapımında kullanılan malzemelerin rezerv sıkıntısının olması, doğaya ve canlı yaşamına zarar veriyor olması gibi dezavantajları sebebiyle bilim dünyası maliyet olarak daha ucuz olmaları ve daha kolay uygulanabiliyor olması açısından organik güneş pillerine yönelmişlerdir. Bu son derece çekici iki özelliğine rağmen günümüzde organik güneş pillerinde, uygulama aşamasına

geçilememiştir. Çünkü hava ile kolayca oksitleniyor olması ve güneş ışığını enerjiye dönüştürme yüzdesinin (~%10), silikon bazlı güneş pillerine kıyasla çok daha düşük olmasıdır (Küpeli, 2005; Guerra ve diğ., 2010).

2. GÜNEŞ PİLLERİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Fotovoltaik hücreler yeni bir teknoloji olarak kabul edilse de tarihsel gelişimi 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır. Fotovoltaik etki ilk olarak 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel'in elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemesiyle keşfedilmiştir (Prevenslik, 2003). Becquerel'in bu araştırması, metal halojenür tuzu içeren bir çözelti içerisine iki platin elektrotun daldırılarak akım üretilmesi esasına dayanan fotoğrafının keşfi ile ivme kazanmıştır.

1876 yılında G. W. Adams ve R. E. Day tarafından selenyum (Se) kristallerinde fotovoltaik olayın gözlemlenmesiyle katı maddelerin de fotovoltaik etki oluşturabileceği kanıtlanmıştır (Smith, 1873). 1883 yılında ise Charles Fritts selenyum (Se) çok ince bir altın tabakasıyla kaplayarak %1,1 verime sahip ilk ciddi fotovoltaik hücreyi üretmiştir. İlerleyen yıllarda fotovoltaik etkiler bakır-bakır oksit (Cu-CuO) ince film yapılarında da gözlenmiştir (Würfel, 2005).

Fotovoltaik etki ile ilgili en kapsamlı teorik çalışma ise 1904'te Albert Einstein tarafından yapılmış ve bu teorik çalışma ile Einstein 1921 yılında Nobel ödülünün sahibi olmuştur. Einstein'in bu teorik açıklaması, 1916 yılında Robert Millikan tarafından denenmiş ve 1932 yılında Cd-Se yapısında fotovoltaik etkinin gözlendiği açıklanmıştır.

1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından ilk silikon fotovoltaik hücre yapılmış ve bu hücrelerde önceki fotovoltaik hücrelerden 6 kat yüksek olan ve fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen %6 verim elde edilmiştir (Würfel, 2005). Bu tarihi izleyen araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Silisyum esaslı fotovoltaik hücrelerden elektrik üretiminin ilk teknik uygulaması ise 1958 yılında Amerikan Vanguard uydusunda yapılmıştır. Uydunun kanatlarına bağlanan panellerden elde edilen elektrik enerjisi uydunun haberleşme, kontrol ve kumanda sistemlerinin enerjisinin sağlanmasında kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda silikon fotovoltaik hücreler uzay uygulamalarında geniş çapta kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de bu sistemler uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı hala sürdürmektedir. Uzay

çalışmalarında kullanımı fotovoltaiik hücre teknolojisinin çok hızlı gelişmesini sağlamış ve daha 1960'ların başında verimleri %15'lere ulaşmıştır.

Amerika, Avrupa ve Japonya'da 1973'teki yılındaki "Petrol Krizini" izleyen yıllarda büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik çalışmalar 1954'lerde başlamıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristal tabanlı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan bunlara alternatif olmak üzere çok daha az yarıiletken malzemeye ihtiyaç duyulan ve dolayısıyla çok daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara ve daha sonra organik malzemelerle yapılan organik fotovoltaiik hücre çalışmalarına hız verilmiştir.

1985 yılında verimleri artık %20'yi aşan yüksek verimli silikon güneş pilleri üretildi. 1980'lerden sonra yeni bir yöntem olan çift eklemli GaAs katkılı güneş hücrelerinin verimi %22'ye, üç eklemli tandem güneş pillerinin verimleri ise %24'lere ulaşmıştır (Ishibashi, 1985).

İlk organik güneş pili ise 1986 yılında Tang ve ark. tarafından Kodak firmasında üretilmiştir (Tang, 1986). Güneşten gelen enerji ile oluşan elektron-boşluk çiftinin ayrımı sadece katmanların arayüzünde gerçekleştiği için %1 verime sahip olan iki katmanlı bu organik güneş pillerinin keşfinden sonra organik güneş pili araştırmaları adım adım ilerlemiştir.

1995 yılında Yu ve arkadaşları İndiyum Kalay Oksit(ITO) üzerine hazırladıkları ince filmleri poly(2-methoxy-5-(2'ethyl-hexyloxy)-1,4 phenylene vinylene) malzemesi kullanarak organik güneş pillerini üretmişlerdir. Ürettikleri güneş pilinde verimi yaklaşık olarak %2,9 olarak bulmuşlar ve ayrıca pilin açık devre voltajının 0,68 V'dan 0,82 V'a değiştiğini görmüşlerdir (Yu ve diğ., 1995).

2000'li yılların başlarında Alan McDiarmid, Alan Heeger ve Hideki Shirakawa adlı bilim adamlarının iletken polimerleri keşfinden sonra yarıiletken konjuge polimerlerin kullanıldığı organik güneş pili araştırmaları bilim dünyasının bu konu üzerine daha çok yoğunlaşmasına neden olmuştur (Macdiarmid ve diğ., 1977).

Yine 2000'li yıllarda yapılan başka bir çalışmada ise Takahashi ve arkadaşları, farklı organik malzemeler deneyerek güç dönüşümünü yaklaşık olarak %3,51 olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca kuantum alanında kısa devre akımını %42,8 açık devre voltajını 0,34 V, doluluk faktörünü (FF) ise 0,51 olarak hesaplamışlardır. Bu sonuçlarla, üç tabakalı Al/PV/HD/MC/Au yapısının iyi bir güneş pili özelliği gösterdiğini tespit etmişlerdir (Takahashi ve diğ., 2000).

Yakimov ve Forrest tarafından 2002 yılında yapılan araştırmada, AM 1.5 güneş ışığının spektral şiddeti altında perylenetettracarboxylic malzemesi kullanarak tek ve iki katlı organik güneş pili üretmişlerdir. Üretilen tek katlı güneş pilinde verimin %1,1, iki katlı güneş pillerinde ise yaklaşık olarak %2.5 olarak ayrıca elde edilen güneş pilinde açık devre voltajını da 0,93 V olarak hesaplamışlardır (Yakimov & Forrest, 2002).

Drechsel ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada, organik tabanlı tek ve çift katlı güneş pillerini üretmişlerdir. Elde edilen güneş pillerinde tek katlı güneş pilinde güç dönüşümünü %2,1, çift katlı güneş pillerinde ise verimi %3,8 olarak bulmuşlardır. Bunun yanında yüklerin büyük çoğunluğunun arayüzeyde kolayca yeniden birleştiğini(rekombinasyon) tespit etmişlerdir. Ayrıca çift katmanlı güneş pillerinin gelecekte organik güneş pillerinin verimin artması için umut ışığı olduğunu ifade etmişlerdir (Drechsel ve diğ., 2005).

Lungenschmied ve arkadaşları 2007 yılında esnek yüzeylere kaplanabilen uzun ömürlü, geniş kullanım alanlarına sahip poly(3,4-ethylenedioxythiophene malzemesini poly(styrenesulfonate) malzemesi ile katkılıyarak AM 1.5 güneş ışığının spektral şiddeti altında organik güneş pillerini üretmişlerdir. Elde ettikleri güneş pillerinde güç dönüşümünü %1,5 ve doluluk faktörünü 0,29 olarak bulmuşlardır (Lungenschmied ve diğ., 2007).

Kuwabara ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları çalışmada bir tarafı ITO diğer tarafı ise altın ITO/poly(3-hexylthiophene)/poly(3,4-ethylenedioxylenethiophene):poly(4-styrene sulfonic acid)/Au şeklinde yapıda 1 cm² alana sahip organik güneş pilini oluşturmuşlardır. Elde ettikleri güneş pili analiz sonuçlarında, açık devre voltajını 0,52 V olarak doluluk faktörü 0,38 ve verimi ise %2,47 olarak bulmuşlardır (Kuwabara ve diğ., 2008).

2009 yılında Kim ve arkadaşları, vakum ortamında ITO üzerine hazırladıkları ince filmlerde, soğurmanın yaklaşık %80 olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sonra yapılan organik tabanlı P3HT/PCBM hacim heteroeklem güneş pillerinde açık devre voltajını 0,45 V olarak güç dönüşümünü ise %1,35 olarak bulmuşlardır (Kim ve diğ., 2009).

Yakın geçmişte organik malzemelerin çeşitli özellikleri değiştirilerek organik güneş pillerinin verimi yavaşta olsa artmaktadır. Hala yetersiz kalsalar da, farklı organik malzemeler kullanılarak üretilmiş güç dönüşüm verimi arttırılmaya çalışılmaktadır. Son zamanlarda organik fotovoltatik hücrelerde literatürde kaydedilen en yüksek verimlerden biri By Yongye Liang ve arkadaşları tarafından thienol[3,4-b]thiophene ve benzodiphiophene malzemelerini kullanarak yaptıkları çalışmada (laboratuvar ortamında) %7.4 olarak ölçülmüştür (Liang ve diğ., 2010).

2012 yılına geldiğimizde ise Amerika’lı yarıiletken malzeme üretim şirketi olan Polyera, organik tabanlı güneş pilinde polimer malzeme (PEDOT-PSS) kullanarak laboratuvar ortamında verimi %9.1 olarak bulduklarını duyurmuştur (www.renewablesinternational.net).

2012 yılındaki bir diğer rekor ise Alman güneş enerjisi teknoloji şirketi olan Heliatek, iki katmanlı soğurucu tabaka kullanarak, organik güneş pili üretiminde %12 gibi yüksek bir verim elde ettiklerini duyurmuşlardır (<http://www.heliatek.com>). Bu ilerlemelere rağmen organik tabanlı güneş pilleri anorganiklere göre hala ticari pazarda istenilen yere sahip değildir. Bugün fotovoltaik piyasaının büyük bir yüzdesi anorganik malzemelerle yapılan pillerden oluşmaktadır.

3. GÜNEŞ PİLLERİNİN KULLANIM ALANLARI

Güneş pillerini önemli kılan özelliklerden biri de her geçen gün artan uygulama alanlarıdır. Elektrik hatlarının henüz ulaşmadığı kırsal kesimlerden enerji naklinin olanaksız olduğu haberleşme uydularına kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulan güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Güneş pillerinin kullanım alanları

Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar.

Güneş pillerinin günümüzdeki kullanım alanlarına bakacak olursak;

- Ulaşım araçlarında,
- Çatı sistemlerinde,
- Uydu ve uzay araştırmalarında,

- Aydınlatma sistemlerinde,
- Sulama sistemlerinde,
- Kurutmada,
- Toprak dezenfeksiyonunda,
- İlkyardım, alarm ve güvenlik sistemlerinde,
- Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan korunmasında, ve buna benzer birçok alanda kullanılabilir (Tsoutsos, 2005).

4. GÜNEŞ PİLLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında güneş pilleri; uygulama alanları, kullanılan malzemenin türü, optik karakteristikleri ve ya teknolojik gelişim aşamaları gibi bir çok başlık altında sınıflandırabiliriz. Güneş pillerinin günümüze kadar olan teknolojik gelişimi göz önüne alarak sınıflandıracak olursak,

- Birinci Nesil (kristal silisyum, galyum arsenik güneş pilleri)
- İkinci Nesil (ince filmler: CuInSe₂, CdTe, a-Si güneş pilleri)
- Üçüncü Nesil (boya duyarlı güneş pilleri, organik güneş pilleri)

olmak üzere üç başlık altında inceleyebiliriz.

4.1. Birinci Nesil Güneş Pilleri

Bu güneş pillerinin yapımında en yaygın olarak kullanılan malzemeler, silisyum (Si) ve galyum arsenik (GaAs)'tir. İlk defa 1954 yılında Bell laboratuvarında kullanılan silisyum, güneş pili yapımında en fazla öne çıkan malzemedir. Rezerv sıkıntısının olmadığı bir hammadde olan silisyumun veriminin ilk üretiminden bu yana oldukça artmış olması, dayanıklı kristal yapısı, zehirli olmaması gibi özellikleri nedeniyle güneş pili kullanımında en popüler malzeme olmasını sağlamıştır. Silisyumun kristal yapısının kolay bozulmaması, optiksel ve elektriksel özelliklerinin kalıcı olmasını sağlar. Bunlara ek olarak kristal silisyum teknolojisi yoğun kullanımı sayesinde oldukça ilerlemiştir (Küpeli, 2005).

Tek kristal silisyum güneş pillerinin verimi %15-20 civarındadır. Maliyetinin karşılanma süresi 4-6 yıl arası ve 20 yıllık bir sürede yaklaşık %7 lik verim kaybı meydana gelir. Saf kristal gereksinimi yüzünden daha pahalıdır. Erimiş silisyum kalıbı dökülerek soğumaya bırakılmasıyla üretilen ve bu silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen polikristal silisyum güneş pillerinin verimi ise %12-16 civarındadır. Maliyetini karşılama

süresi 2-4 yıl civarındadır. Ancak 20 yıllık sürede %14 verim kaybı meydana gelir. Kristal yapısı tam homojen olmadığından üretim süreci ucuzdur (Kelzenberg ve diğ., 2008).

Galyum ve arsenik elementlerinden oluşan galyum arsenik (GaAs), polikristal bir yapıya sahiptir ve yasak bant genişliği oda sıcaklığında yaklaşık 1.4 eV'tur. Fotonun soğurulması için gerekli mesafe silisyuma oranla daha kısadır ve bu özelliği GaAs güneş pillerinin daha ince yapılı ve daha az materyalle oluşturulmasını sağlar. Galyum elementi yeryüzünde silisyum kadar bol olmamasından dolayı güneş pili yapımında, silisyuma oranla daha az tercih edilmektedir. GaAs güneş pilleri, daha çok uzay uygulamaları için üretilen optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılmaktadır. GaAs'ın uzay uygulamalarındaki güneş pillerinde kullanılmasının temel sebebi, silisyuma göre sıcaklığa ve radyasyona karşı daha dayanıklı olmasıdır (Conway ve diğ., 1981). GaAs güneş pillerinin ticari verimi %22, laboratuvar verimi ise %25'in üzerindedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemlerli GaAs pillerde ise %30 civarında verim elde edilmiştir (Schnitzer ve diğ., 1993).

4.2. İkinci Nesil Güneş Pilleri (İnce Film Güneş Pilleri)

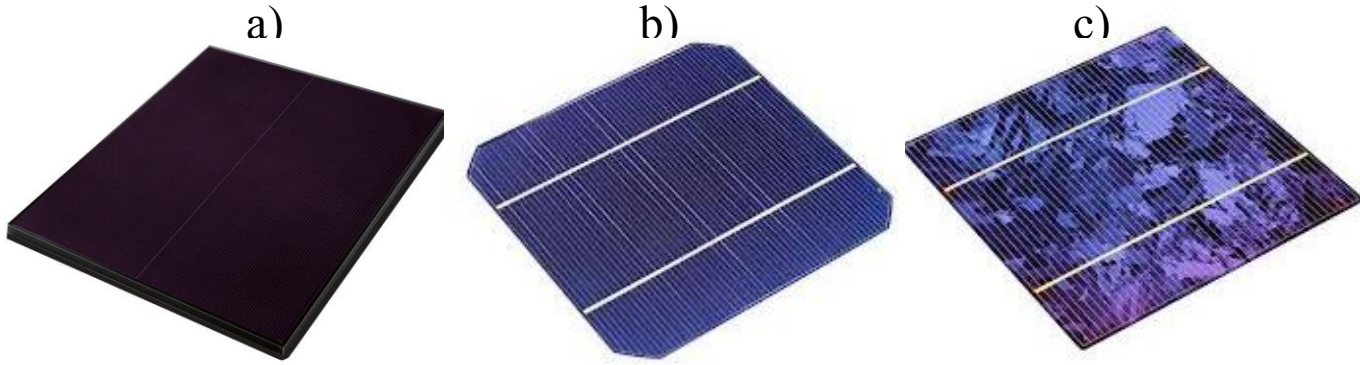
İkinci nesil güneş pilleri arasında üç farklı pil öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf-silisyum (a-Si), kadmiyum ve tellür elementlerinden meydana gelen birleşik yarıiletken kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır, indiyum, selenyum elementlerinin birleşimi olan kalkoprit yapılı $CuInSe_2$ (CIS) bileşik yarıiletkenidir.

4.2.1. Amorf silisyum (a-Si) güneş pilleri

Kristal yapı özelliği göstermeyen bu amorf silisyum pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde saat, hesap makinesi ve oyuncak gibi küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılmaktadırlar. Amorf silisyum güneş pillerinin bir başka önemli uygulama sahasında, binalara entegre yarı saydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabilmesi tahmin edilmektedir (Matsumoto ve diğ., 1990).

Soğurma katsayısı çok büyük olan amorf silisyum, 250 °C dolayındaki sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde kaplanabilmektedir. Soğurma katsayılarını kristal silisyumlara göre daha büyük olması sebebiyle aynı miktarda ışık soğurumu kristal silisyuma göre daha ince amorf silisyum kullanılarak sağlanabilir. Bu özellikleri amorf silisyumdan elde edilen güneş pillerinin, kristal yapıdakilere göre daha ucuza mal edilebilmelerine olanak sağlar. Bu üstünlüklerinin yanında en büyük dezavantajları ise üzerlerine düşen ışıkla

verimlerinin önemli ölçüde azalmasıdır (Serin, 1988). Şekil 4.1'de Si tabanlı üç farklı (amorf Si, tek kristal Si, polikristal Si) güneş pili türüne ait resimler verilmiştir.



Şekil 4.1. a) Amorf Si güneş pili b) Tek kristal Si güneş pili c) Polikristal Si güneş pili

4.2.2. Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (CdS/CdTe) ince film güneş pilleri

Periyodik tablonun ikinci gurubunda bulunan kadmiyum elementinin ve altıncı grubunda bulunan tellür elementinin bir araya gelmesiyle oluşan II-VI yarıiletken bileşiği kadmiyum tellürün (CdTe), oda sıcaklığında yasak enerji aralığı (E_g) 1.5 eV'tur. Bu değer, güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. Yüksek soğurma katsayısı yanında; ince film büyütme teknolojisinin bir çoğu ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe bileşik yarıiletkeninin öne çıkmasının sağlamıştır.

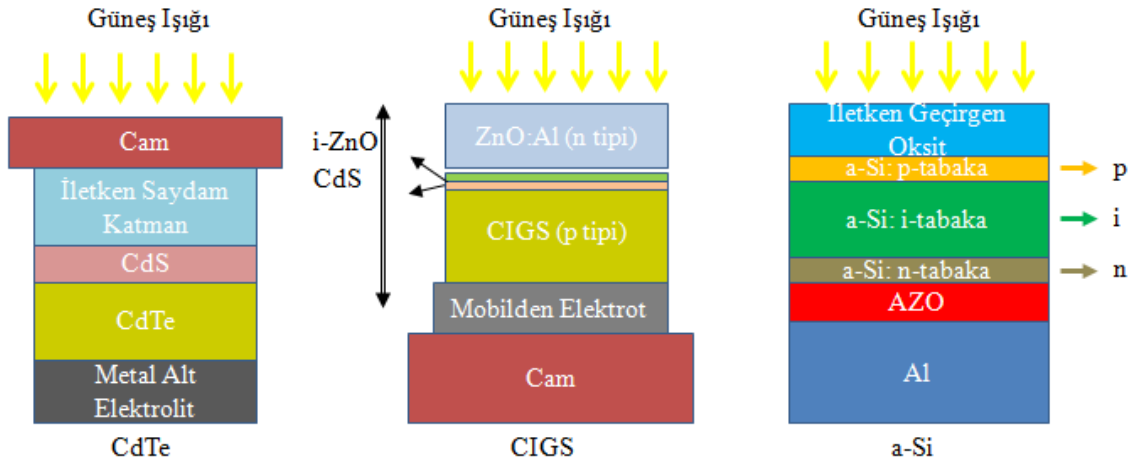
Kadmiyum sülfür-kadmiyum tellür (CdS/CdTe) güneş pili üretiminde; kadmiyum tellür (CdTe), kadmiyum sülfür (CdS) ile bir araya getirilerek heteroeklem yapı üretilir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 2.4 eV olan CdS yarıiletkeni, çok ince bir tabaka olarak uygulanır. Güneş ışınımının çoğunu geçiren CdS, heteroeklem yapıda pencere görevi yapar. CdTe, elektronik yapısı güneş ışığı tayfına en uygun yarıiletkenlerden biridir. Genellikle CdS (kadmiyum sülfür) ile birlikte kullanılır. CdS ışığı kolay geçirdiğinden pencere görevi görür. Ayrıca CdS/CdTe eklemi akım oluşması için gerekli elektrik potansiyelini sağlar. Bu tür güneş panellerinde verim değerleri %11'e ulaşırken, panel maliyeti dünyadaki tüm teknolojiler arasında en düşük düzeye inmiştir (Das & Morris, 1993).

4.2.3. Bakır İndiyum Diselenid (CIS) ince film güneş pilleri

IB-III A-VIA grubu elementlerinden yapılan üçlü, dörtlü ve beşli kalkoprit ince film esaslı yapılardan biri olan bakır (Cu), indiyum (In) ve selenyum (Se) tabanlı yapılar uygun

elektronik ve optik özelliklerinden dolayı (doğrudan bant yapılı ve yüksek soğurma katsayılı olması) soğurucu tabaka olarak kullanılmakta ve güneş pili uygulamalarının temelini oluşturmaktadır.

Bakır, indiyum ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarıiletkenle başlayan bu çoklu grup yapılar CIS (CuInSe_2) ince filmler olarak anılır. CIS (CuInSe_2) güneş pillerinin en büyük dezavantajı yasak enerji bant aralığının bir güneş pili için ideal olduğu düşünülen (1.4-1.5 eV) yasak enerji bant aralığından düşük olmasıdır. Bu soruna çözüm olarak CIS güneş pillerinden CIGS (CuInGaSe_2) güneş pilleri türemiştir (Şekil 4.2). CIS ince filmlerin yapısına galyum (Ga) katkılanmasının en önemli sebeplerinden biri CIS ince filmlerin yasak enerji bant aralığını arttırıcı etki göstermesidir. Ga katkılamanın yasak enerji bant aralığını arttırdığı ve böylece güneş pillerinin açık devre gerilimini de arttırdığı bilinmektedir.



Şekil 4.2. Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan üç farklı ince film teknolojisi; CdTe/CdS, CIGS ve a-Si güneş pilleri

CIGS, güneş enerjisi uygulamaları için uygun özellikler sergiler. Bu özelliklerin başında bu malzemenin çok yüksek soğurma katsayısı ve güneş ışığı tayfına uygun denilebilecek yasak enerji bant aralığına sahip olması gelir. Dünyada söz sahibi birçok üretici firma CIGS tabanlı modüllerin ticari gelişimi ile yakından ilgilenmektedir. Bunların arasında Shell Solar Industries (SSI), Würth Solar, Energy Photovoltaics, International Solar Electric Technology, Global Solar Energy, Showa Shell ve Matsushita firmaları üretim teknolojileri açısından öncü olanlardır. Fakat CIGS ince film güneş pillerinin i) veriminin düşük olması, ii) yapıyı oluşturan ince filmlerin tanecik boyutunun (grain size) küçük olması ve iii) tane sınırlarında yeniden birleşmenin (grain boundary recombination) çok fazla olmasından dolayı yeni yapı arayışlarına devam edilmektedir. Örneğin bileşik içindeki Cu yerine Ag kullanarak AgInGaSe_2 (AIGS) bileşiğini oluşturmak ve bu yolla daha yüksek verimlere ulaşmak

amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, yapı içindeki Se elementine alternatif aynı gruptan S ya da Te elementinin kullanılarak hem maliyetin düşürülmesi hem de verimliliğin artırılması amaçlanmaktadır.

Yukarıda üç farklı tipte güneş pili için verilen açıklamalar doğrultusunda maliyet açısından bir kıyaslama yapacak olursak; birinci nesil Si tabanlı güneş pillerinin en yüksek maliyetli güneş pili çeşidi olduğu bununla birlikte en düşük üretim maliyetinin ise üçüncü nesil güneş pillerine ait olduğu Tablo 1.1'de de açıkça görülmektedir.

Tablo 1.1. Çeşidine bağlı olarak 1 Watt güç için tasarlanan güneş pilleri için maliyet tablosu.

Güneş Pili Çeşidi	Birinci Nesil	İkinci Nesil	Üçüncü Nesil
Watt Başına Düşen Maliyet	3.5-4.5 \$ ^a	2.6-4.0 \$ ^b	1.0-2.8 \$ ^c

(^a Jozef ve diğ., 1997; ^b James & Woodhouse; ^c Kalowekamo & Baker, 2009).

4.3. Üçüncü Nesil Güneş Pilleri

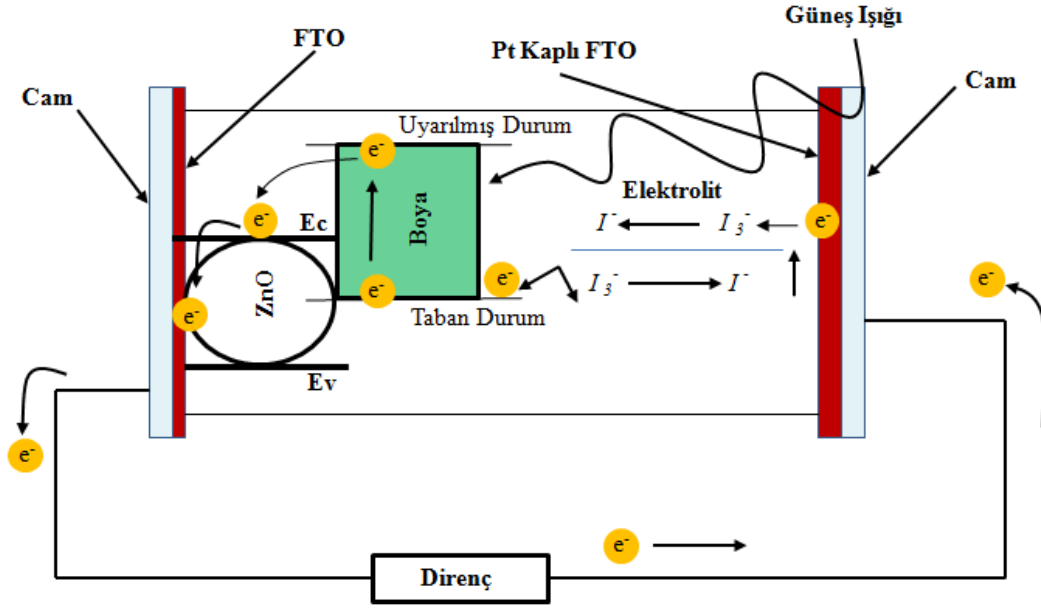
Günümüzde anorganik malzemelerle yapılan güneş pillerinin esnek olmaması, uygulama alanlarının kısıtlı olması, pahalı ve rezerv sıkıntısının olması gibi nedenler bilim dünyasını farklı malzeme arayışlarına sürüklemiştir. Bu arayışlar gerek ucuz olması gerekse iletken ve yüksek molekül ağırlığına sahip olması gibi avantajlarından dolayı, araştırmacıları organik moleküllere yöneltmiştir. Yarıiletken polimerlerin kullanıldığı organik güneş pilleri, iletken polimerlerin keşfinden ve geliştirmesinden sonra önemli bir araştırma konusu olmuştur. Güneş pillerinde anorganik malzemeler yerine organik malzemeler kullanılmasının sağladığı önemli üstünlükler, gelecekte araştırmaların bu yöne kayacağı düşünülmektedir. Yukarıda üstünlükleri belirtilen organik malzemeleri kullanılarak üretilen güneş pillerini boya duyarlı güneş pilleri (BDGP) ve organik güneş pilleri olmak üzere iki sınıfta inceleyebiliriz.

5. BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİ

Boya duyarlı güneş pili teknolojisi TiO₂ tabanlı yarıiletken güneş pilleri III. nesil güneş pilleri arasında yer almaktadır. Bu tip güneş pillerinin temelinde ışığa duyarlı organik yapıya sahip boya ve yarıiletken tabaka esastır. Tipik bir BDGP cam veya optik geçirgenliği olan flor katkılı kalay oksit (FTO) gibi iki adet şeffaf iletken oksit (TCO) ile oluşturulur (Hagfeldt & Gratzel, 1995). İlk TCO nanokristal yarıiletken elektrotun (genellikle nano yapılu TiO₂) yüzeyine adsorblanmış duyarlılaştırıcılardan meydana gelen çalışma elektrotudur.

Diğer TCO ise, ince bir tabaka katalizör (genellikle platin) ile fotoinert karşıt elektrot (counter electrode) görevi yapmaktadır. BDGP yapımında kullanılan ve TiO_2 kaplı çalışma elektrotu kadar büyük öneme sahip olan karşıt elektrot, dış devreden gelen elektronların tekrar redoks işlemini sağlayan elektrolit sıvısına iletilmesini sağlamaktır. Elektrolit veya aktarma aracı denilen ve genellikle I_3^-/I^- iyonları içeren çözelti ise bu iki elektrotun arasına enjekte edilir (Polo, ve diğ., 2004). Bu tür güneş pilleri için elektronik iletkenliğin meydana gelmesine olanak sağlayan nano boyutta parçacıkları içeren oksit tabaka çok önemlidir. ZnO ve SnO_2 gibi alternatif geniş bant aralığına sahip oksitler araştırılmış olmasına rağmen (Tennakone ve diğ., 1999; Sayama ve diğ., 1998), TiO_2 maliyetinin düşük olması, elektriksel ve optiksel özelliğinin uygunluğu ve elde edilmesinin basit olması gibi nedenlerden dolayı en çok tercih edilen malzemedir.

Boya duyarlı güneş pilleri en genel ifade ile fotosentez benzeri bir prensip ile çalışmaktadır. Klorofil tarafından adsorbe edilen güneş ışınları bitki yapraklarında karbondioksit gazını, su yardımıyla karbonhidrat (glukoz) ve oksijene çevirir. Bu temel fotosentez olayı baz alınarak BDGP sistemler geliştirilmiştir. Işığı soğuran BDGP sistemlerden boyarmaddeler yardımıyla enerji üretimi gerçekleştirilir. Yüzeysel fotosentezde ışık adsorbe eden organik ve ya doğal boya molekülleri geniş bant aralığı bulunan yarıiletkenlerde değerlik bandından iletkenlik bandına elektron geçişini sağlarlar, bu da içeride elektron akışı olmasına neden olur. Boya duyarlı güneş pilinin çalışma prensibini Şekil 5.1 üzerinden açıklarsak; öncelikle güneş ışınları optik geçirgenliği yüksek olan FTO'dan geçer ve TiO_2 üzerine tutturulmuş boya malzemesine ulaşır. Gelen güneş ışınları boya malzeme tarafından soğurulur. Meydana gelen fotonlar boya malzemesindeki elektronları uyarırlar. Uyarılan bu elektron TiO_2 moleküllerinin iletim bandına çıkarlar. İletim bandındaki bu elektron difüzyon yoluyla FTO'ya ulaşır. Sonra FTO'dan kontak yardımıyla elektron devreye ulaşır. İlk duruma göre elektron kaybetmiş olan boya molekülü başlangıç durumuna dönmek için I_3^-/I^- çözeltilisinden bir elektron alır. Alınan bu elektron karşıt elektrot dediğimiz platin kaplı FTO camına ulaşır ve son olarak I_3^-/I^- iyon çözeltilisine gelen elektron tarafından sistem indirgenir ve döngü tamamlanmış olur.

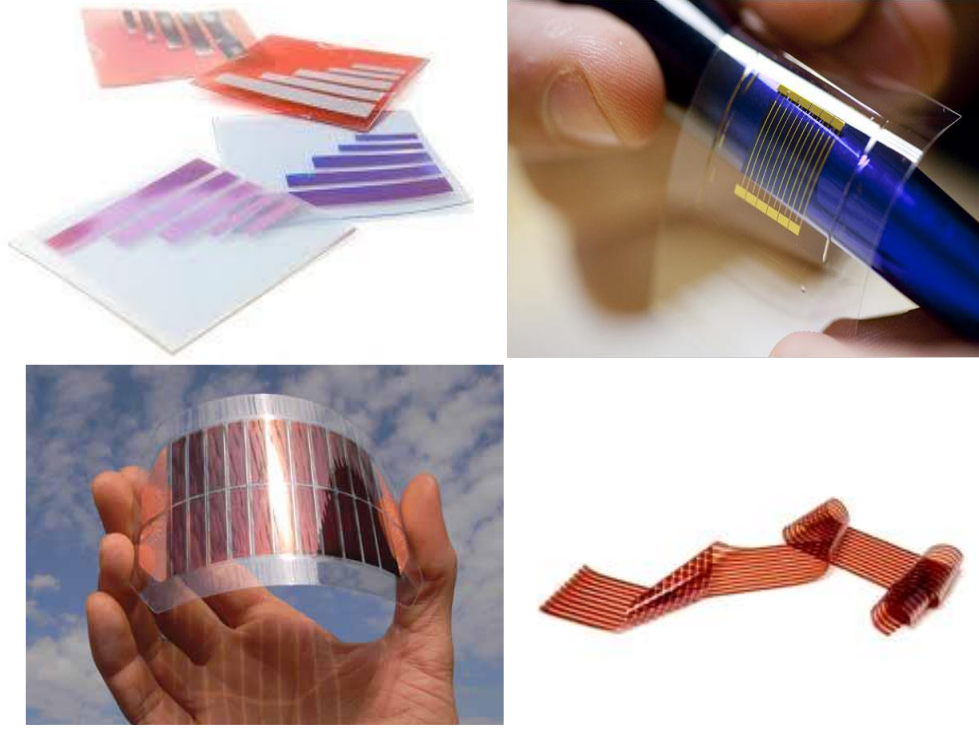


Şekil 5.1. Boya duyarlı güneş pilinin işleyiş prensibi (Gratzel, 2003)

Literatürde BDGP çalışmaları oldukça fazladır. Özellikle farklı üretim yöntemleri ve farklı boya malzemeleri kullanılarak verimin artırılması hedeflenmektedir (Matsui, 2004; Polo & Iha, 2006; Chaoyan ve diğ., 2007; Zhang ve diğ., 2008; Chang & Lo, 2010; Zhou ve diğ., 2011; Park, ve diğ., 2013).

6. ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ

Üçüncü nesil fotovoltaik hücre teknolojisi olarak adlandırılan organik güneş pilleri, iki metal elektrot arasına organik tabanlı malzemelerin yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Şekil 6.1’de örnekleri gösterilen organik güneş pillerinde organik temelli malzemeler olarak, yarıiletken polimerlerin kullanılması bu pillerin geliştirilme aşamasına ciddi katkılar yapmıştır (Winder & Sarıçiftçi, 2004). İletken, yüksek molekül ağırlığına sahip organik moleküller istenen özelliğe göre kolaylıkla değiştirilebilmeleri, ucuz olmaları, kolay üretim teknikleriyle elde edilebilmeleri, ve hafif olmaları gibi avantajları olması nedeniyle gelecek için umut vermektedirler.



Şekil 6.1. Esneklik özelliğine sahip organik güneş pilleri

Anorganik benzerlerinin çeşitliliği sınırlı iken organik moleküllerin sayısının milyonlar seviyesinde olması, bu malzemelerden elde edilecek verimin ve kararlılığın arttırılmasına da imkan verir. Rezerv sıkıntısının da olmaması nedeniyle, organik malzemeler bu tip çalışmalar için çok ayrıntılı bir şekilde araştırılmaya başlanmıştır. En sık kullanılan aygıt tipi, biri alıcı (donör, p) diğeri verici (akseptör, n) malzemelerin bir arada kullanıldığı p-n eklem şeklinde oluşturulabilen aygıtlardır. Organik malzemelerin diğeri bir avantajı ise kullanılan malzemelerin kimyasal yapılarının kolayca değiştirilebilmesidir. Bu şekilde malzemelerin soğurma aralığının güneş spektrumuna daha uygun hale getirilerek, daha fazla foton enerjisi soğurabilmesi sağlanmaktadır. Öte yandan, verimleri anorganik malzemelerin kullanıldığı güneş pillerine nazaran daha düşüktür. Organik güneş pillerinde verimi geliştirmekten farklı olarak kararlılık problemi de vardır. Özellikle de ışık altında ve su buharında/oksijende hızlı bir şekilde kalitesi düşmektedir. Uzun ömürlü olarak organik malzemeleri kullanabilmemiz için hava ve nemli ortamlardan saklamamız gerekmektedir (Kroon ve diğ., 2007).

İlk organik güneş pili Tang ve ark. tarafından Kodak firmasında üretilmiştir (Tang, 1986). Üretilen piller %1,1 gibi bir verime sahiptir. Verimin düşük olmasının nedeni, iki katmanlı güneş pilinde güneşten gelen enerjinin oluşan elektron-boşluk çiftinin ayrımının sadece katmanların arayüzünde gerçekleşmiş olmasıdır. Başka bir deyişle, elektron-boşluk çiftinin yeterli miktarda ayrılamamasıdır. Güneş enerjisinin soğurulmasıyla ortaya çıkan

eksitonlar, yük taşıyıcıların meydana gelmesine olanak sağlamaktadırlar. Foto-akımın oluşabilmesi için eksitonların sorunsuz bir şekilde akması gerekmektedir. Genelde, organik güneş pillerinde, foto-akımın oluşmasına yaşam süresi uzun olan eksitonlar katkıda bulunur. Bu problemi aşip ışığın aktif yüzeyde soğurulmasını arttırabilmek için 1990'ların başında çift katlı heteroeklem ve hacim heteroeklem olarak bilinen iki yeni yöntem geliştirilmiştir. Bu sistemlerde donör ve akseptör iki farklı malzeme ve uygun bir çözücü sayesinde karışım halinde bulunmaktadır. Böylece gerekli olan yük ayrımı en yüksek seviyeye çıkarılmıştır. Kullanılan çözücünün yanı sıra üretilen güneş piline sıcaklık uygulanması da önemli bir etkidir. Ancak bu işlem malzemeye göre değişkenlik göstermektedir. Ayrıca filmlerin düzgün olarak oluşması için çeşitli malzemelerle katkılanması da gerekmektedir. Bütün bu etkenler göz önüne alındığında, organik bir malzemenin güneş pilleri için daha uygun hale getirilmesi istenmektedir. Hala yetersiz kalsalar da, farklı organik malzemeler kullanılarak üretilmiş güç dönüşüm verimi %7-8'lerin üzerinde olan pillerin artan bir ivmeyle üretildiği bilinmektedir (Liang ve diğ., 2010). Bu nedenle dünyanın ileri gelen araştırma grupları pek çok farklı polimerle verim artışı çalışmalarını sürdürmekte ve yeni polimerler üretmektedir. Bu sebeptendir ki, organik güneş pillerinin verimini arttırmak için yapılan araştırma-geliştirme çalışmaları polimer üretim teknolojisinin gelişmesine katkı sağlamıştır.

Polimerler ilk keşfedildiğinde bugün bilinen özelliğinin aksine elektriksel yalıtkanlığa sahip malzemeler olarak bilinmekteydi. Bu nedenle, elektriksel yalıtkanlığın gerekli olduğu yerlerde de geniş bir kullanım alanları mevcuttur. 1970'lerde yapılan çalışmalarda ilk iletken polimer olan poliasetilen keşfedildi (Macdiarmid ve diğ., 1977).

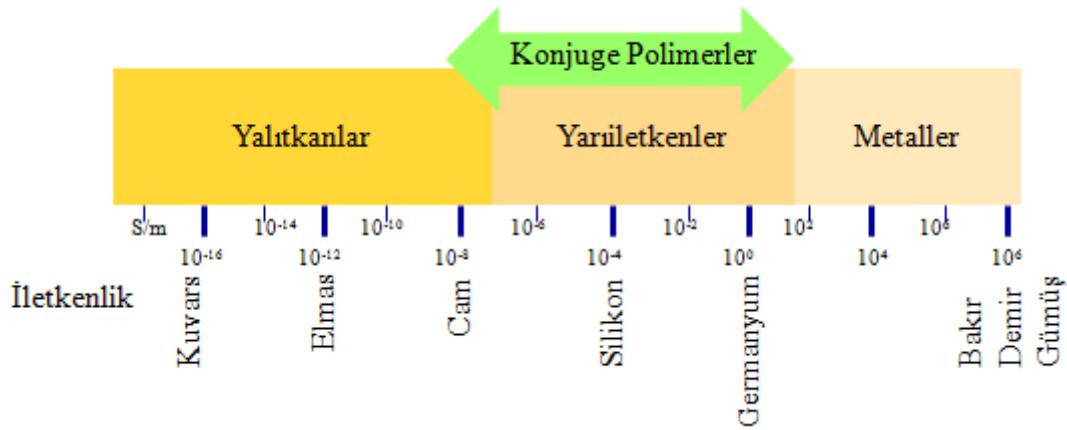
Poliasetilen filmler iyot (I), flor (F) veya klor (Cl) buharına tutularak yükseltgendiğinde, iletkenliğin 10^9 kat artarak 10^5 S/m düzeyine çıktığı bilinmektedir (Macdiarmid ve diğ., 1977). Bu değer yalıtkan karakterli teflonun iletkenlik değerinden çok daha yüksektir ve gümüş (Ag), bakır (Cu) gibi metallerin elektrik değerine (10^6 S/m) oldukça yakındır.

Günümüzde toz, film, süspansiyon veya levha şeklinde polipirol, politiyofen, polianilin, polifuran, poli(N-vinilkarbozol) gibi çok sayıda polimerin iletken olduğu bilinmekte ve bunların ticari üretimleri yapılmaktadır. İletken polimerler, düşük maliyetli ve ince film oluşturabilme gibi önemli özelliklere sahip olması sebebiyle, her geçen gün kullanım alanları biraz daha genişlemektedir. Bunlara örnek olarak organik fotovoltaiik hücreler (OPV), alan etkili transistör (FET), fotodiyot teknolojisi, lazer teknolojisi, yarıiletken çipler, entegre devreler, sensörler, LCD monitörler, bilgisayarlar ve çeşitli teknolojik aygıtlar verilebilir (Yang, 2012; Siringhous ve diğ., 2000; Moons, 2002).

İletken polimer kavramı, yapı içindeki elektronlarla yeterli düzeyde elektriksel iletkenliği sağlayan polimerler için kullanılır. Polimerlerin elektriksel iletkenlik gösterebilmeleri için polimer yapısında elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu ana zincirinde konjuge çift bağlar bulunan polimerler sağlar. Bu tip iletken polimerlere konjuge polimerler denilmektedir. Bu da organik fotovoltaj hücrelerinin oluşumunda büyük katkı sağlamıştır.

Konjuge polimerler birbirlerine ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, tekrarlanan gruplardan oluşmuş, uzun zincirli yapılardır. Tekli bağ sigma (σ) bağıdır, çift bağın biri sigma (σ) bağı, diğeri ise pi (π) bağıdır. Ana zinciri üzerinde ard arda tek ve çift bağ sıraları içeren konjuge polimerler yarıiletkenlik gösterirler. (Güneş & Saçıftçı, 2007)

Şekil 6.2'de bazı maddelerin ve konjuge polimerlerin iletkenlik değerleri gösterilmektedir.

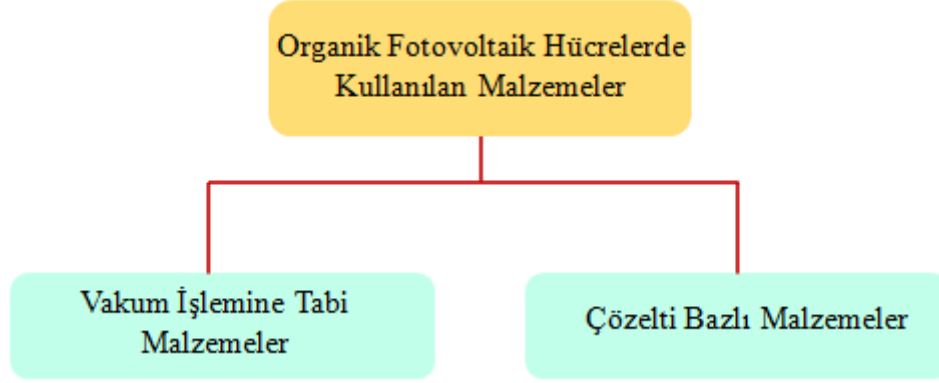


Şekil 6.2. Bakırdan Kuvarsa kadar olan materyaller ile iletken polimerlerin iletkenliklerinin karşılaştırılması (Koyuncu, 2008)

İletken polimerlerin iletkenliklerini, morfolojik, mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden birisi iletken polimerlerin kopolimerlerini veya kompozitlerini hazırlayarak özelliklerinin iyileştirildiği kimyasal yöntemlerdir. Başka bir yöntem ise plastikleştirici rolü oynayan uygun bir dopant ile iletken polimerlerin blendlerini hazırlayarak özelliklerinin iyileştirildiği fiziksel yöntemlerdir.

Organik fotovoltaj hücreler, her ikisi de organik olan biri donör diğeri akseptör malzemelerin birleşiminden oluşmaktadır. Organik fotovoltaj hücrelerin genel yapısı ışık yayan diyotlara (LED) benzemektedir. Bu aygıtlar sandviç geometrisinde hazırlanmaktadır. Alt taban olarak kullanılan saydam indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam elektrot kimyasal dağlama (etching) yöntemi kullanılarak yapılandırılabilir. Saydam, iletken alt taban üzerine polistren sulfonik asit (PSS) katkılanmış polietilen-dioksitiyofen sulu çözeltiden kaplanır. Bu

(3,4-ethylendioksitiyofen):poli(sitirene sülfanat) PEDOT:PSS tabakası, ITO elektrotun yüzey kalitesini iyileştirir ve deşik enjeksiyon/ekstraksiyonuna yardımcı olur. Aynı zamanda bu elektrotun iş fonksiyonu, PEDOT tabakasının kimyasal/elektrokimyasal redoks reaksiyonlarıyla değiştirilebilir. Aktif tabakalara (genellikle polimer-fulleren) ıslak işlem veya vakum kaplama tekniği uygulanır (Hoppe & Sarıçiftçi, 2004; Avcı, 2008).



Şekil 6.3. Organik fotovoltaik hücrelerinde kullanılan malzemeler (Hoppe & Sarıçiftçi, 2004)

Şekil 6.3'te de görüldüğü gibi organik fotovoltaik hücre araştırmaları çözelti (ıslak) bazlı işleme tabii ve vakum işleme tabii malzemeler olmak üzere iki tür malzeme üzerine yoğunlaşmıştır. Islak işleme tabii malzemelerin genel bir organik çözücünde çözünmesi gerekmektedir. Organik malzemelere kazandırılan yan zincir fonksiyonelliği onların genel organik çözücülerde çözünmelerine olanak sağlar. Islak işleme tabii malzemelere döndürerek kaplama (spin coating), bıçak ağzı ile kaplama (doctor blade), elek baskı (screen printing), püskürtmeli baskı (ink jet printing) işlemleri uygulanabilir. Yarıiletken polimerler, fulleren türevleri organik çözücülerde kolaylıkla çözünebildiklerinden bu gruba dahildirler (Hoppe & Sarıçiftçi, 2004).

Polimerler uzun makro moleküller oldukları için onları buharlaştırmak oldukça zordur. Genel organik çözücüler içerisinde çözünemeyen bazı küçük organik moleküller vakum işlemine tabii olurlar ve süblimleştirme yöntemi kullanılarak vakumda kaplanabilirler. Bu tür fotovoltaik hücrelerde ön elektrot (ışığın geldiği taraf ise böyle adlandırılır) ITO'dur. Arka elektrot (üst kontak olarak da adlandırılır) olarak genellikle alüminyum (Al) kaplanır.

Organik güneş pillerinde aktif tabaka olarak kullanılan ve en iyi sonuç veren malzemelerden ikisi poly 3-hexylthiophene (P3HT) ve P-Chloromercuribenzoate (PCBM)'dir. Fulleren türevi olarak bilinen PCBM, en iyi n-tipi malzemelerden biridir. Bu malzeme fotovoltaik hücre sistemlerinde akseptör olarak görev yapar ve optik soğurması görünür bölgenin altındadır. P3HT ise PCBM'e iyi uyum sağlayan ve yapı içerisinde donör olarak görev yapan bir malzemedir.

6.1.Organik Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

Anorganik kristal malzemelerdeki fotovoltaiik özellikler, enerji bandı modeliyle açıklanabilir. Anorganik malzemelerin aksine organik malzemelerde, üç boyutlu kristal yapı bulunmazken, farklı molekül içi ve moleküller arası etkileşimler mevcuttur. Organik fotovoltaiik hücrenin çalışma prensibini anlamak için anorganik p-n eklemi temel alınmaktadır. Organik fotovoltaiik hücrelerinde ışığın elektrik akımına dönüştürülme işlemi arka arkaya dört adımda açıklayabiliriz;

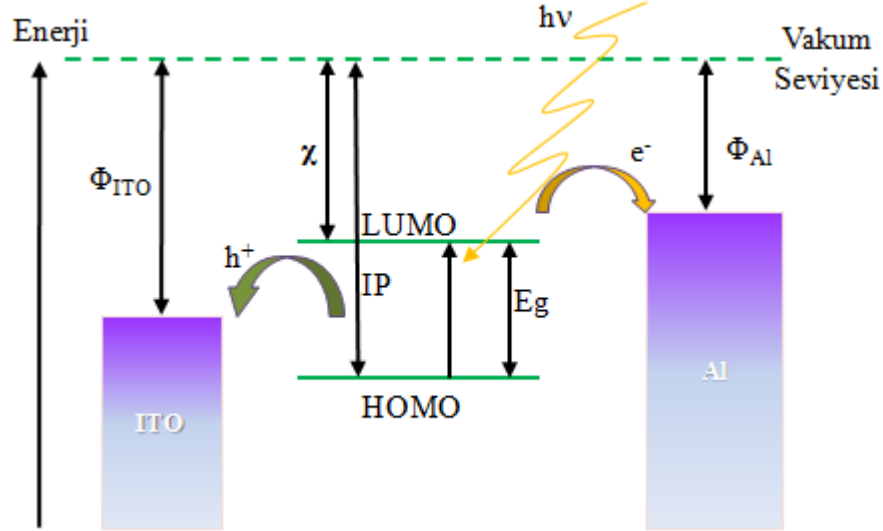
- 1) Eksiton (elektron-deşik çifti) oluşturulması için foton soğurulması,
- 2) Alıcı (akseptör) ve verici (donör) ara yüzeyine eksiton difüzyonu (yayılması),
- 3) Bu bölgede yük ayrımının olması,
- 4) Son olarak da doğru akım elde etmek için deşiklerin anotta ve elektronların katotta toplanması (Gregg & Hanna, 2003).

Organik güneş pillerinin çalışma prensibine göre küçük bir mesafe içerisinde eksitonun ayrışması gerekmektedir. Elektron transferi ile gerçekleşen eksiton ayrışması metal kontak ile organik yarıiletken ara yüzeyinde veya farklı elektron akseptör/donör özellikteki molekül ara yüzeyinde gerçekleşir. Elektron, yüksek elektron ilgisi olan malzeme (akseptör) tarafından, elektron boşluğu ise düşük iyonlaşma potansiyeline sahip malzeme (donör) tarafından kabul edilmektedir. Ayrıca eksiton, elektron ve elektron boşluğu arasındaki Coulomb çekim kuvvetinden daha güçlü bir elektrik alan tarafından da ayrıştırılabilir.

Organik güneş pillerinin büyük çoğunluğunda oluşan elektron ve elektron boşlukları birbirinden farklı bölgelere taşınmaktadır. Bu taşınma işlemi, elektrotların simetrik olmayan (farklı iş fonksiyonları) veya uygulanan potansiyel sebebi ile oluşan elektrik alanda gerçekleşmektedir. Geri yük geçişini önlemek amacı ile elektron ve elektron boşlukları tercihen farklı malzemelerde veya fazlarda taşınmaktadır. Örneğin donör-akseptör hücrelerde, elektron iletkenliği iyi olan akseptör ve boşluk iletkenliği iyi olan donör malzeme kullanımı daha uygundur. Yüksek yük toplama verimliliği yani iyi bir performans için organik yarıiletken malzeme ile metal elektrot arasında herhangi bir enerji bariyeri olmaması gerekmektedir. Bazı durumlarda iki malzeme arasındaki enerji bariyerini gidermek için ilave bir malzeme daha kullanılması yük toplama verimliliğini arttırmaktadır (Zafer, 2006).

Bir foton $h\nu$ enerjisine sahiptir ve bu enerjinin bant boşluğu enerjisinden büyük olması halinde foton, yarıiletken malzeme tarafından soğurulur ve elektron arkasında bir boşluk bırakarak highest occupied molecular orbital (HOMO) denilen en yüksek işgal edilen molekül orbitali seviyesinden lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) olarak adlandırılan en

düşük işgal edilemeyen molekül orbitali seviyesine çıkar ve eksiton olarak şekillenir. Enerji seviyesi ve ışığın soğurma yapması sürecindeki işlemler Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Organik güneş pillerinde bu süreç eksitonların ayrılmasıyla devam eder. Yük ayrımını yapabilmek için elektriksel alana ihtiyaç vardır. Elektriksel alan ise simetrik olmayan iyonlaşma enerjisi veya iş fonksiyonlarından sağlanır (Spanggaard & Krebs, 2004).

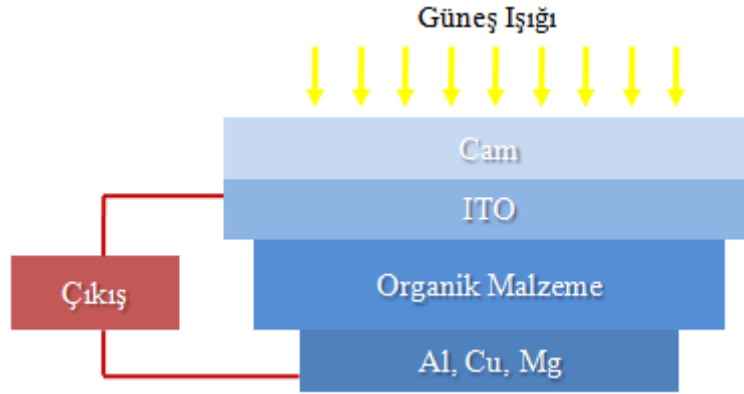


Şekil 6.4. Fotonun soğurumu ve yük taşıyıcı transferleri (Schilinsky ve diğ., 2002)

6.2.Yapısına Göre Organik Güneş Pilleri

Yapısına göre organik güneş pilleri tek tabakalı fotovoltaik hücreler, iki katlı heteroeklem fotovoltaik hücreler ve hacim heteroeklem fotovoltaik hücreler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Oluşturulan ilk tip fotovoltaik hücre olan tek tabakalı fotovoltaik hücreler, iş fonksiyonu farklı iki farklı metal elektrot arasına sıkıştırılmış yarıiletken polimerlerden oluşmaktadır (Şekil 6.5). Fotovoltaik gereksinimlere göre; organik yarıiletkenlerde oluşan eksitonlar serbest yük taşıyıcılarına dönüşmelidir. Tek başına polimer içeren aygıtlarda, eksitonları ayırmanın en önemli yolu elektrik alan kullanmaktır. Bu tür fotovoltaik hücrelerin çalışma prensipleri MIM olarak anılan metal-iletken-metal ya da düşük çalışma fonksiyonlu metal ile p-tipi organik tabaka arasındaki Schottky bariyerinin oluşumu tarafından açıklanabilir (Sze, 1981).

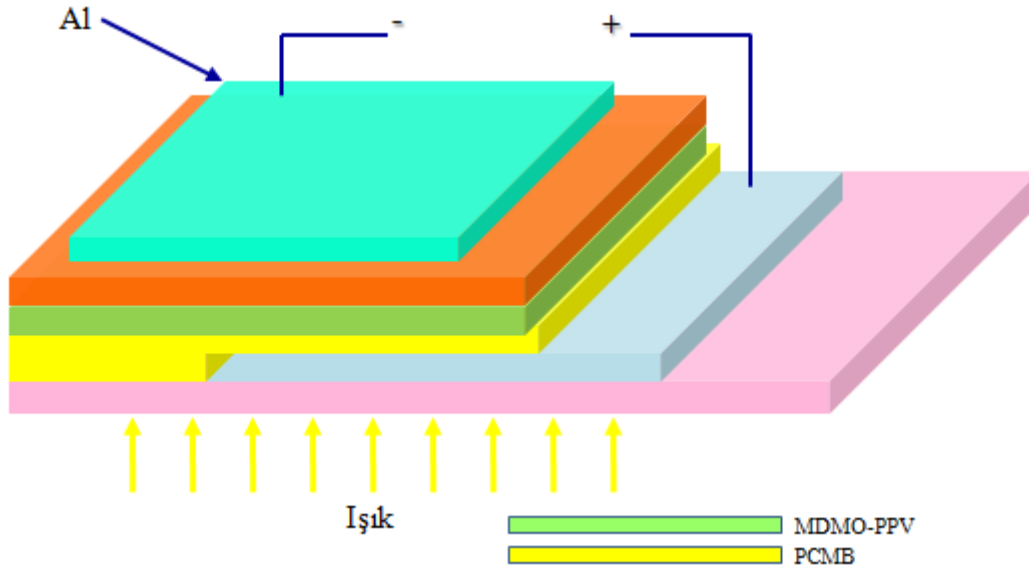
Bu tür fotovoltaik hücrelerin veriminin düşük olmasının nedeni bu aygıtlarda sadece kısıtlı bölgelerde foto-akım yaratılmış olmasıdır (Drechsel ve diğ., 2004).



Şekil 6.5. Tek katlı fotovoltatik hücre (Spanggaard & Krebs, 2004)

Bir diğer yapı olan iki katlı heteroeklem fotovoltatik hücreler (Şekil 6.6), iki katlı bir aygıt donör ve akseptör malzemeyi üst üste sıkıştırarak oluşturulabilir (Peumans ve diğ., 2003; Pettersson ve diğ., 1999; Tang, 1986). Donör ve akseptör arasındaki etkileşim ikisinin birbirine temas ettiği geometrik ara yüzeyde sağlanır. Konjuge polimerler ve fullerenler üzerine yapılan foto-fizik çalışmaları, konjuge polimerlerden fullerenlere ultra hızlı yük transferi olduğunu göstermektedir. Bu tür aygıtların verimi, eksitonların sadece güçlü elektrik alan bulunduğu ara yüzeylerde ayrılması sebebiyle kısıtlıdır (Peumans ve diğ., 2000).

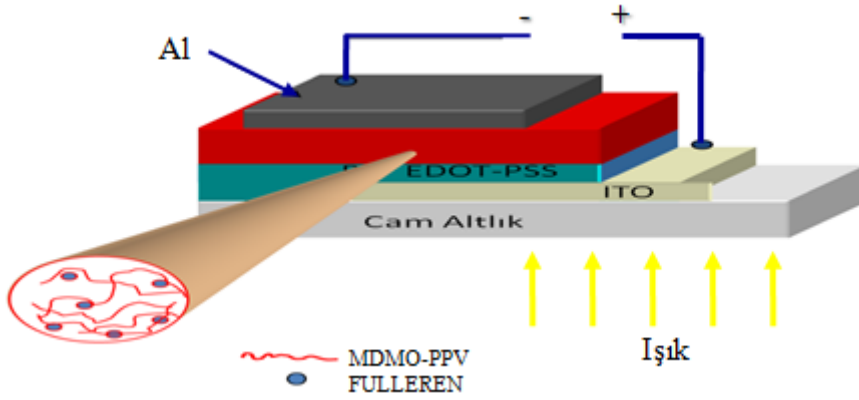
Tek tabakalı yapıya göre avantajı nano-molekül yük geçişinin olmasıdır. Eksitonlar materyalin arayüzeyine ayrılır ve elektronlar n-tipi akseptörün içine, holler ise p-tipi donör materyalin içine doğru hareket ederler. Bu yüzden, hollerin ve elektronların her biri diğerinden ayrılır ve yeniden birleşme (rekombinasyon) büyük miktarda azalmış olur (Rostalski & Meissner, 2000; Sarıçiftçi ve diğ., 1993; Meissner ve diğ., 1992).



Şekil 6.6. İki katlı fotovoltatik hücre (Hoppe & Sarıçiftçi, 2004)

Yapısına göre organik güneş pillerinden üçüncüsü ise hacim heteroeklem fotovoltatik hücrelerdir (Şekil 6.7). Hacim heteroeklem hücreler, temelde alıcı ve verici kısmının eksiton

difüzyon uzunluğundan daha az bir uzunluk içinde hacim boyutunda karışmış halidir (Schilinsky ve diğ., 2002). Hacim heteroeklem aygıtları çift katlı aygıtlar ile benzerlik gösterirken, yüklerin ayrılmasının meydana geldiği alan daha büyüktür. Hacim heteroeklemede arayüzeyin dağılmış olmasından dolayı, beklendiği gibi küçük eksiton difüzyon uzunluğundan dolayı kayıp yoktur. Bu kapsamda, tüm eksitonlar işleyiş süresince ayrılırken, yükler farklı evreler içinde ayrılacaktır. Bu sebeple, rekombinasyon geniş surette azalacak ve foto-akım sürekli ışık şiddetini lineer olarak takip edecektir. Hacim heteroeklem güneş pilleri çift tabakalı güneş pillerine göre nano-boyut morfolojisine çok daha duyarlıdır (Gebeyehu ve diğ., 2004; Yohannes ve diğ., 2004).



Şekil 6.7. Hacim heteroeklem fotovoltaik hücre (Hoppe & Sarıçiftçi, 2004; Yohannes ve diğ., 2004)

7. SONUÇLAR

1950’li yıllarda, birinci nesil güneş pilleri olarak bilinen Si ve GaAs tabanlı güneş pilleriyle başlayan bu teknoloji, özellikle 1980’li yıllardan sonra ince film tabanlı CIS/CIGS, CdTe ve a-Si çalışmalarıyla ikinci nesil güneş pilleri olarak devam etmiştir. I. ve II. nesil güneş pillerinin sağladığı tatmin edici yüksek verim, maliyet konusunda aynı tatminkarlığı sağlamamıştır. Günümüzde ise çalışmalar daha çevreci, daha ucuza elde edilme imkanı sağlayan fakat daha düşük verimle çalışan organik güneş pillerine kaymış durumdadır. Kullanılan organik malzemenin ucuz olmasının getirmiş olduğu avantaj organik filmlerin ticarileşmesine de olanak sağlamaktadır. Farklı üretim teknikleri, ortam koşulları ve farklı malzeme kullanımlarıyla daha yüksek verimlere ulaşma çalışmalarına hız verilmiştir. Tüm dünyada bu alanda yapılan bilimsel çalışmaların sayısının her geçen gün artması da organik güneş pillerinin önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, güneş pilleri alt türleriyle anlatılmış; organik malzeme tabanlı güneş pilleri diğer güneş pili çeşitleriyle çalışma prensibi, elde edilme maliyeti, verimlilik, kullanılan malzeme bakımından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bugün itibariyle yüksek verim sunan Si kristal tabanlı ve CdTe yapıdaki güneş pillerinden verim açısından oldukça düşük olduğu fakat diğer tüm güneş pili çeşitlerinden de daha ucuza elde edilme imkanı sunduğu bilinmektedir. Mevcut maliyet açısından karşılaştırıldığında organik güneş pillerinin gelecek vaadeden bir güneş pili türü olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Bu anlamda bilim adamlarının ve güneş paneli üretimi yapan çokuluslu şirketlerin düşük maliyetle elde edilebilen organik güneş pillerinin verimliliklerinin arttırılması için yapılan çalışmalara hız verilmeleri gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- ADAMS, W.G., DAY, R.E. (1876). The action of light on selenium. *Proc. R. Soc*, 25, 113-117.
- AVCI, A. (2008). Karbon nanotüplerin organik fotovoltaiik güneş pillerinde kullanımı. *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*. 429-432.

- CHANG, H., LO, Y.J. (2010). Pomegranate leaves and mulberry fruit as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 84, 1833-1837.
- CHAOYAN, L., YANG, X., CHEN, R., PAN, J., TIAN, H., ZHU, H., WANG, X., HAGFELDT A. SUN, L. (2007). Anthraquinone dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 1863-1871.
- CONWAY, E.J., WALKER, G.H., HEINBOCKEL, J.H. (1981). A thermochemical model of radiation damage and annealing applied to GaAs Solar Cells. *Fifteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1, 38-44.
- DAS, S.K., MORRIS, G.C. (1993). Preparation and characterisation of electrodeposited n-Cds/P-CdTe thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 28, 305-316.
- DRECHSEL, J., MANNIG, B., KOZLOWSKI F., GEBEYEHU, D., WERNER, A., KOCH, M., LEO, K., PFEIFFER, M. (2004). High efficiency organic solar cells based on single or multiple PIN structures. *Thin Solid Films*, 451, 515-517.
- DRECHSEL, J., MANNING, B., KOZLOWSKI, F., PFEIFFER, M., LEO, K., HOPPE, H. (2005). Efficient organic solar cells based on a double p-i-n architecture using doped wide-gap transport layers. *Applied Physics Letters*, 86, 244102-244105.
- FISCHER, B., PIGNERI, A. (2011). Potential for electrification from biomass gasification in Vanuatu. *Energy*, 36, 1640-1651.
- GEBEYEHU, D., PFEIFFER, M., MAENNIG, B., DRECHSEL, J., WERNER, A., LEO, K. (2004). Highly efficient p-i-n type organic photovoltaic devices. *Thin Solid Films*, 29, 451-452.
- GREGG, B.A., HANNA, M.C. (2003). Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, 93, 3605-3614.
- GRATZEL, M. (2003). Dye-sensitized solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4, 145-15.
- GUERRA, D., BELCARI N., BISOGNI, M.G., LOSA, G., MARCATILI, S., AMBROSI, G., CORSI F., MARZOCCA, C., BETTA, G. D., PIEMONTE, C. (2010). Advantages and pitfalls of the silicon photomultiplier (SiPM) as photodetector for the next generation of

- PET scanners, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 617, 223-226.
- GÜNEŞ, S., SARIÇİFTÇİ N.S, (2007). An overview of organic solar cells. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25, 1-15.
- HAGFELDT, A., GRATZEL, M. (1995). Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems. *Chemistry Review.*, 95, 49-68. Grätzel, M. (2000). Perspectives for dye-sensitized nanocrystalline solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 171-185.
- HOPPE, H., SARIÇİFTÇİ, N.S. (2004). Organic solar cells: an overview, *Journal of Materials Research*, 19, 1924-1945.
- http://www.heliatek.com/newscenter/latest_news/neuer-weltrekord-fur-organische-olarzellen-heliatek-behauptet-sich-mit-12-zelleffizienz-als-technologiefuhrer/?lang=en.
- <http://www.renewablesinternational.net/new-efficiency-record-for-organic-ell/150/510/33086>.
- ISHIBASHI, A. (1985). Optical properties of (AlAs)_n(GaAs)_n superlattices grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 58, 2691-2696.
- JAMES, A., WOODHOUSE, T.M. (2011). Drivers of Residential and Utility Scale Solar Photovoltaic (PV) System Price in the U.S. *NREL Technical Report*.
- JOZEF, S., SIVOTHAMAN, S., NIJS, F.J., MERTENS, R.P., OVERSTRAETEN, R. (1997). Low-Cost Industrial Technologies of Crystalline Silicon Solar Cells, *Proceedings of the IEEE*, 85, 5.
- KALOWEKAMO, J., BAKER, E. (2009). Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy*, 83, 1224-1231.
- KELZENBERG, M.D., DANIEL, B., TURNER, E., BREANDAN, M., MICHEAL, G., MORGAN, C., NATHAN, L. (2008). Photovoltaic measurements in single-nanowire silicon solar cells. *Nano Letters*, 8, 710-714.
- KIM, Y.D., JEGADESAN, S., SARASQUATE, G., FRANKY, S., HAUNJUN, D. (2009). The effect of molybdenum oxide interlayer on organic photovoltaic cells. *Applied Physics Letters*, 95, 9-12.

- KROON, J.M., VEENSTRA, S.C., SLOOF, L.H., VERHEES, W.J.H., KOETSE, M.M., SWEELSEN, J., SCHOO, H.F.M., BEEK, W.J. E., WIENK, M.M., JANSSEN, R.A.J., YANG, X., LOOS, J., MIHAILETCHI, V.D., BLOM, P.W.M., KNOL, J., HUMMELEN, J.C. (2007). Nanocrystalline dye-sensitized solar cells having maximum performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, 1-8.
- KUWABARA, T., NAKAYAMA, T., UOZOMI, K., YAMAGUCHI, T., TAKAHASHI K. (2008). Highly durable inverted-type organic solar cell using amorphous titanium oxide as electron collection electrode inserted between ITO and organic layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 1476-1481.
- KÜPELİ, A.Ö. (2005). Güneş pilleri ve verimleri. Yüksek Lisans Tezi. *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- LIANG, Y., XU, Z., XIA, J., TSAI, S., WU, Y., LI, G., RAY, C., YU, L. (2010). For the bright future-bulk heterojunction polymer solar cell with power conservation efficiency of 7.4%, *Advanced Materials*, 22, 135-138.
- LUNGENSCHMIED, C., DENNLER, G., NEUGEBAUER, H., SARIÇİFTÇİ, S.N., GLATHEAR, M., MEYER, T., MEYER, A. (2007). Flexible, long-lived, large-area, organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 379-382.
- MACDIARMID, A.G., SHIRAKAWA, H., LOUIS, J., HEEGER, L. (1977). Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene (CH)_x, *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1, 578-580.
- MATSUI, H. (2004). Application of an ionic liquid-based electrolyte to a 100 mm x 100 mm sized dye-sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 164, 129-135.
- MATSUMOTO, Y., HIRATA, G., TAKAKURA, H., OKAMOTO, H., HAMAKAWA, Y. (1990). A new type of high efficiency with a low-cost solar cell having the structure of a μ -SiC/polycrystalline silicon heterojunction. *Journal of Applied Physics*, 67, 6538-6543.
- MEISSNER, D., SIEBENTRITT, S., GÜNSTER, S. (1992). Charge carrier photogeneration in organic solar cells. *International Symposium on Optical Materials Technology for*

Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XI: Photovoltaics, Photochemistry and Photoelectrochemistry, Toulouse, France.

MOONS, E. (2002). Conjugated polymer blends: linking film morphology to performance of light emitting diodes and photodiodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14, 12235-12260.

PARK, K.H., KIMB, T.Y., PARK, J.Y., JIND, E.M., YIME, S.H., CHOIF, D.Y., LEE, J.W. (2013). Adsorption characteristics of gardenia yellow as natural photosensitizer for dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments*, 96, 595-601.

PETTERSSON, L.A.A., ROMAN, L.S., INGANA, O. (1999). Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films. *Journal of Applied Pyhsics*, 86, 487-489.

PEUMANNNS, P., BULOVIC, V., FORREST, S.R. (2000). Efficient photon harvesting at high optical intensities in ultrathin organic doubleheterostructure photovoltaic diodes. *Applied Pyhsics Letters*, 76, 2650-2652.

PEUMANNNS P., YAKIMOV, A., FORREST, S.R. (2003). Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells. *Journal of Applied Pyhsics*, 93, 3693-3723.

POLO, A.S., IHA, N.Y.M. (2006). Blue sensitizers for solar cells: natural dyes from Calafate and Jaboticaba. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 1936-1944.

POLO, A.S., ITOKAZU, M.K., IHA, N.Y.M. (2004). Metal complex sensitizers in dye-sensitized solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 248, 1343-1361.

PREVENSLIK, T.A. (2003). Cavitation induced Becquerel effect. *Ultrasonics*, 41, 323-327.

ROSTALSKI, J., MEISSNER, D. (2000). Photocurrent spectroscopy for the investigation of charge carrier generation and transport mechanisms in organic p/n-junction solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 63, 37-47.

SARIÇİFTÇİ, N.S., BRAUN, D., ZHANG, C., SRDANOV, V.I., HEEGER, A.J., STUCKY, G., WUDL, F. (1993). Semiconducting polymerbuckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells. *Applied Pyhsics Letter*, 62, 585-587.

- SAYAMA, K., SUGUHARA, H., ARAKAWA, H. (1998). Photoelectrochemical properties of a porous Nb₂O₅ electrode sensitized by a ruthenium dye. *Chemistry of Materials*, 10, 3825-3832
- SCHILINSKY, P., WALDAUF, C., BRABEC, C.J. (2002). Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors. *Applied Physics Letters*, 81, 3885-3887.
- SCHNITZER, I., YABLONOVITCH, E., CANEAU C., GMITTER, T.J., SCHERER, A. (1993). 30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 63, 2174-2176.
- SERİN, T. (1988). Amorf silisyum güneş pillerinde degrading olayının incelenmesi. Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- SIRRINGHOUS, H., WILSON, R.J., FRIEND, R.H., INBASEKARAN, M., WU, W., WOO, E.P., BRADLEY, D.D.C. (2000). Mobility enhancement in conjugated polymer field-effect transistors through chain alignment in a liquid-crystalline phase. *Applied Physics Letters*, 77, 406.
- SMITH, W. (1873). Effect of light on selenium during the passage of an electric current. *Nature*, 7, 303-310.
- SPANGGAARD, H., KREBS, F.C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83, 125-146.
- SZE, S.M. (1981). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons, New York.
- ŞEN, Z. (2002). *Temiz enerji ve kaynakları*. Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- TAKAHASHI, K., KURAYA, N., YAMAGUCHI, T., KOMURA, T., MURATA, K. (2000). Three-layer organic solar cell with high-power conversion efficiency of 3.5%. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61, 403-407.
- TANG, C.W. (1986). Layer organic photovoltaic cell, *Applied Physics Letters*, 48, 183-185.
- TENNAKONE, K., KUMARA, G.R.R., Kottegoda, I.R.M., Perera, V.S.P. (1999). *Chemical Communications*, 35, 15-16.

- TSOUTSOS, T. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies, *Energy Policy*, 33, 289-296.
- ÜLTANIR, M.Ö. (1996). 21. yüzyılın eşiğinde güneş enerjisi, *Bilim ve Teknik*, 340, 3, 50-55.
- VARINCA, K.B., GÖNÜLLÜ, M.T. (2006). Türkiye’de Güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye.
- WINDER, C., SARIÇİFTÇİ, M.S. (2004). Low bandgap polymers for photon harvesting in bulk heterojunction solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 14, 1077-1086.
- WÜRFEL, P. (2005). *Physics of solar cells: from principles to new concepts*, Wiley, Weinheim.
- YAKIMOV, A., FORREST R.S. (2002). High photovoltage multiple-heterojunction organic solar cells incorporating interfacial metallic nanoclusters. *Applied Physics Letters*, 80, 1667-1670.
- YANG, L., ZHU, R., YANG, Y. (2012). Polymer solar cells. *Nature*, 6, 153-159.
- YOHANNES T., ZHANG F., SVENSSON M., HUMMELEN J.C., ANDERSSON M.R., INGANAS O. (2004). Polyfluorene copolymer based bulk heterojunction solar cells. *Thin Solid Films*, 449, 152-157.
- YU, G., GAO, J., HUMMELEN, J.C., WUDL, F., HEEGER, A. J. (1995). Polymer Photovoltaic, Cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 270, 1789-1793.
- ZAFER, C. (2006). Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi. Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- ZHANG, D., LANIER, S.M., DOWNING, J.A., AVENT, J.L., LUMC, J., MCHALEA, J.L. (2008). Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 195, 72-80.

ZHOU, Z., WU, L., GAO, Y., MA, T. (2011). Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 219, 188-194.

BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİ

Emre ÜNVER^{1,3}, Gamze KARANFİL², Seçkin AKIN³, Savaş SÖNMEZOĞLU^{1,3*}

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Karaman

²Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karaman

³Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Karaman

*İletişim e-mail: svssonmezoglu@kmu.edu.tr

ÖZET

Boya duyarlı güneş pilleri, ümit verici yeni nesil güneş enerjisi dönüşüm aygıtları arasındadır. Bir boya duyarlı güneş pili yarıiletken elektrot, elektrolit, duyarlılaştırıcı ve karşıt elektrot gibi birçok önemli bileşeni kapsamaktadır. Güneş pilinin verimliliği her bir parçasının optimizasyonuna bağlıdır. Bu çalışmada, boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibi, bileşenleri ve performansını arttırmak için bulunan yeni malzemeler ve tasarımlarını içeren son zamanlarda ki gelişmeler özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: boya duyarlı güneş pili, duyarlılaştırıcı, yarıiletken elektrot, elektrolit

ABSTRACT

Dye sensitized solar cells are among the most promising solar energy conversion devices of new generation. A dye sensitized solar cell comprises of many important components which include the semiconductor electrode, electrolyte, sensitizer and counter electrode. The efficiency of the solar cell depends on the optimisation of each components. In this study, the working principle, components of dye sensitized solar cells and some recent advances, which include the finding alternative materials and configurations to improve the performance of them, are reviewed.

Keywords: dye sensitized solar cell, sensitizer, semiconductor electrode, electrolyte

1. GİRİŞ

Bir ülkenin ekonomik zenginliği ve yaşam standartları kalitesine, enerjisini üretmek için kullandığı yakıtı ve teknolojiyle karar verilir (Arjunan, 2012). Bundan dolayı, enerji sistemlerinin altyapısı, dünya genelinde teknolojik ve ekonomik başarılar için esastır (Iha, 2003). Bugün kullanılan enerjinin büyük bir kısmı; kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. 21. yüzyılda, fosil yakıtı dayalı enerji, bilimdeki ilerlemelerden türetilen yeni teknolojileri de birleştirerek oluşturulan yeni enerji sistemleriyle yer değiştirmek zorundadır (Iha, 2003). 2008’de yürütülen bir araştırmaya göre, 2005 ile 2030 yılları arasında dünya enerji tüketiminin %50 artacağı öngörülmüştür (www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html, 2008). Kaynak stoklarına ek olarak, küresel ısınma, çevresel atıklar, benzin fiyatlarındaki artış ve diğer benzer faktörler; kömür, petrol ve doğal gaz gibi yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının yerine yenilenebilir, çevresel olarak duyarlı ve ucuz enerji kaynakları üzerinde araştırmalara yol açmıştır. Günümüzdeki araştırmalar, yenilenebilir alternatif enerjilerdeki gelişmeler üzerine yoğun bir şekilde odaklanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları çeşitleri; hidrogüç, dalga gücü, termal gradyan, biyokütle, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisini kapsamaktadır. Bu enerji çeşitleri sadece yenilenebilir değil aynı zamanda hepsi çevre dostudur (Sönmezoğlu, 2012).

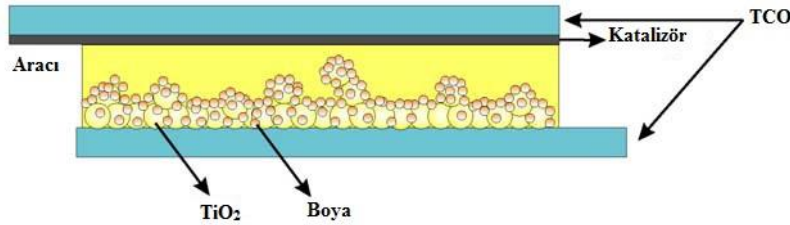
Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında en dikkat çeken enerji kaynağı, güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, gücün ana kaynağıdır çünkü dünyadaki yaşam güneşe bağlıdır (Arjunan, 2012 ve Sönmezoğlu, 2012). Dünya üzerinde bulunan birçok enerji formu için birincil kaynak olan güneş enerjisi temiz, bol ve yenilenebiliridir. Bu özelliklerinden dolayı enerji kaynağımızı çeşitlendirme, fosil yakıtlara bağımlılığımızı azaltma, nefes aldığımız havanın kalitesini artırma ve ekonomimizi uyarma yönleriyle de dünyaya yarar sağlamak için büyük bir potansiyeli elinde tutmaktadır (Nwanya, 2011).

Güneş ışığını direk olarak elektrik gücüne dönüştürebilen fotovoltaik piller, temiz enerjinin yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynakları içerisinde en çok ümit veren aygıtlardan bir tanesidir (Green, 2000 ve Yamaguchi, 2001). Geçen birkaç on yılda güneş pilleri teknolojisinde gerçekleşen önemli gelişmelere rağmen, güneş pillerinin üretimindeki yüksek maliyet büyük ölçekli güneş enerjisi uygulamaları için sınırlayıcı faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, üretilen güneş pillerinin daha düşük maliyete sahip olması için yeni malzemelerin ve tasarımların geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Sönmezoğlu, 2012). Geçtiğimiz yüzyılın son

yıllarında katı hal p-n kavşağı aygıtlarına dayalı teknoloji hakim olmasına rağmen, fotovoltaiğin yeni nesiller şimdi ortaya çıkmaktadır (Polo, 2004). Klasiklere alternatif, gelecek vadeden inorganik p-n kavşağı güneş pilleri, 1991’de O’Regan ve Grätzel tarafından tanıtılan nanogözenekli, boya duyarlı güneş pillerinin (BDGP) genel tanımıdır (O’Regan, 1991). Boya duyarlı güneş pilleri, düşük maliyeti, düşük ışık koşullarındaki verimliliği ve görünür ışık spektrumu üzerindeki soğurması nedeniyle, gelecekte enerjinin umut verici bir kaynağı olacağı düşüncesiyle son yıllarda yoğun bir biçimde araştırılmaktadır. Bu çalışmada, boya duyarlı güneş pillerinin çalışma prensibi, bileşenleri ve performansını arttırmak için bulunan yeni malzemeler ve tasarımlarını içeren son zamanlarda ki gelişmeler özetlenmiştir.

2. BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Tipik bir boya duyarlı güneş pilinin yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. Aygıt, cam veya polimerik esnek taban alttaşlar üzerinde FTO gibi iki adet şeffaf iletken oksit (TCO) ile oluşturulur (Hagfeldt, 1995 ve Grätzel, 2000). Bir TCO fotoanottur ve nanokristal yarıiletken elektrodun (genellikle nanoyapılı TiO_2) yüzeyine adsorblanmış duyarlılaştırıcıdan ibarettir. Diğer ise, ince bir tabaka katalizör (örneğin, platin) ile fotoinert karşıt elektrottur. Elektrolit/aktarma aracı (genellikle I_3^-/I^- içeren çözelti) bu iki elektrodun arasına sıkıştırılır (Polo, 2004).

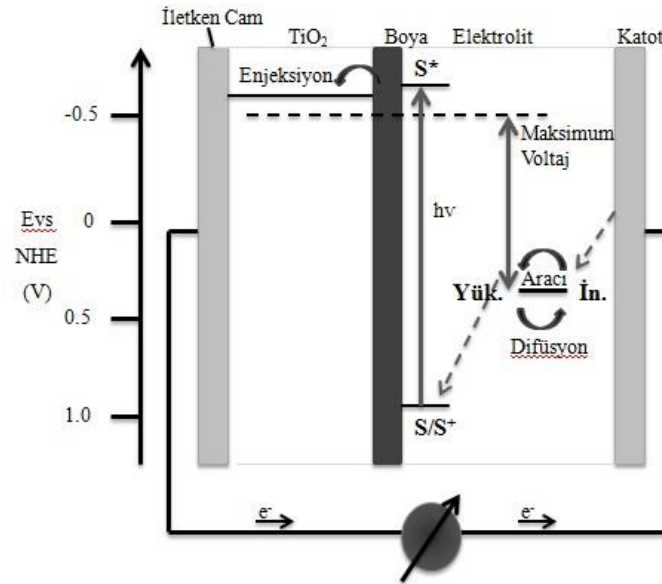


Şekil 1. Boya duyarlı güneş pili ve bileşenleri (Polo, 2004)

Sistemin kalbi, elektronik iletkenliğin meydana gelmesine olanak sağlamak için beraber sinterlenmiş nanometre-boyutunda parçacıkları içeren mezofor oksit tabakadır. ZnO (Tennakone, 1999) ve Nb_2O_5 (Sayama, 1998) gibi alternatif geniş band aralığına sahip oksitler araştırılmış olmasına rağmen, TiO_2 (anataz) seçilmiş malzemedir. Nanokristal filmin yüzeyine eklenen, tek katmanlı yük aktarıcı boyadır. Boyar maddenin foto uyarımı, oksit malzemeye ait iletkenlik bandı içerisine elektronun geçmesine yol açar. Boya kaybettiği elektronunu, genellikle iyodür/triiyodür çifti gibi redoks sistemi içeren organik çözücü olan elektrolitten, elektron bağıışı ile geri alır. Boyar maddenin iyodür ile yenilenmesi, iletkenlik bant elektronunun oksit boya tarafından yeniden yakalanmasını engeller. İyodür, triiyodürün

karşıt elektrotta indirgenmesiyle yeniden oluşur ve çevrim, elektronun dış devreden taşınmasıyla tamamlanır. Aydınlatma altında üretilen voltaj, katıda ki elektronun Fermi seviyesi ile elektrolitin redoks potansiyelinin arasındaki farka karşılık gelir. Güneş pili ışıktan, hiçbir kalıcı kimyasal dönüşüm olmadan elektrik enerjisi üretir (Grätzel, 2003).

Bir boya duyarlı güneş pilinin işleyiş prensiplerinin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Duyarlılaştırıcının (S) foto-uyarımı mezofor oksit yarıiletkenin iletkenlik bandı içine elektron enjeksiyonu tarafından takip edilir. Boya molekülü, yük aracılığıyla geçen elektronlar ile karşıt elektrotta kendi kendini yenileyen redoks sistem tarafından yeniden üretilir. Potansiyeller normal hidrojen elektroduna (NHE) sevk edilir. Güneş pilinin açık devre voltajı, kesik çizgi ile gösterilen nanokristal filmin, Fermi seviyesi ile elektrolitin redoks potansiyeli arasındaki farka denk gelir (Grätzel, 2003).

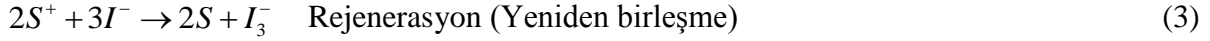


Şekil 2. Boya duyarlı nanokristalin güneş pilinin işleyiş prensibi ve enerji seviyesi şeması (Grätzel, 2003)

Boya duyarlı güneş pilindeki işletme çevrimi kimyasal reaksiyon terminolojisiyle şu şekilde özetlenebilir (Matthews, 1996) :

Anot:





Katot:



Hücre:



Boya duyarlı güneş pili doğası gereği yenileyicidir, bundan dolayı çalışma çevrimi boyunca, hücre reaksiyonunda da gösterildiği gibi (5), herhangi bir kimyasal maddenin üretimi veya harcanması söz konusu değildir.

3. BOYA DUYARLI GÜNEŞ PİLİNİN BİLEŞENLERİ

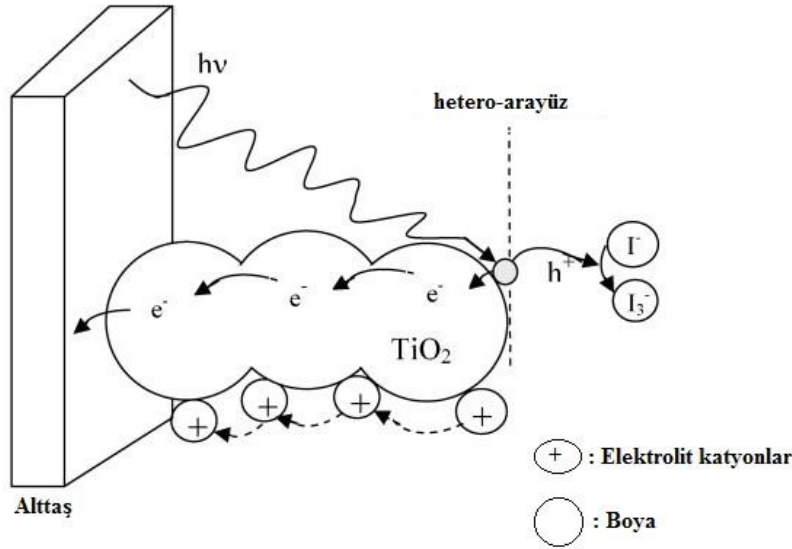
Daha önce bahsedildiği üzere bir boya duyarlı güneş pili, yarıiletken oksit film elektrot, boya duyarlılaştırıcı, elektrolit, karşıt elektrot ve şeffaf iletken alt tabakadan meydana gelir. Pilin ışıktan enerjiye dönüşüm performansı, yarıiletkenin ve boyanın enerji seviyesine ve duyarlılaştırılmış yarıiletken/elektrolit ara yüzünde ilerleyen elektron transfer kinetiğine bağlıdır. Bu işlemlerin hızı da bileşenlerin özelliklerine bağlıdır. Boya duyarlı güneş pilinin bileşenleri üzerinde, pil veriminin artırılması amacıyla, yıllardır çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir. Şimdi güneş pilinin bileşenlerini ayrı ayrı inceleyelim.

3.1. Yarıiletken Oksit Film

Genellikle %50 gözenekli ve 1 µm kalınlığında olan yarıiletken yapı, aynı boyutta yapısal olmayan elektrot gibi düz bir alandan, boyanın kimyasal soğurumu için bin kat daha uygun yüzey alanına sahiptir. Boyanın tek katman olarak kimyasal soğurumu gerçekleşirse, gelen ışığın tamamının soğurumunu sağlamak için, elektrodun verilen alanında tutunan miktar yeterli olabilecektir. Boya duyarlı güneş pillerinde gelen ışıktan daha fazlasını soğurabilmek için gerekli olan şey geniş iç yüzey alanı ile özenle yapılandırılmış malzemelerden oluşan yarıiletkenin geliştirilmesidir (Narayan, 2012).

Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılan yarıiletken oksitler, iletken alt tabakaya elektron transfer aracı olarak geniş yüzey alanı kullanılan duyarlılaştırıcının tek katmanı için taşıyıcı işlevini gören titanyum dioksit (TiO₂) (Haiying, 2004 ve Greg, 1998), çinko oksit (ZnO) (Law, 2005 ve Doh, 2011), kalay dioksit (SnO₂) (Tosun, 2012), niyobyum oksit

(Nb₂O₅) (Toru, 2012) vb. malzemeleri kapsamaktadır. Düşük maliyeti, piyasada ki bolluğu, toksik olmayan yapısı ve biyo uyumluluğundan ötürü ve ayrıca diğer yarıiletken oksitlerden daha yüksek performans sergilediği için, TiO₂ boya duyarlı güneş pilleri için şimdiye kadarki en iyi seçenek haline gelmiştir. TiO₂ geniş bant aralığına sahip bir yarıiletkendir ($E_g \approx 3.2$ eV) (Nwanya, 2011). Boya duyarlı güneş pillerinde fotoelektrot olarak kullanıldığı zaman TiO₂'nin boya soğurumu ve mikroyapısı önemli özellikleri haline gelir. TiO₂ rutil, anataz ve brukit olarak üç kristal formda meydana gelir. Anataz, pramit benzeri kristal gibi görünür ve düşük sıcaklıklarda karardır. Halbuki iğne benzeri rutil kristalleri yüksek sıcaklık işlemlerinde zorla oluşturulur. Rutile, yakın UV bölgesinde gelen ışığın % 4'ünü soğurur ve bant aralığı eksitasyonunda meydana gelen delikler, boya duyarlı güneş pillerinin uzun dönem kararlılığını azaltan kuvvetli oksidantlar olarak hareket ederler. Brukit üretmesi zordur ve bu yüzden boya duyarlı güneş pillerinde uygulaması düşünülmemiştir (Tang, 2009).



Şekil 3. Nanokristal TiO₂ ağ örgüsünde yük taşıyıcı oluşumu ve iletimi (Arjunan, 2012)

Şekil 3 boya ile modifiye edilmiş nanokristal TiO₂ ağ örgüsündeki yük üretimini ve taşınmasını göstermektedir. Nanokristal TiO₂ ağ örgüsü, elektron enjeksiyon (TiO₂/boya) ve toplama (Alttas/TiO₂) bölgesi arasındaki iletken yol olmakla beraber boya molekülü için destek ortam gibi davranır. Elektronların iletimi yük dengesizliğine yol açar ve üstelik elektrolit içinde katyonları sürükleyen elektrik alanını yaratır.

Boya hassasiyetli güneş pili ilk kez 1991 yılında İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsünden Prof. Dr. Michael Grätzel tarafından, gözenekli ince film nano kristal yapılı

TiO₂ üreterek rutenyum bipiridil kompleks boyalarla üretilmiştir. Elde edilen bu pillerden %10 verim elde etmiştir (O'Regan, 1991).

1999 yılında Masayuki Okuya ve arkadaşları, kimyasal püskürtme (Spray Pyrolysis Deposition) tekniğiyle, 2-butanol çözücüsü kullanarak titanyum(IV)oksi asetilasetonat çözeltisi elde etmiş ve TiO₂ ince film üretmişlerdir. Elde edilen film yüzeyinin gözenekli olması için çözeltinin içerisine aliminyum (III) asetilasetonat (AA) eklemiştir. Aynı teknik ile iletken ve geçirgen kalay oksit flor üreterek boya hassasiyetli güneş pili üretmişlerdir. Bu pillerden elde edilen enerji dönüşüm etkisi çözelti % 0,6 aliminyum (III) asetilasetonat içerirken % 3,2 olarak hesaplanmıştır. Bu oranda AA içeren çözelti ile elde edilen sonuçlarda TiO₂ tabakasının yüzeyine bağlanan boyar madde miktarının en fazla olduğu saptanmıştır (Okuya, 1999).

M. Grätzel, 2000 yılında ince film teknolojisi kullanarak TiO₂ tabanlı boyar maddeli güneş pili üretmiştir. Yapılan bu çalışmada BDGP'nin verimi % 10 olarak bulunmuştur (Hagfeldt, 2000).

Mane ve ark. 2006 yılında yaptıkları çalışmada, ince film teknolojisi kullanarak CdO tabanlı boyar maddeli güneş pili üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, CdO ince filmlerinin kullanıldığı boya duyarlı güneş pillerinde verimin N3 boyanın soğurulmasına bağlı olarak % 0.24'ten % 2.95'e yükseldiği gözlenmiştir (Mane, 2006).

Jang ve arkadaşları 2007 yılında yaptıkları çalışmada, N3 boyayı poliakrilik aside (PAA) bağlamak için bağlayıcı olarak etilendiamin (en) kullanmışlardır. Modifiye TiO₂ (PAA-en-N3/ TiO₂) kullanılarak hazırlanan BDGP verimi (AM 1,5 aydınlatma altında, 100 mW/cm²), geleneksel N3/ TiO₂ kullanılarak hazırlanmış BDGP verimiyle karşılaştırıldığında, % 5.7'den % 6.3'e bir artış sağlandığı gözlenmiştir (Jang, 2007).

2011 yılında Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, 200-250 nm ZnO partiküllerini ağırlıkça %5 olacak şekilde 5 nm SnO₂ kolloid yapısına ekleyerek nano tanecikli ZnO-SnO₂ kompozit elektrotları elde edilmiştir. Nano tanecikli SnO₂ elektrodunu elde etmek için ZnO partikülleri asetik asit ile uzaklaştırılmıştır. Geleneksel SnO₂ elektrodunun kullanıldığı %1.66'lık BDGP verimiyle karşılaştırıldığında, kompozit elektrotlarının kullanıldığı BDGP'inde elde edilen verim %3.96 ve SnO₂ elektrodunun kullanıldığı BDGP'inde elde edilen verim ise %2.98 olarak bulunmuştur (Lee, 2011).

Li ve arkadaşları 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada, 3 katlı ZnO yapısını boya duyarlı güneş pillerinde foto anot olarak kullanmak için üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre 3 katlı ZnO foto anotlarının kullanıldığı BDGP’inde verimin 2 katlı ZnO foto anotlarının kullanıldığı BDGP’ne göre %14 artarak %1.04’ten %1.18’e , tek katlı ZnO foto anotlarının kullanıldığı BDGP’ne göre ise %76 artarak %0.67’den %1.18’e yükseldiği görülmüştür (Li, 2013).

Bakhshayesh ve Mohammadi 2013 yılında yaptıkları çalışmada, güneş pili uygulamasında kullanmak üzere ince nanoyapılı TiO₂ filmleri hazırlamak için düşük maliyetli, kolay polimerik jel işlemini kullanmışlardır. Rutenyum (II) boyası ve redoks elektrolit olarak asetonitril içinde 0.6 M dimetilpropilimidazoliyum iyodit, 0.1M LiI, 0.05M I₂, ve 0.5M 4-tertbutilpridin kullanılarak güneş pilleri hazırlanmıştır. Polimerik jel işlemiyle hazırlanan BDGP % 6.21’lik verimiyle geleneksel TiO₂ pastadan daha yüksek sonuç göstermiştir (Bakhshayesh ve Mohammadi, 2013).

3.2. Elektrolit

Elektrolit, boya duyarlı güneş pilleri için anahtar bileşenlerden bir tanesidir ve elektrolitin özellikleri güneş pillerinin kararlılığı ve dönüşüm verimliliği üzerinde fazlaca etkiye sahiptir. Ayrıca elektron enjeksiyonu; elektrolitin indirgenme kabiliyetine bağlıdır. Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılan elektrolitler sıvı elektrolit, yarı katı hal elektrolit ve katı elektrolit olarak 3 gruba ayrılır (Nwanya, 2011). Sıvı elektrolitler kullanılan çözücüye göre kendi içerisinde iyonik sıvı elektrolit ve organik çözücü elektrolit olarak ikiye ayrılır. Organik çözücü elektrolitler düşük viskoziteleri, hızlı iyon difüzyonları, yüksek verimlilikleri, kolay hazırlanışları ve nanokristal film elektrotta hızlı yayılmaları dolayısıyla boya duyarlı güneş pillerinde geniş oranda kullanılmakta ve araştırılmaktadır (Shi, 2008, Baik, 2009, Kim, 2009 ve Cerneaux, 2008). İyonik sıvı elektrolitler organik çözücü elektrolitlerden daha iyi kimyasal ve ısıl kararlılığa sahiptirler (Guillen, 2008, Kuang, 2008 ve Kawano, 2007).

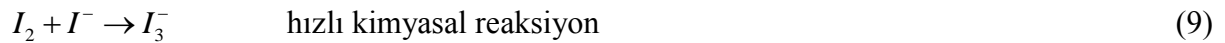
Kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre voltajı (V_{oc}) elektrolite önemli ölçüde bağlıdır. Boya duyarlı güneş pillerinde en çok kullanılan elektrolit, karşıt elektrot ile fotoelektrot arasında ki elektronlara aracılık eden I^- / I_3^- redoks iyonlarını içerir. Boya duyarlı güneş pillerinde ilk kullanılan organik sıvı elektrolit lityum iyodid/iyot içermekteydi. Organik çözücü sıvı elektrolitlerin ana bileşenidir çünkü I^- / I_3^- çözünmesi ve difüzyonu için ortam

sağlamaktadır. Donör sayısı, dielektrik sabiti ve viskozitesi gibi fiziksel parametreleri pilin verimini etkilemektedir (Wu, 2008).

Elektrolit, elektrotlarda (3) ve (4) reaksiyonlarını besleyen I^- ve I_3^- için nötr bir havuzdur ve I^- / I_3^- çiftinin hızlı redoks reaksiyonu aracılığıyla elektrolit yığını içindeki redoks potansiyelini sürdürür. Elektrolit içindeki bu redoks reaksiyonu iki elektron reaksiyonudur (Ferber, 1998):



Birbirini izleyen reaksiyon serilerinden oluşan:



Boya duyarlı güneş pillerinde önemli bir sınırlama, I^- / I_3^- redoks çiftlerini içeren elektrolitin uçuculuğu ve sıvı elektrolitin kaplamasındaki problemlerdir. Bu problemlerin üstesinden gelmek için bazı girişimlerde bulunulmuştur. I^- / I_3^- redoks çiftiyle yer değiştirmesi için Kobalt II (Co(II)) ve Kobalt III (Co(III)) araştırılmış, fakat performansı I^- / I_3^- redoks çifti kadar iyi bulunmamıştır (Cameron, 2004). Bromür (Br^- / Br_2) ve hidrokinon boya duyarlı güneş pillerinde redoks elektrolit olarak kullanılmış, fakat iyodin redoks elektroliti en iyi performansı vermiştir (Luque, 2003).

Polimerik veya jel malzemeler kullanarak yarı katı elektrolit oluşturmak için sıvı elektrolitin katılaştırılması başka bir seçenektir (Bhattacharya, 2009, Biancardo, 2006 ve Thavasi, 2008). Poli-elektrolitlerin kullanılmasına yönelik yapılan bazı erken çalışmalarda, oda sıcaklığında kristallenme eğilimi gösteren lityum klorat-poli (etilen oksit) kompleksleri kullanılmıştır (Armand, 1979). Chittibabu ve arkadaşları, metal iyonlarını ve özellikle lityum iyonlarını çalıştırarak poli (4-vinilpridin) gibi polimerik malzemelerin çapraz bağlanmasıyla jel elektrolit hazırlamışlardır. Jel elektrolitin birleşik boya duyarlı güneş pillerinde ki performansı lityum iyonu içeren iyonik sıvı elektrolit ile büyük ölçüde benzer çıkmıştır (Chittibabu, 2002). Park ve arkadaşları, boya TiO_2 kaplı elektrot üzerinde bal peteği yapısı tasarlamışlar ve sıvı elektroliti yapının gözeneklerine ekleyerek yarı katı elektrolit oluşturan

hareketsiz sıvı elektrolit elde etmişlerdir. Pilin dönüşüm verimi % 8 olarak gözlemlenmiştir (Park, 2009).

Sızdırma problemlerine karşı koymak için önerilen başka bir alternatif, katı hal delik iletkenlerinin redoks elektrolitiyle yer değiştirmesidir. Kullanılan bazı iletkenler, CuI, CuSCN, spiro-OMeTAD, AV-DM, AV-OM ve anilin oligomerleridir (Senadeera, 2005, Shozo, 2009, Kim, 2006 ve Grätzel, 2003). Sıvı hal ve katı hal arasındaki ana fark yük transferi doğasıdır. Sıvı halde difüzyon ile kontrol edilen iyonik transfer baskın gelirken katı halde, iletkenlikten ve yük taşıma hareketliliğinden etkilenen elektronik transfer kesin rol oynar (Nwanya, 2011).

Matsui 2004 yılında yapmış olduğu çalışmada, iyonik ve jel bazlı sıvı elektrolit çözeltileri kullanılarak 100 mm×100 mm boyutlarında TiO₂ yarıiletken BDGP üretmiştir. İyonik bazlı sıvı elektrolit kullanılarak elde edilen pilde verim % 2,7 olup iyonik jel sıvı elektrolit kullanıldığında ise verim % 2,4 olarak kaydedilmiştir (Matsui, 2004).

Nogueira ve arkadaşları 2004 yılında, çalışma ve karşıt elektrotu birbirine yapıştırma ve sıvı elektrolitin pil dışına sızma problemlerinden uzaklaşmak için polimer bazlı güneş pilleri üzerine çalışma yapmıştır. Sıvı elektrolit yerine boşluk iletken malzeme olarak polimer (ethylene terephthalate) bazlı katı elektrot kullanılarak boyar maddeli güneş pili üretilmiştir. Pilden alınan ölçümler sonucunda J_{sc} : 4,2 mA/cm², V_{oc} : 0,82 V ve η : % 1,6 olarak kaydedilmiştir (Nogueira, 2004).

Wang ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada, katı hal boya duyarlı güneş pilleri için tek-iyon iletim elektroliti olarak PAI (poli(1-alkil-3-(akriloyloksi)hexylimidazoliyum iyodit) sentezlemişlerdir. N3/TiO₂/FTO kombinasyonu ve iyodin katkısı olmadan PAI elektrolit kullanılarak hazırlanan BDGP % 5.29 verimlilik göstermiştir (Wang, 2012).

Sönmezoğlu ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada doğal boyalar kullanarak hazırladıkları BDGP'lerinde Fe^{2+} / Fe^{3+} (ferrosen) sıvı elektrolit kullanmışlardır. Kantaron ekstraktının boyar madde ve ferrosenin elektrolit olarak kullanıldığı BDGP % 2.17 verimlilik göstermiştir (Sönmezoğlu, 2012).

3.3. Boyar Maddeler

Boya duyarlı güneş pillerindeki duyarlılaştırıcı boyanın rolü, moleküler elektron pompası gibi davranmayı içerir. Boya, görünür ışığı soğurur, elektronu yarıiletkene pompalar ve çözeltideki redoks çiftinden elektron kabul eder ve sonra döngü tekrarlanır.

Bir boyar maddede bulunması istenen özellikler şu şekilde özetlenebilir:

Soğurma: Boya görünür bölgenin tamamının yanında yaklaşık 920 nm'ye kadar ki dalga boylarında ışığı soğurabilmelidir. Örneğin; boyar maddenin enerji bant aralığı, tekil bant aralığı güneş pilinin ideal bant aralığına denk gelen, yaklaşık olarak 1.35 eV olmalıdır (Green, 1982).

Enerji Bilgisi: Enerji kayıplarını minimuma indirmek ve fotovoltajı maksimum yapmak için, yüzeye tutunmuş boya molekülünün uyarılmış hali TiO₂'nin iletkenlik bant kenarının biraz üzerinde olmalıdır. Ayrıca elektron enjeksiyon işlemi için yeterince yüksek, kuvvetli itici gücü bulunmalıdır. Aynı nedenden dolayı, boyar maddenin valans bandı elektrolitin redoks potansiyelinin biraz altında olmalıdır (Sönmezoğlu, 2012).

Kinetik: Uyarılmış halden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron enjeksiyon işlemi; rakip, istenmeyen relaksasyon ve reaksiyon yollarını aşmak için yeterince hızlı olmalıdır (Sönmezoğlu, 2012).

Kararlılık: Yüzeye tutunmuş boya molekülü, güneş ışığına maruz bırakıldığında yaklaşık olarak 20 yıl dayanabilmesi için çalışma ortamında (yarıiletken-elektrolit ara yüzeyinde) yeterince kararlı olmalıdır (Hagfeldt, 2000).

Ara yüz Özellikleri: Yarı iletken yüzeye iyi tutunabilmesi gerekir.

Pratik özellikler: Boya molekülünün yüzeye tutunması için kullanılan çözücüde yüksek çözünürlülük göstermelidir (Sönmezoğlu, 2012).

Boya duyarlılaştırıcılar temelde 'organik boyalar' ve 'inorganik boyalar' olarak ikiye ayrılabilir. İnorganik boyalar ısı bozunum gibi organik boyalar için az olan özelliklerde daha iyi sonuçlar verirler. Bu amaç için kullanılan inorganik boyalar çoğunlukla, Rutenyum, Osmiyum, İridyum'un kompleksleri gibi metal kompleks boyalardır. Organik boyalar ise, meyve boya ve doğal ekstre boyalardır (Karmakar, 2011). Rutenyum komplekslerinin yüksek maliyeti ve bu soy metallerin az bulunurluluğu nedeniyle, boya duyarlı güneş pilleri için daha düşük maliyetli ve verimli duyarlılaştırıcılar olarak kullanılacak doğada hazır bulunan boyalar ile ilgili araştırmalar hızlandırılmıştır. Ancak halen dönüşüm verimi,

dayanımı veya uzun dönem kararlılığı gibi parametrelerin düşük olması bilimsel bir sorun olarak devam etmektedir (Yamazaki, 2007). Rutenyum bazlı boyalardan bazılarının fotoelektrokimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda verilen Rutenyum komplekslerinin dışında birçok Rutenyum bazlı boya duyarlılaştırıcılar araştırılmıştır.

Tablo 1. Rutenyum komplekslerine dayalı boya duyarlılaştırıcılar ve fotoelektrokimyasal özellikleri

Boya	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)	Kaynak
N3	18.20	720	0.730	10.00	(Wei,2011)
N719	17.73	846	0.750	11.18	(Funaki,2009)
Siyah boya	20.53	720	0.704	10.40	(Polo,2004)
Z907	13.60	721	0.692	6.80	(Grätzel, 2005 ve Onozawa, 2011)
K8	18.00	640	0.750	8.64	(Onozawa,2009)
K19	14.61	711	0.671	7.00	(White,2011)
N945	16.50	790	0.720	9.60	(Sivakumar,2009)
Z910	17.20	777	0.764	10.20	(Kuang,2006)
K73	17.22	748	0.694	9.00	(Sahin,2008)
Z955	16.37	707	0.693	8.00	(Islam,2000)

Boya duyarlı güneş pillerinin yüksek verimliliği, iyi ayarlanmış sayısız fiziksel-kimyasal nanoölçekli özelliklerin kolektif etkisiyle oraya çıkarken, ana sorun geniş bant aralıklı yarıiletken elektrotların boya duyarlılaşmalarının temelidir. Daha önce bahsedildiği gibi, boya duyarlı güneş pillerinde bu, gelen fotonu soğurmak için ayarlanmış özel boya molekülleri ile gözenekli TiO₂ elektrodunun iç yüzeyinin kaplamasıyla gerçekleştirilmiştir. Çok fazla sayıda doğal boya bulunmaktadır. Bunlar arasında ağaç boyaları, boya duyarlı güneş pillerinde şuan uygulanan duyarlılaştırıcıların bel kemiği olarak düşünülebilir (Arjunan, 2012). Meyvelerden, çiçeklerden ve bitki yapraklarından ekstre edilen doğal boyalar, nadir bulunan metal komplekslerinden ve diğer organik boyalardan daha çok avantaja sahiptir. Doğal boyalar kolaylıkla bulunabilir, ekstre edilmesi kolaydır, ilave arıtmaya gerek yoktur,

çevre dostudur ve düşük maliyetlidir. Tüm dünyada doğal boyaları, boya duyarlı güneş pillerinde duyarlılaştırıcı olarak değerlendirmek için çalışan birçok araştırma grubu vardır. Tablo 2’de bazı doğal boyalar ve fotoelektrokimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Doğal boya duyarlılaştırıcılar ve fotoelektrokimyasal özellikleri

Boya	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)	Kaynak
Kantaron	13.44	750	0.64	2.17	(Sönmezoğlu,2012)
Bamya çiçeği	1.63	400	0.57	0.37	(Wongcharee,2007)
Biksin	1.10	570	0.59	0.37	(Gómez-Ortiz,2011)
Krosetin	2.84	430	0.46	0.56	(Yamazaki,2007)
Kırmızı Sicilya portakalı	3.84	340	0.50	-	(Calogero,2008)
Pitaya	0.20	220	0.30	0.22	(Ram,2010)
Nar suyu	0.20	400	0.45	1.50	(Bazargan,2009)
Kırmızı turp	9.50	430	0.37	1.70	(Calogero,2010)
Begonya	0.63	540	0.72	0.24	(Fernando,2008)
Kırmızı begonvil	2.34	260	0.74	0.45	(Zhou,2011)
Ispanak	0.47	550	0.51	0.13	(Hernández-Martínez,2010)

1993 yılında Nazeerruddin ve arkadaşları tarafından N3 adı verilen cisdi(thiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4-4'-dicarboxylate)ruthenium(II) boyası keşfedilmiştir. İnce film nano kristal yapılı TiO₂ bazlı fotoelektrokimyasal hücre ile (AM 1,5 aydınlatma altında) % 10 verime ulaşmışlardır (Nazeerruddin, 1993).

Cherapy ve ark. 1997 yılında antosiyanin (anthocyanine) içeren boyar maddeler kullanılarak boyar maddeli güneş pillerinin foto elektrokimyasal özelliklerini incelemiştir. Boyar madde olarak antosiyanin içeren böğürtlen kullanarak TiO₂ boyar maddeli güneş pili elde etmişler ve fotovoltaiik etkilerini incelemişlerdir. Metanol/asetik asit/su (25:4:21)

karışımı kullanılarak böğürtlenin doğal boyası çıkartılmıştır. TiO₂ toz (Degussa P25, ortalama büyüklüğü 10-50 nm) pasta hazırlanarak SnO₂:F (FTO) kaplı cam üzerine (10-15 Ω/cm) kaplanmış, iyodür-triiyodür (I^- / I_3^-) çifti içeren sıvı elektrolit kullanılarak BDGP elde edilmiştir. 0,9 cm² aktif bölgeye sahip olan pilden alınan ölçümler sonucunda (1,5 AM-1000W/m²) açık devre gerilimi 0,4-0,45 V, kısa devre akımı 1,5-2,2 mA/cm² olarak ölçülmüş ve verim % 0,56 olarak hesaplanmıştır (Cherapy, 1997).

Hao ve ark., 2006 yılında yaptıkları çalışmalarında, siyah pirinç (black rice), kırmızı biber (capsium), mercan ağacının kırmızı çiçeği (erythrina), orkide çiçeği (variegata flower), kanarya kuş gülü (rosa xanthina) ve yosun (kelp) alkol içerisinde bekleterek boyaları çıkartılmış, UV spektroskopileri incelendiğinde kanarya kuş gülü ve siyah pirincin antosiyanin, mercan ağacının kırmızı çiçeği ve kırmızı biber karoten, orkide çiçeği ve yosunun klorofil içerdiği tespit edilmiştir. Antosiyanin molekülü hidroksil ve karbonil gruplarının yardımıyla TiO₂ yarı iletken yüzeye bağlanabilmektedir. Fakat klorofil ve karoten yarı iletken oksit yüzeye tutunamamaktadır. Dolayısıyla boyar maddenin içerdiği kimyasal yapı pil enerji dönüşümünü etkilemektedir. Alınan ölçümler sonucunda en iyi fotovoltaik etkiyi siyah pirinç boyar maddesiyle yapılan pil göstermiştir. Alınan ölçüm değerleri V_{oc}:0,551 V, I_{sc}:1,142 mA, P_m: 327 μW ve doluluk oranı 0,52 olarak kaydedilmiştir (Hao, 2006).

Zhang ve ark. tarafından 2008 yılında, doğal betalain pigmentleri içeren kırmızı pancar köklerinden elde edilen boyar maddenin 535 nm'de görünür bölgede güneş absorpsiyonunun olduğu gözlemlenmiştir. Sıvı elektrolit olarak metoksypropiyonitril içeren I^- / I_3^- sıvı elektrolit kullanılarak elde edilen BDGP'den alınan ölçümler ise J_{sc}: 2,42 mA/cm² and V_{oc}: 0,44 V olarak kaydedilmiştir (Zhang, 2008).

Zhao ve ark. 2011 yılında, çiçek, yaprak, meyve, geleneksel Çin ilaçları ve içecekleri gibi doğal malzemelerden ekstre edilen yirmi çeşit doğal boyayı boya duyarlı güneş pillerinde (BDGP) kullanmışlardır. Bu boyalara dayalı boya duyarlı güneş pillerinin fotoelektrokimyasal performansı göstermiştir ki açık devre voltajı V_{oc}: 0.337 ile 0.689 V arasında ve kısa devre akım yoğunluğu J_{sc}: 0.14 ile 2.69 mA/cm² arasında değişmiştir. En yüksek V_{oc} değeri olan 0.686 V mangostan pericabından ekstre edilen boyadan elde edilmiştir (Zhao, 2011).

2013 yılında, Igbal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, fenotiyazin farklı zincir uzunluklarında alkolsilerle modifiye edilerek yeni boyalar sentezlenmiştir. FTO üzerine TiO₂

pasta kaplanarak hazırlanan çalışma elektrotları 16 saat boyunca hazırlanan boyalara daldırılmış ve karşıt elektrot olarak Pt/FTO kullanılarak BDGP oluşturulmuştur. BDGP'den alınan ölçümler J_{sc} : 10,35 mA/cm², V_{oc} : 0,802 V ve η : % 5,73 olarak kaydedilmiştir (Igbal, 2013).

3.4. Karşıt Elektrot

Boya duyarlı güneş pillerinde karşıt elektrot olarak kullanılan malzeme için gereken ön koşul, düşük yük transfer direncine ve yük aracından oksidasyonun azalması için yüksek değişim akım yoğunluğuna sahip olmasıdır (Anandan, 2007). Karşıt elektrot, dış devreden dolaşan elektronların redoks elektrolitine dönmesi için transfer edici görevini görür. Ayrıca, her bir güneş pili genişliği üzerinden fotoakımı taşımak zorundadır. Bunun sonucu olarak, çok iyi iletken olmalıdır ve redoks çiftlerinin indirgenmesi için düşük aşırı gerilim sergilemelidir. Şimdiye kadar Platin (Pt), I_3^- indirgenmesi için çok iyi bir katalizör olmasından dolayı, karşıt elektrotta kullanım için gerekli malzemedir (Luque, 2003).

Düşük maliyetiyle platine alternatif malzeme, karbon (C) 'dur, çünkü yeterli iletkenliği ve aşınma direnci yanı sıra ısı direnci ve I_3^- indirgenmesi için elektrokatalitik aktifliği özelliklerini birleştirir (Kay, 1996). Sıvının dağıtım ve kurutulmasından oluşan birikim üzerindeki kristaller gibi plakadan meydana gelen grafit tozlarından kolaylıkla hazırlanan gözenekli karbon elektrotları, karşıt elektrotların yüzeyinde tercihen sıralanacak ve bu yüzeyde yüksek iletkenliğe neden olacaktır. Boya duyarlı güneş pillerinde kullanılan Pt/C siyah karşıt elektrodu, güneş aydınlatması altında % 6.72 verim sağlamıştır. Pt/C siyah karşıt elektrodu, sadece Pt elektrot ile karşılaştırıldığında benzer verimlilik ve düşük maliyet göstermiştir (Li, 2009).

Karbon nano tüpler yüksek mekanik dayanımları, ısı kararlılıkları, geniş yüzey alanları ve iyi elektriksel özellikleri nedeniyle umut verici malzemeler arasında gösterilmektedir. Özellikle tek katmanlı karbon nano tüp (SWCNT) ve çok katmanlı karbon nano tüplerin (MWCNT) hızlı elektron transfer kinetikleri, geniş yüzey alanları ve elektrokatalitik etkinlikleri nedeniyle BDGP'inde platine alternatif bir malzeme olabilecekleri çalışmalarda gösterilmiştir.

Suzuki ve arkadaşları 2003 yılında, boyar maddeli güneş pillerinde karşıt elektrotun etkisini incelemek için karbon nano tüp sayıcı elektrot üreterek BDGP'ne uygulamışlardır.

Tek katmanlı karbon nano tüp (SWCNT) karşıt elektrot kullanılarak elde edilen BDGP'nin enerji dönüşüm etkisi % 4,5 olarak kaydedilmiştir (Suzuki, 2003).

Munkhbayar ve arkadaşları 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada, çok katmanlı karbon nano tüpü (MWCNT) BDGP'inde elektrokatalist olarak kullanmışlardır. Karşıt elektrodun standart Pt kullandığı BDGP verimi % 5.08 olarak kaydedilirken, MWCNT kullanılan BDGP'nin dönüşüm verimi % 4.94 olarak bulunmuştur (Munkhbayar, 2012).

Son yıllarda BDGP'inde karşıt elektrot olarak kullanılabilir ve düşük maliyetiyle platine alternatif olabilecek malzemeler arasında, güçlü mekanik dayanımı, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, geniş yüzey alanı ve yüksek optik geçirgenliği özellikleriyle grafen öne çıkmaktadır. Yapılan bir çalışmada, Pt karşıt elektrodu kullanılarak hazırlanan BDGP dönüşüm verimi % 7.31 olarak bulunurken, grafen/PEDOT:PSS kompozit karşıt elektrodu kullanılarak hazırlanan BDGP enerji dönüşüm verimi % 7.86 olarak kaydedilmiştir (Yue, 2013).

3.5. Şeffaf İletken Alt Tabaka

Kullanılan iletken alt tabakalar genellikle indiyum-kalay-oksit (ITO) (Ngamsinlapasathian, 2006), indiyum-çinko-oksit (IZO) (Doh, 2011) ve flor veya antimon katkılı kalay oksit (FTO, ATO) (Grätzel, 2008)'tir. İletken alt tabakalar cam yüzey üzerine kimyasal buhar çökeltme, saçırma, püskürtme, buharlaştırma ve iyon bombardımanı ile hazırlanabilir. Şeffaf iletken alt tabakalar için genel gereklilikler, düşük elektriksel dirençlilik ve görünür bölgede yüksek geçirgenliktir. Cam-ITO elektrotların dirençliliği, boya duyarlı güneş pillerindeki seri halde direncin artmasına neden olan ısı işleminden sonra büyük ölçüde artabilir ve bu performansını düşürür. Cam-FTO elektrotları bu sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarından aynı etki gözlenmediğinden dolayı (Longo, 2003), FTO bazlı şeffaf elektrotlar boya duyarlı güneş pillerindeki uygulamalar için ITO elektroda göre kullanımları daha elverişlidir. Cam-ITO ve cam-FTO elektrotlarının hepsi ticari olarak bulunabilmektedir.

4. SONUÇ

Günümüzde, boya duyarlı güneş pilleri, düşük maliyetli fotovoltaik aygıtlar gibi yenilenebilir enerjilerin çalışma alanındaki güçlü araştırma konularındandır. Dönüşüm verimliliğinin artırılması ve maliyetinin azaltılması amacıyla sistemin her bir parçasıyla ilgili

çalışmalar devam etmektedir. Boya duyarlılaştırıcılar üzerine yapılan araştırmalar genel olarak metal komplekslerin dönüşümü üzerine yoğunlaşmıştır fakat önemli sayıdaki çalışmalar organik duyarlılaştırıcıların ve ekstre edilmiş doğal duyarlılaştırıcıların optimizasyonuna yönelmiştir. Elektron aracılıyla ilgili olarak, I^- iyonunun okside boyanın hızlı yenilenmesine olanak sağlaması gerçeğinden ötürü iyodid/iyot şimdiye kadar ki en verimli ve en çok kullanılan redoks sistemdir. Bilim adamları tarafından elektron aracı olarak kullanılacak alternatif redoks çiftleri sorunun üzerine gidilmiştir ve ümit verici sonuçlar literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmaların yanı sıra, sıvı elektrolitin yerini alabilecek uygun katı malzeme araştırmaları ilginç ve araştırmaların aktif bir alanıdır. Boya duyarlı güneş pillerinin diğer bölümleri ile ilgili olarak da, ucuz maliyetli karşıt elektrodun modifikasyonu ve şeffaf iletken malzemelere yönelik araştırmalar devam etmektedir. Boya duyarlı güneş pilleriyle ilgili genel olarak yapılan çalışmalar verimliliğinin artırılmasının yanı sıra, üretimini basitleştirmek ve maliyetini azaltmayı içermektedir.

KAYNAKLAR

- ADAMS WG. ve DAY RE., On the action of light on selenium. *Proceedings of the Royal Society of London*. 25: 113-117, 1876.
- AMADELLI R., ARGAZZI R., BIGNOZZI CA., SCANDOLA F., Design of Antenna-Sensitizer Polynuclear Complexes. Sensitization of Titanium Dioxide with [Ru(bpy)₂]2Ru(bpy(COO)₂)₂. *J. Am. Chem. Soc.* 112: 7029, 1990.
- ANANDAN S., Recent improvements and arising challenges in dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91: 843–846, 2007.
- ARJUNAN TV. ve SENTHİL TS., Review: Dye sensitised solar cell. *Materials Technology*. 28: 9-14, 2013.
- ARMAND MB, CHABAGNO JM, VASHİSHA P. Polyethers as Solid Electrolytes. In *Fast Ion Transport in Solids Electrodes Electrolytes*. Elsevier North: Amsterdam, 131-136, 1979.
- BAİK C., KİM D., KANG MS., KANG SO., KO J., NAZEERUDDİN MK., GRÄTZEL M. Organic dyes with a novel anchoring group for dye-sensitized solar cell applications. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 201: 168-174, 2009.
- BAKHSAYESH AM. VE MOHAMMADİ MR., Development of nanostructured porous TiO₂ thick film with uniform spherical particles by a new polymeric gel process for dye-sensitized solar cell applications. *Electrochimica Acta*. 89: 90–97, 2013.
- BAZARGAN MH. Performance of nanostructured dye-sensitized solar cell utilizing natural sensitizer operated with platinum and carbon coated counter electrodes digest. *Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 4: 723–727, 2009.
- BECQUERÉL E., Mémoire sure les effets électriques produits ous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendues*. 6: 561, 1839.

- BHATTACHARYA B., LEE JY., GENG J., JUNG HT., PARK JK. Effect of cation size on solid polymer Electrolyte based Dye- sensitized solar cell. *Langmuir*. 25: 3276-3281, 2009.
- BIANCARDO M. Incorporation of gel electrolyte in dye-sensitized solar cells could widen applications. *SPIE Newsroom*. DOI: 10.1117/2.1200609.0394, 2006.
- CALOGERO G., MARCO GD., CAZZANTÌ S., CARAMORÌ S., ARGAZZÌ R., CARLO AD., et al. Efficient dye-sensitized solar cells using red turnip and purple wild Sicilian prickly pear fruits. *International Journal of Molecular Sciences*. 11: 254–267, 2010.
- CAMERON PJ., PETER LM., ZAKEERUDDİN SM., GRÄTZE M. Electrochemical studies of the Co(III)/Co(II)(dbbip)₂ redox couple as a mediator for dye-sensitized nanocrystalline solar cells. *Coordination Chem. Rev.*, 248: 1447–1453, 2004.
- CERNEAUX SA., ZAKEERUDDİN SM., GRATZEL M, Yİ BC., SPICCIA L. New functional triethoxysilanes as iodide sources for dye-sensitized solar cells. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 198: 186–191, 2008.
- CHERAPY NJ., SMESTAD GP., GRAETZEL M. ve ZHANG JZ., Ultrafast Electron Injection: Implications for a Photoelectrochemical Cell Utilizing an Anthocyanin Dye-Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Electrode. *Journal of Physical Chemistry B*, 101: 9342-9351, 1997.
- CHİTTİBABU KG., HADJİKYRİACOU S. ve Lİ L., Ionic liquid based gel electrolyte compositions for dye sensitized solar cells. *Materials Research Symposium Proceedings*, 736: 245-250, 2002.
- DARE-EDWARDS MP., GOODENOUGH JB., HAMNETT A., SEDDON KR., WRIGHT RD., Sensitization of Semiconducting Electrodes with Ru-based Dyes. *Faraday Discuss. Chem. Soc.*, 70: 285 – 300, 1981.
- DESİLVESTRO J., GRÄTZEL M., KAVAN L., MOSER JE., AUGUSTYNSKİ J., Highly Efficient Sensitization of Titanium Dioxide. *J. Am. Chem. Soc.* 107: 2988-2990, 1985.
- Dİ W., Dye Sensitized Solar Cells. *Int. J. Mol. Sci.* 11: 1103-1113, 2010 .

- DOH JG., MAN GK., NAM GP., KANG JK., Enhanced photocurrent and photo voltage of dye sensitized solar cells with TiO₂ film deposited on Indium –doped zinc oxide substrate. Available at: <http://www.electrochem.org/dl/ma/202/pdfs/0897.PDF> (2011).
- DUONGHONG D., SERPONE N., GRÄTZEL M., 114. Integrated Systems for Water Cleavage by Visible Light; Sensitization of TiO₂ Particles by Surface Derivatization with Ruthenium Complexes. *Helv. Chim. Acta*, 67: 1012-1018, 1984.
- Energy Information Administration, International Energy Outlook 2008, September 2008 (www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html).
- FERBER J., STANGL R., LUTHER J., An electrical model of the dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 53: 29–54, 1998.
- FERNANDO JMRV., SENADEERA GKR., Natural anthocyanins as photosensitizers for dye-sensitized solar devices. *Current Science*. 95: 663–666, 2008.
- FUNAKI T., YANAGIDA M., ONOZAWA-KOMATSUZAKI N., KASUGA K., KAWANISHI Y., SUGIHARA H., A 2-quinolinecarboxylate-substituted ruthenium (II) complex as a new type of sensitizer for dye sensitized solar cells, *Inorg. Chim. Acta*. 362: 2519-2522, 2009.
- GERISCHER H., TRIBUTSCH H., Electrochemische Untersuchungen zur spectraleu sensibilisierung von ZnO-Einkristallen. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*72: 437-445, 1968.
- GRÄTZEL M., Perspectives for dye-sensitized nanocrystalline solar cells. *Prog. Photovoltaic Res. Applic*, 8: 171–185, 2000.
- GRÄTZEL M., Review: Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 4: 145-153, 2003
- GRÄTZEL M., Photovoltaic performance and long-term stability of dye-sensitized mesoscopic solar cells, *C.R. Chimie*. 9: 578-583, 2005.
- GRÄTZEL M., DURRANT JR., Dye-Sensitised Mesoscopic Solar Cells In: Mary D Archer & Arthur J (eds.) *Series on Photoconversion of Solar Energy*, Nanostructured and Photoelectrochemical Systems for Solar Photon Conversion, Imperial College Press, Nozik, 3: 503-536, 2008.

GREEN MA., Solar Cells, Operating Principles, Technology, and System Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

GREEN MA., Photovoltaics: Technology overview. *Energy Policy*, 28: 989-998, 2000.

GREG PS., GRATZEL M., Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A Natural Dye-sensitized Nanocrystalline Energy Converter. *J. Chem. Edu.* 75: 752-756, 1998.

GÓMEZ-ORTÍZ NM., VÁZQUEZ-MALDONADO IA., PÉREZ-ESPADAS AR., MENAREJÓN GJ., AZAMAR-BARRÍOS JA., OSKAM G., Dye-sensitized solar cells with natural dyes extracted from achiote seeds. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 94: 40-44, 2009.

GUÍLLEN E., CASANUEVA F., ANTA JA., VEGA-POOT A., OSKAM G., ALCANTARA R., Photovoltaic performance of nanostructure zinc oxide sensitized with xanthene dyes. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 200: 364-370, 2008.

HAIYING W., Dye Sensitized Solar Cell. *Literature Seminar, Department of Chemistry, University of Alabama Nov. 23rd*. Available at: <http://www.docstoc.com/docs/26772993/Dye-Sensitized-Solar-Cells>, 2004.

HAGFELDT A. ve GRÄTZEL M., Light-Induced redox reactions in nanocrystalline systems. *Chem. Rev.* 95: 49-68, 1995.

HAGFELDT A. ve GRÄTZEL M., Molecular photovoltaics. *Acc. Chem. Res.* 33: 269-277, 2000.

HAO S., WU J., HUANG Y., LIN J., Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell. *Solar Energy*. 80: 209-214, 2006.

HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ AR., VARGAS S., ESTEVEZ M., RODRÍGUEZ R., Dye-sensitized solar cells from extracted bracts bougainvillea betalain pigments. *1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences*. 1-15, 2010.

IGBAL Z., WU WQ., KUANG DB., WANG L., MEIER H., CAO D., Phenothiazine-based dyes with bilateral extension of p-conjugation for efficient dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments*. 96: 722-731, 2013.

- IHA NM., GARCÍA CG., BIGNOZZI CA., (Editör: NALWA HS.), Handbook of Photochemistry and Photobiology, Vol 1, American Scientific Publishers, Los Angeles, p. 49, 2003.
- ISLAM A., SUGIHARA H., HARA K., SINGH LP., KATOH R., YANAGIDA M., TAKAHASHI Y., MURATA S. ve ARAKAWA H., New platinum(II) polypyridyl photosensitizers for TiO₂ solar cells. *New J. Chem.* 24: 343-345, 2000.
- JANG SR., CHOI MJ., VITTAL R, KIM KJ., Anchorage of N3 dye-linked polyacrylic acid to TiO₂/electrolyte interface for improvement in the performance of a dye-sensitized solar cell. *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 91: 1209–1214, 2007.
- KARMAKAR AS., RUPARELIA JP., A critical review on dye sensitized solar cells, *Institute of Technology*. Nirma University. Ahmedabad-382 481. NuiCone-2011.
- KAWANO R., NAZEERUDDIN MK., SATO A., GRÄTZEL M., WATANABE M., Amphiphilic ruthenium dye as an ideal sensitizer in conversion of light to electricity using ionic liquid crystal electrolyte. *Electrochem. Commun.*, 9: 1134–1138, 2007.
- KAY A. ve GRÄTZEL M., Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder. *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 44: 99–117, 1996.
- KIM D. SONG K., KANG MS., LEE JW., KANG SO., KO J., Efficient organic sensitizers containing benzo[cd]indole: Effect of molecular isomerisation for photovoltaic properties. *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 201: 102-110, 2009.
- KIM HS. ve WAMSER CC., Photoelectropolymerization of aniline in a dye-sensitized solar cell. *Photochem. Photobiol. Sci.* 5: 955–960, 2006.
- KUANG D., ITO S., WENGER B., KLEIN C., JACQUES-E MOSER, HUMPHRY-BAKER R., ZAKEERUDDIN S. M. ve GRÄTZEL M., High Molar Extinction Coefficient Heteroleptic Ruthenium Complexes for Thin Film Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Am. Chem. Soc.* 128: 4146-4154, 2006.
- KUANG D., KLEIN C., SNAITH HJ., HUMPHRY-BAKER R., ZAKEERUDDIN SM., GRAETZEL M., A new ion-coordinating ruthenium sensitizer for mesoscopic dye-sensitized solar cells. *Inorganica Chimica Acta.* 361: 699-706, 2008.

- LAW M., GREENE LE., JOHNSON JC., SAYKALLY R., YANG P., Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nat. Mat.*, 4: 455-459, 2005.
- LEE J.-H., PARK N.-G., SHİNA Y.-J., Nano-grain SnO₂ electrodes for high conversion efficiency SnO₂-DSSC, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95: 179-183, 2011.
- Lİ H., BAİ J., FENG B., LU X., WENG J., JİANG C., WANG J., Dye-sensitized solar cells with a tri-layer ZnO photo-electrode, *J. All. and Comp.* 578: 507-511, 2013.
- Lİ P., WU J., LİN J., HUANG M., HUANG Y., Lİ Q., High performance and low platinum loading Pt/carbon black counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*. 83: 845-849, 2009.
- LONGO C. VE DE PAOLİ M., Dye-sensitized solar cells: a successful combination of materials. *J. Braz. Chem. Soc.*, 14: 898-901, 2003.
- LUQUE A, HEGEDUS S., Handbook of photovoltaic science and engineering. The Netherlands: Elsevier, 2003.
- MANE RS., PATHAN HM., LOKHANDE CD., HAN S-H., An effective use of nanocrystalline CdO thin films in dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*. 80: 185-190, 2006.
- MATTHEWS D., INFELTA P., GRÄTZEL M., Calculation of the photocurrent-potential characteristic for regenerative, sensitized semiconductor electrodes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 44: 119-155, 1996.
- MATSUI H., Application of an ionic liquid-based electrolyte to a 100mm × 100mm sized dye-sensitized solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry*. 164: 129-135, 2004.
- MOSER J., Notiz über Verstärkung photo-elektrischer Ströme durch optischer Sensibilierung. *Monatsh. Che.*, 8: 373, 1887.
- MUNKHBAYARA B., HWANG S., KİM J., BAE K., Jİ M., CHUNG H. , JEONG H., Photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells with various MWCNT counter electrode structures produced by different coating methods, *Electrochimica Acta* 80 :100- 107, 2012.

- NAMBA S. ve HİSHİKİ Y., Color sensitization of zinc oxide with cyanide dyes. *J. Phys. Chem.* 69: 774, 1965.
- NARAYAN MR., Review: Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 208-215, 2012.
- NAZEERRUDDIN MK., KAY A., RODICIO I., BAKER H., MULLER E., LISKA P., VLACHOPOULOS N., GRAETZEL M., Conversion of light to electricity by cis-X2bis (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl⁻, Br⁻, I⁻, CN⁻, and SCN⁻) on nanocrystalline titanium dioxide electrodes. *Journal of the American Chemical Society*. 115: 6382–6390, 1993.
- NGAMSİN LAPASATHIAN S., SREETHAWONG T., SUZİKİ Y., YOSHİKAWA S., Double layered ITO/SnO₂ conducting glass for substrate of dye sensitized solar cell. *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 90: 2129- 2140, 2006.
- NOGUEIRA AF., LONGO C. ve PAOLI MAD., Polymers in dye sensitized solar cells: overview and perspectives. *Coordination Chemistry Reviews*. 248: 1455–1468, 2004.
- NWANYA AC., EZEMA FI., EJİKEME PM., Dyed sensitized solar cells: A technically and economically alternative concept to p-n junction photovoltaic devices. *International Journal of the Physical Sciences*, 6, 2011.
- OKUYA M., NAKADE K., KANEKO S., Porous TiO₂ thin films synthesized by a spray pyrolysis deposition (SPD) technique and their application to dye sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 70: 425-435, 2002.
- ONozAWA-KOMATSUZAKİ N., YANAGİDA M, FUNAKİ T., KASUGA K., SAYAMA K., SUGİHARA H., Near IR sensitization of nanocrystalline TiO₂ with a new ruthenium complex having a 2,6-bis(4-carboxyquinolin-2-yl) pyridine ligand. *Inorg. Chem. Comm.* 12: 1212-1215, 2009.
- ONozAWA-KOMATSUZAKİ N., YANAGİDA M, FUNAKİ T., KASUGA K., SAYAMA K., SUGİHARA H., Near IR dye-sensitized solar cells using a new type of ruthenium complexes having 2,6-bis (quinolin-2-yl) pyridine derivatives. *Sol. Ene. Mat. & Sol. Cells*. 95: 310-314, 2011.

- O'REGAN B., GRÄTZEL M., A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353: 737-739, 1991.
- PARK JH., NHO YC., KANG MG., Dye-sensitized solar cells containing polymer film with honey-comb like morphology. *J. Photochem. Photobiol A: Chemistry*, 203: 151-154, 2009.
- POLO AS., ITOKAZU MK., IHA NYM., Metal Complex sensitizers in dye-sensitized solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*, 248: 1343-1361, 2004.
- RAM A., NAYAN N., Fabrication and analysis of dye-sensitized solar cell using natural dye extracted from dragon fruit. *International Journal of Integrated Engineering*. 2: 55-62, 2010.
- SAHİN C., ULUSOY M., ZAFER C., OZSOY C., VARLIKLİ C., DİTTRİCH T., CETİNKAYA B., ICLİ S., The synthesis and characterization of 2-(2'-pyridyl)benzimidazole heteroleptic ruthenium complex: Efficient sensitizer for molecular photovoltaics. *Dyes and Pigments*. 84: 88-94, 2010.
- SAYAMA K., SUGUHARA H., ARAKAWA H., Photoelectrochemical Properties of a Porous Nb₂O₅ Electrode Sensitized by a Ruthenium Dye. *Chem. Mater.* 10: 3825-3832, 1998.
- SENADEERA GKR., KOBAYASHİ S., Versatile preparation method for mesoporous TiO₂ electrodes suitable for solid-state dye sensitized photocells. *Bull. Mater. Sci.*, 28: 635-641, 2005.
- SHİ D., POOTRAKULCHOTE N., Lİ R., JİN GUO J., WANG Y., ZAKEERUDDİN SM., GRATZEL M., WANG P., New efficiency records for stable dyesensitized solar cells with low-volatility and ionic liquid electrolytes. *J. Phy. Chem: C*. 112: 17046-17050, 2008.
- SHOZO Y., YUKYEONY K., YOUHAİ Y., KAZUHIRO M., Nanocrystalline TiO₂ solar cells fabricated using Aniline oligomers as hole conductors. *Hybrid and Organic Photovoltaic Conference*, Book of Abstracts Paper OG7, Grand Hotel Bari, 10-13 May 2009, Benidorm, Spain.

- SIVAKUMAR R., ANTONIUM TM. MARCELIS, ANANDAN S., Synthesis and characterisation of novel heteroleptic ruthenium sensitizer for nanocrystalline dye-sensitized solar cells. *J. Photochem. and Photobio. A: Chem.* 208: 154-158, 2009.
- SÖNMEZOĞLU S., AKYÜREK C., AKIN S., High-efficiency dye-sensitized solar cells using ferronnce-based electrolytes and natural photosensitizers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, 2012.
- SUZUKI K., YAMAGUCHI M., KUMAGAI M. AND YANAGIDA S., Application of Carbon Nanotubes to Counter Electrodes of Dye-sensitized Solar Cells. *Chemistry Letter.* 32: 28, 2003.
- TANG X., QIAN J., WANG Z., WANG H., FENG Q., LIU G., Comparison of low crystallinity TiO₂ film with nanocrystalline anatase film for dye-sensitized solar cells. *Journal of Colloidal and Interface Science.* 330: 386–391, 2009.
- TENNAKONE K., KUMARA GRR., KOTTEGODA IRM., PERERA VSP., *Chem. Commun.* 35: 15-16, 1999.
- THAVASÍ V., JOSE R., GANGA K., ALLAKHVERDİER SI., RAMAKRİSHNA S., Non liquid based electrolytes for dye molecules sensitized solar cells. *J. Qafqaz University*, 23: 34-42, 2008.
- TORU A., SHİGEKİ K., SYUNPEİ N., TATSUNORİ K., Performance improvement of a tin(II) dioxide-modified electrode for the dye-sensitized solar cell by the addition of zinc(II) oxide and niobium(V) oxide. *Inorganica Chimica Acta.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ica.2012.10.033>.
- TOSUN BS., FEİST RK., GUNAWAN A., MKHOYAN KA., CAMPBELL SA., AYDİL ES., Improving the damp-heat stability of copper indium gallium diselenide solar cells with a semicrystalline tin dioxide overlayer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 101: 270–276, 2012.
- TSUBOMURA H., MATSUMURA M., NOYAMURA Y., AMAMYİYA T., Dye-sensitized Zinc oxide/aqueous electrolyte/platinum Photocell. *Nature.* 261: 402-403, 1976.

- WANG G., ZHUO S., WANG L., FANG S., LİN Y., Mono-ion transport electrolyte based on ionic liquid polymer for all-solid-state dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*. 86: 1546–1551, 2012.
- WEST W., Proc. Vogel Centennial Symp. *Photogr. Sci. Eng.* 18: 35, 1874.
- WHITE RC., BENEDETTI JE. , AGNALDO D. GONC, ALVES, ROMÃO W., VAZ BG., EBERLİN MN., CARLOS RD. CORREIA, MARCO A. DE PAOLİ, NOGUEIRA AF., Synthesis, characterization and introduction of a new ion-coordinating ruthenium sensitizer dye in quasi-solid state TiO₂ solar cells. *J. Photochem. and Photobio. A: Chem*, 222: 185-191, 2011.
- WU, LAN JZ., HAO S., Lİ P., LİN J., HUANG M., Progress on the electrolytes for dye-sensitized solar cells. *Pure and Applied Chemistry*. 80: 2241–2258, 2008.
- WONGCHAREE K, MEEYOO V, CHAVADEJ S., Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91: 566–71, 2007.
- YAMAGUCHI M., Present status and prospects of photovoltaic technologies in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 5: 113-135, 2001.
- YAMAZAKI E, MURAYAMA M, NISHIKAWA N, HASHIMOTO N, SHOYAMA M, KURITA O., Utilization of natural carotenoids as photosensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*. 81: 512–516, 2007.
- YUEA G., WUA J., XIAOA Y., LINA J., HUANGA M., LANA Z., FANA L., Functionalized graphene/poly(3,4-ethylenedioxythiophene): polystyrenesulfonate as counter electrode catalyst for dye-sensitized solar cells, *Energy* 54: 315-321, 2013.
- ZHANG D., LANIER SM, DOWNING JA., AVENT JL., LUMC J., MCHALEA JL., Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 195: 72–80, 2008.
- ZHOU H., WU L., GAO Y., MA, T., Dye-sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 219: 188–194, 2011.

TEKİRDAĞ İLİ DEVLET YOLLARINDA AŞIRI DİNGİL YÜKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Emin Cihangir BAĞDATLI

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
bagdatli@sakarya.edu.tr

ÖZET

Avrupa ile Anadolu arasında bir köprü niteliğinde olan Tekirdağ devlet yolları, yük taşımacılığında etkin bir rol oynamaktadır. Ülke ortalamasının üzerinde ağır vasıta sayısına sahip olan bu yollar, yasal dingil yükünün ihlali ve aşırı yükleme ile ciddi hasarlar almaktadır. Bu çalışma kapsamında, aşırı dingil yükü etkisiyle ciddi hasarlara maruz kalan Tekirdağ devlet yollarının ekonomik ömrü, Karayolları Genel Müdürlüğünden alınan istatistikî veriler değerlendirilerek ortalama olarak hesaplanmış ve düzenli bir yük denetiminin olmaması halinde ülke ekonomisine olumsuz etki edeceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dingil yükü, Yol ömrü, Ağır vasıtalar, Tekirdağ devlet yolları

THE ASSESSMENT OF OVERLOADED VEHICLE AXLES ON THE TEKİRDAĞ STATE HIGHWAYS

ABSTRACT

Tekirdağ state roads constituting an important corridor between Europe and Anatolia play an active role on freight transportation. Because the number of heavy good vehicles travelling on these roads is more than national average and legal violation of load limits, severe damages occur on these roads. In this study, the economic life of damaged roads is investigated by evaluating the statistical data acquired from the General Directorate of Turkish Highways. Consequently, it is demonstrated that the national economy is affected adversely due to such damages stem from inadequate periodical check.

Keywords: Axle load, Road life, Heavy goods vehicles, Tekirdag state roads

1. GİRİŞ

Bir ülkenin sosyal ve ekonomik gelişmesine katkı sağlayan en büyük etkenlerden biri de ulaştırma dır. Ulaşım, toplumsal ilerlemenin, sosyal ve ticari hareketliliğin geliştirilmesinin temelini oluşturur. Gelişmiş ülkeler; karayolu, denizyolu, havayolu, demiryolu ve boru hatları gibi ulaşım türlerini yolcu ve yük taşımacılığında dengeli bir şekilde kullanırken, gelişmekte olan ülkemiz, karayolu ulaştırmacılığını kullanmayı daha etkin bir şekilde tercih etmektedir. Ülkemizde ulaştırmanın karayolu üzerinde bu denli yoğunlaşması yollardan beklenen performans ve hizmet ömrüne dikkatleri çekmektedir. Yük taşımacılığının büyük bir oranla karayolundan sağlandığı ülkemiz, yeterli ve gerekli denetimin yapılamaması nedeniyle yollardan beklenen performansı ve hizmet ömrünü etkili bir şekilde kullanamamaktadır. Bu durum ise karayollarında ardı ardına tekrarlanacak bakım ve onarım maliyetleri ile ülkemiz ekonomisine olumsuz etkiler vermektedir.

Bu çalışmada, yük taşımacılığında Avrupa ile Anadolu arasında bir köprü niteliğinde olan Tekirdağ devlet yolları ele alınmıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nden elde edilen istatistikî veriler değerlendirilerek yolların mevcut durumu ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, ağır vasıtalarındaki yasal yük sınırının ihlali neticesinde ülke ekonomisinin ciddi olarak olumsuz yönde etkileneceği vurgulanmış olup, yük denetiminin daha düzenli yapılması için bilimsel bir çalışma ile bir algı oluşturulması amaçlanmıştır.

2. DİNGİL YÜKLERİNİN YOL YAPISINA ETKİSİ

Karayolu trafiğinde treyler, kamyon, otobüs, orta yüklü ticari taşıt ve otomobil olmak üzere beş tip taşıt yer almaktadır. Bunlar içerisinde yol yapısına en büyük etki kamyon ve treyler tarafından verilmektedir. Aşırı yükleme ile karayoluna çıkabilen bu iki araç tipi otobüs, orta yüklü ticari taşıt ve otomobilin verebileceği hasar ve zararın çok daha fazlasını yola vermektedir.

Yapılan bir çalışmada bir otomobilin ortalama dingil yükü 250 kg iken bir kamyonun ortalama bir dingile düşen yükün 4.000 kg olduğunu belirtilmektedir. Bu ise, ülkemiz karayollarına göre hesabı yapıldığında bir kamyon dingil yükünün yol kaplamasına verdiği zararın ortalama 198.600 eşdeğer otomobil dingil yükünün kaplamaya verdiği zarara eşit olduğunu göstermektedir. Bu basit kıyas neticesinde yasal dingil yükü 11,5 ton olan

ülkemizdeki aşırı yükleme ile yapılan taşımalarda karayollarımıza ne derece zarar verileceği görülebilmektedir.

3. TEKİRDAĞ İLİ DEVLET YOLLARI

Tekirdağ ili coğrafi konum olarak Avrupa ile Anadolu arasında önemli bir geçiş koridoru olması nedeniyle, yolcu ve yük taşımacılığının etkin bir şekilde kullanıldığı devlet yollarına sahiptir. Karayolları Genel Müdürlüğü'ne ait 266 km sathi kaplama ve 122 km bitümlü sıcak kaplama olmak üzere toplam 388 km uzunluğuna sahip Tekirdağ devlet yolları, 2008 yılı içerisinde 1.984.456 ton/km yük taşımıştır (KGM,2009). Yolcu ve yük taşımacılığının bu denli aktif olduğu bu yollardaki toplam araç içerisindeki taşıtların dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere 388 km.lik devlet yoluna sahip Tekirdağ ilinde, her bir devlet yolu ve devlet yoluna ait dilimlerdeki araç sayıları farklı sayım türleri ile ayrı ayrı tespit edilmiştir. Toplam 186.199 taşıtın yer aldığı devlet yollarında 138.365 adet otomobil, 13.696 adet orta yüklü ticari taşıt, 4.597 adet otobüs, 21.165 adet kamyon, 8.376 adet treyler yer almaktadır. Treyler ve kamyon sayılarının toplamı ağır taşıt sayısını vermekle birlikte Tekirdağ ili devlet yollarında 29.541 adet ağır taşıt bulunmaktadır. Toplam araç içerisinde ağır taşıt sayısı % 16'lık bir dilimi oluşturmaktadır.

Tablo 1. Tekirdağ İli Devlet Yollarındaki Taşıt Tiplerine Göre 2008 Yılı YOGT (KGM,2009)

İLİ	KKNO	DİLİM NO	SAYIM TÜRÜ	UZUNLUK (km)	OTOMOBİL	ORTA YÜKLÜ TİCARİ TAŞIT	OTOBÜS	KAMYON	TREYLER	TOPLAM YOGT
Tekirdağ	020-04	1	TAHMİN	6	1.840	202	123	202	73	2.440
Tekirdağ	020-04	2	OTS S1	17	608	64	11	73	25	781
Tekirdağ	100-03	1	OTS S1	20	11.630	1.572	377	2.171	549	16.299
Tekirdağ	100-03	2	OTS S2	4	15.068	1.649	315	909	580	18.521
Tekirdağ	100-03	3	TAHMİN	16	7.300	701	154	1.330	396	9.881
Tekirdağ	100-03	4	TAHMİN	2	7.300	701	154	1.330	396	9.881
Tekirdağ	110-03	1	OTS S1	14	5.011	455	283	732	540	7.021
Tekirdağ	110-03	2	G.TRAF	11	5.011	455	283	732	540	7.021
Tekirdağ	110-03	3	OTS S1	44	6.668	631	325	1.071	515	9.210
Tekirdağ	110-03	4	OTS S1	3	4.278	469	65	784	210	5.806
Tekirdağ	110-03	5	OTS S1	3	4.474	504	96	884	223	6.181
Tekirdağ	110-03	6	TAHMİN	9	7.936	748	428	994	613	10.719
Tekirdağ	110-04	1	TAHMİN	8	13.140	905	461	1.815	694	17.015
Tekirdağ	110-04	2	OTS S1	34	11.048	854	475	1.709	651	14.737
Tekirdağ	110-04	3	G.TRAF	9	9.587	391	283	980	726	11.967
Tekirdağ	120-02	0	OTS S1	20	500	65	2	84	8	659
Tekirdağ	555-04	1	G.TRAF	12	2.067	196	32	404	96	2.795
Tekirdağ	555-04	2	OTS S1	49	2.883	385	11	597	105	3.981
Tekirdağ	555-05	0	OTS S1	36	1.537	129	39	206	39	1.950
Tekirdağ	565-04	1	G.TRAF	11	3.756	483	114	732	224	5.309
Tekirdağ	565-04	2	OTS S1	21	3.756	483	114	732	224	5.309
Tekirdağ	567-01	1	OTS S1	21	4.624	639	336	786	120	6.505
Tekirdağ	567-01	2	G.TRAF	4	6.603	799	99	1.553	502	9.556
Tekirdağ	567-03	0	OTS S1	14	1.740	216	17	355	327	2.655
TOPLAM				388	138.365	13.696	4.597	21.165	8.376	186.199

4. ORTALAMA EKONOMİK YOL ÖMÜR TAYİNİ

Ekonomik yol ömrü, bir yolun bakım ve onarım maliyeti olmaksızın taşıt trafiğine hizmet ömrünü ifade etmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğüne uygulanan AASTHO metoduna göre bir dingil yükünün yol üst yapısına verdiği zarar Eşdeğerlik Faktörü ile tespit edilmektedir. Bu hesaplamada dingil yükleri 8,2 tonluk standart dingil yüküne göre değerlendirilerek kaplamaya verdiği zarar ortaya konulmaktadır (KGM, 2008). Planlanan yol ömrünün eşdeğerlik faktörüne bölünmesiyle yolun yeni ömrü yani ekonomik yol ömrü hesaplanmaktadır.

$$\text{Eşdeğerlik Faktörü} = [\text{Uygulanan dingil yükü} / \text{Standart dingil yükü}]^n$$

Burada; “n” bir güç endeksi ve $3,5 < n < 4,5$ aralığında olup, ülkemiz yol ve trafik koşullarına göre 4,4 alınır (Hatipoğlu S., 1997).

Ortalama Taşıt Yükleri

Tekirdağ ili devlet yollarında km başına düşen yük miktarının ne kadarı aşırı yüklenme ile uygulandığını tespit edebilmek için bu çalışma kapsamında ağır vasıta dışındaki taşıtların ortalama ağırlıkları hesaplanmıştır.

Hesaplamalar sırasında, ortalama bir otomobil ağırlığı için rastgele seçilen 9 adet farklı model otomobilin; ortalama bir orta yüklü ticari taşıt ağırlığı için rastgele seçilen 7 adet taşıtın; ortalama bir otobüs ağırlığı için rastgele seçilen 5 adet farklı model otobüsün boş ve dolu durumları göz önünde bulundurularak ortalama değerlere ulaşılmıştır. Hesaba katılan taşıtlar Türkiye’de en çok kullanılan modeller olup farklı taşıt modellerine ilişkin olarak hesaplanan ortalama değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2’de verilen taşıtların ortalama ağırlık hesaplamalarında, rastgele seçilen otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs modellerinin boş ve dolu ağırlıkları, taşıtların teknik kataloglarından alınarak hesaplanmış olup, ortalama bir otomobil ağırlığı 1.360 kg; ortalama bir orta yüklü ticari taşıt ağırlığı 2.582 kg; ortalama bir otobüs ağırlığı 17.734 kg değerlerine ulaşılmıştır.

Tablo 2. Rastgele Seçilen Taşıt Ağırlıkları ve Ortalama Taşıt Yükleri

	Model	Boş Ağırlık (kg)	Dolu Ağırlık (kg)	Ortalama Ağırlık (kg)
Otomobil	A	1.157	1.577	1.360
	B	1.053	1.493	
	C	1.300	1.730	
	D	1.100	1.510	
	E	1.182	1.702	
	F	1.249	1.650	
	G	890	1.350	
	H	1.235	1.645	
	I	1.115	1.525	
Orta Yüklü Ticari Taşıt	q	2.049	3.160	2.582
	r	1.879	3.500	
	w	1.634	3.000	
	t	1.901	3.000	
	v	1.885	3.500	
	y	2.245	3.500	
	z	2.085	2.805	
Otobüs	1	13.570	17.840	17.734
	2	21.000	26.000	
	3	10.200	14.600	
	4	13.700	18.000	
	5	17.130	25.300	

Kamyon ve Treyler Değerleri


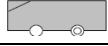
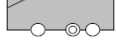










Ülkemiz karayolu trafiğinin önemli bir kısmını oluşturan kamyon ve treyler, yük taşımacılığında etkin bir yere sahiptir. 2008 yılı verilerine göre Türkiye geneli devlet yollarında km başına 8366 adet kamyon, 3138 adet kamyon+römork ve çekici+yarı römork tipli treyler yer almaktadır (KGM,2009). Bu araçlar taşıt sınıflandırılmasında ağır vasıta kategorisine girmekte olup yük kapasitelerine göre farklı dingil tiplerine sahiptirler. Dingil tiplerine göre kamyon ve treylerin ülkemizdeki dağılımı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3'e bakıldığında taşıtların dingil sayıları ve dingillerde yer alan tekerlek adetleri ile birlikte dingil tiplerinin ülkemizde yer alan kamyon ve treyler trafiği içerisindeki yüzdeleri dilimleri görülmektedir.

Örneğin; 1.2+111 dingil tipli bir taşıt, 5 adet dingile sahip olmakla birlikte önden ikinci sıradaki dingili 2 tekerlekli diğer dingillerinde ise yalnızca birer tekerlek yer

almaktadır. Bu dingil tipine sahip taşıt sayısı Türkiye’de yer alan treyler içerisinde % 91’lik bir dilim oluştururken kamyon trafiği içerisinde bulunmamaktadır.

Tablo 3. Taşıt Sınıflarına Göre Dingil Tiplerinin Dağılımı (KGM,2009)

Dingil Tipi Sınıfları	Kamyon %	Treyler %
1.1 	1	0
1.2 	13	0
1.21 	4	0
1.22 	52	0
1.122 	18	0
11.22 	11	0
1.2+11 	0	1
1.2+22 	0	2
1.2+111 	0	91
1.2+122 	0	1
1.2+222 	0	2
1.22+22 	0	2
1.21+22 	0	1

Tablo 3’te verilen bilgilere bakılarak dingil sayılarına göre ağır taşıtlar sınıflandırıldığında, trafik içerisinde kamyonların %2’si 2 dingilli; %56’sı 3 dingilli; % 29’u 4 dingilli; treylerin ise % 97’si 5 dingilli ve % 3’ü 4 dingilli olduğu görülmektedir.

2008 yılı verilerine göre Tekirdağ ili devlet yollarında 29.541 adet ağır taşıt yer almaktadır. Bunların 21.165 adedi kamyon ve 8.376 adedi treyler olduğu göz önünde bulundurulduğunda ve ülkemiz yollarında yer alan ağır taşıt dingil sayılarının yüzdelik dağılımları dikkate alındığında Tekirdağ devlet yollarındaki ağır vasıtaların tamamı ortalama olarak 4 dingilli olarak kabul edilmiştir.

Ağır Dingil Yükünün Tespiti ve Yollara Etkisi

Bu bölümde, ağır dingil yükünün yol üstyapısına verdiği zararı ortaya koymak ve buna bağlı olarak yol ekonomik ömrünün ne kadar azaldığını göstermek için yaklaşık bir hesaplama yapılmıştır. Hesaplama; Tekirdağ ili devlet yollarından geçen günlük yük miktarının ne kadarının ağır vasıtalar tarafından karşılandığını tespit edebilmek için Tablo 2’de verilen otomobil, orta yüklü ticari taşıt ve otobüs ortalama ağırlıkları ve yıllık ortalama günlük trafik miktarlarına bağlı olarak hafif yük taşıtlarının taşımış olduğu günlük ortalama yük miktarı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuç günlük toplam yük miktarından çıkarılması ile ağır taşıtların taşımış olduğu günlük yük elde edilmiştir. Daha sonra bir adet ağır vasıtaya düşen yük miktarı belirlenerek; ortalama olarak 4 dingilli kabul edilen bir ağır vasıtada dingil başına düşen yükler hesaplanmıştır. Elde edilen dingil başına düşen yük miktarı 8,2 ton eşdeğer dingil yüküne çevrilerek yol ömrü hesaplamaları yapılmıştır.

Bahsi geçen işlemler, aşağıda basit bir şekilde formülize edilmiş ve daha sonrasında adım adım hesaplama işlemleri yapılmıştır.

Tekirdağ ili devlet yollarına etkileyen 2008 yılı yıllık yük miktarı 1.984.456 ton/km’dir. Günlük yük miktarı ise 5.436.865 kg/km’dir (KGM,2009). Kilometre başına düşen bu yükün ne kadarının ağır taşıtların aşırı yüklenmesi sonucunda yola etkidiğinin tespiti için aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. Kolay anlaşılabilir olması için yapılan işlemler aşağıda basit bir şekilde formülize edilmiştir;

$$W_h = (W_1 \times S_1 + W_2 \times S_2 + W_3 \times S_3) / L \quad W_a = W_t - W_h$$

Burada; W_t : Tüm taşıtların km başına düşen günlük toplam ağırlığını, W_a : Ağır taşıtların km başına düşen günlük ağırlığını, W_h : Ağır vasıta dışındaki araçların km başına düşen günlük ağırlığını, W_1 : Ortalama bir otomobil ağırlığını, W_2 : Ortalama bir orta yüklü ticari taşıt ağırlığını, W_3 : Ortalama bir otobüs ağırlığını, S_1 : Yıllık ortalama günlük otomobil sayısını, S_2 : Yıllık ortalama günlük orta yüklü ticari taşıt sayısını, S_3 : Yıllık ortalama günlük otobüs sayısını, L : Toplam yol uzunluğunu ifade eder.

$$\begin{aligned} W_h &= (1.360 \times 138.365 + 2.582 \times 13.696 + 17.734 \times 4.597) / 388 \\ &= 786.244 \text{ kg/km} \end{aligned}$$

$$W_a = 5.436.865 - 786.244$$

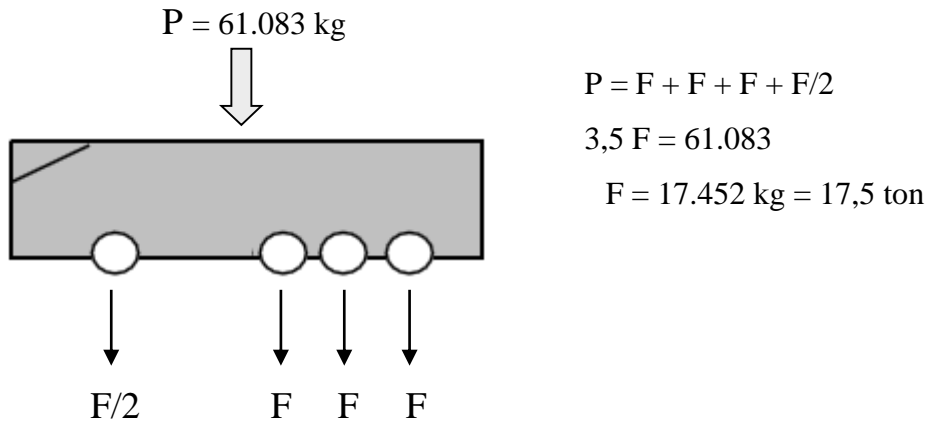
$$= 4.650.621 \text{ kg/km}$$

Bir adet ağır vasıtaya düşen ortalama yükü bulabilmek için hesaplanan W_a değeri toplam yol uzunluğu ile çarpılarak toplam ağır taşıt sayısına bölünmüştür;

$$= 4.650.621 \times 388 / 29.541$$

$$= 61.083 \text{ kg}$$

Yapılan basit işlemler sonucunda Tekirdağ ili devlet yollarında bulunan bir ağır taşıtın yola etkidiği ortalama yük miktarı 61.083 kg olarak hesaplanmıştır. Bu yük miktarının dingiller tarafından yola etkimesi aşağıdaki gibidir;



Ağır vasıtaların tamamı Tablo 3'te verilen istatistikî değerler neticesinde ortalama olarak 4 dingilli kabul edilmiştir. Dingillere düşen yük miktarı dingiller arası mesafe ve taşıtın dingil kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik göstermekte olup, önceki çalışmalarda yapılan dingil ağırlığı ölçümlerinden elde edilen veriler ışığında, ön dingil ağırlıkları arka dingillerin genellikle yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir (Hatipoğlu S., 1997). Bu bağlamda yükün dingillere dağılımında bu durum göz önünde tutulmuştur.

Yapılan hesaplamalar sonucunda Tekirdağ ili devlet yollarında ağır vasıtaların bir dingil yükünün ortalama olarak yol üstyapısına 17,5 ton olarak etkidiği hesaplanmıştır. Bu dingil yükünün yol kaplamasına verdiği zararı hesaplamak ve ortalama yol ömrünü tespit edebilmek için aşağıdaki işlemler yapılmıştır;

Eşdeğerlik faktörü = [Uygulanan dingil yükü / Standart dingil yükü]ⁿ

$$\begin{aligned} \text{Eşdeğerlik faktörü} &= (17,5 / 8,2)^{4,4} \\ &= 28,1 \end{aligned}$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen dingil başına düşen 17,5 tonluk yük miktarı, standart dingil yükü olan 8,2 ton değerine dönüştürülerek eşdeğerlik faktörü bulunmuştur. Eşdeğerlik faktörünün anlamı, 17,5 tonluk bir dingilin yol kaplaması üzerinden 1 kere geçişiyle verecek zararın 8,2 tonluk dingilin 28,1 kere geçişiyle verecek zarara eşdeğer olduğudur.

$$\begin{aligned} \text{Yolların ortalama ekonomik ömrü} &= 20 / 28,1 \\ &= 0,7117 \text{ yıl} \\ &= (0,7117 / 20) \times 100 \\ &\approx \% 4 \end{aligned}$$

8,2 tonluk standart dingil yüküne göre yapılan yoldan sürekli olarak 17,5 tonluk dingil yükünün geçişiyle 20 yıl olarak tayin edilen yol üst yapı ömrü 28,1 eşdeğerlik faktörüne bölünmesiyle 0,7117 yıla yani 1 yılın dahi altında bir süreye inmektedir. Bu süre ise yol tasarlanırken ekonomik ömür olarak belirlenen 20 yılın yalnızca %4'lük bir dilimini oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, Tekirdağ ili devlet yollarından geçen aşırı yüklü bir ağır vasıta dingili, dingil yükü 8,2 ton olan yaklaşık 28 adet dingilin bu yollardan geçmesine karşılık gelmektedir. Bu ise ortalama 20 yıllık ömür verilen bir yolun ancak %4'lük bir dilime düşen süresinin ekonomik yani bakım ve onarım maliyeti getirmeksizin kullanımını temin etmektedir.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Karayolu ulaştırmasında önemli bir geçiş koridoru olan Tekirdağ ili devlet yolları, proje aşamasında planlanan ve beklenen performansı gösterememektedir. Bu yollar, yasal dingil yükünün 11,5 ton olduğu ülkemizde, ortalama olarak 17,5 tona varan dingil yükleriyle ileri derecede hasar almakta ve planlanan ekonomik yol ömrünü kullanamamaktadır. Yapılan

yaklaşık hesaplamalar neticesinde elde edilen 17,5 ton dingil yükü, yolların ekonomik ömrünü %4 seviyelerine indirmektedir. Bu ise, ekonomik ömrü 20 yıl olarak tasarlanan ve kullanıma açılan bir yolun daha ilk yılı dolmadan bakım ve onarımlarla takviye edilmesini gerektirmektedir. Nitekim Tekirdağ ilinde yeni yapılan yolların daha ilk yılını doldurmadan hasar görmesi ve bakım gerektirmesi bu gerçeği doğrulamaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğünden alınan 2008 yılı verilerine göre Türkiye'deki asfalt yolların bakım ve onarımı için harcanan birim maliyet 7.935 TL'dir. Tekirdağ yolları asfalt bakım ve onarımı için harcanan birim maliyet ise 15.982 TL'dir (KGM, 2009). Tekirdağ devlet yollarının bakım ve onarımı için harcanan maliyetin ülke ortalamasının iki kat fazla olması, bu yolların ekonomik ömrünün, aşırı dingil yükleri etkisiyle minimize olduğunu destelemektedir. Yasal dingil yükünün ciddi anlamda ihlal edildiği ülkemizde, yollar için yapılan bakım ve onarım maliyetlerinin Tekirdağ ilinde 2 katı kadar yüksek maliyetlere çıkması, Tekirdağ ili devlet yollarının ne derece zarar gördüğünü ve düzenli bir yük denetiminin ne kadar önemli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Tekirdağ ili devlet yollarında görüldüğü üzere aşırı dingil yüklerinden kaynaklanan bakım-onarım giderleri ve yolun ekonomik ömründeki kısalma ülke ekonomisi için büyük bir yük oluşturmaktadır. Oldukça pahalı bir yatırım olan yol üstyapısının düzenli olarak yapılacak yük denetimleriyle ekonomik ömürleri uzatılabilir ve bakım-onarım giderleri azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- WATSON, J.P., 1989, "Highway Construction and Maintenance", Longman Group (FE) Limited, 7-17, Newyork.
- KGM, 2009. 2008 Trafik ve Ulaşım Bilgileri, Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Ankara.
- HATİPOĞLU, S., 1997. "Aşırı Yüklü Kamyonların Dingil Yüklerinin Yol Ömrüne Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- KGM, 2009. 2008 Yılı Devlet ve İl Yolları Bakım-İşletme Maliyetleri, Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Ankara.
- KGM, 2008. "Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi", Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şube Müdürlüğü, Ankara.

TÜRKÇE İÇİN BİLGİ TABANLI YAKLAŞIMLA KELİME ANLAMI BELİRGİNLEŞTİREN BİR UYGULAMA

Özlem AYDIN

Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Edirne

ÖZET

Kelime Anlamı Belirginleştirme işlemi, bir kelimenin taşıdığı anlamın verilen bir bağlamda belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada Türkçe’de birden fazla anlamı olan kelimelerin buldukları bağlamdaki anlamının hesaplamalı olarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bunun gerçekleştirilmesinde Basitleştirilmiş Lesk Algoritması ve kelimelerin eşdizimlilik özelliği kullanılmıştır. Uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi duyarlılık ve geriçağırım değerlerine göre yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kelime Anlamı Belirginleştirme, Basitleştirilmiş Lesk Algoritması, Eşdizimlilikler.

A KNOWLEDGE BASED WORD SENSE DISAMBIGUATION APPLICATION FOR TURKISH

ABSTRACT

Word Sense Disambiguation is the process of selecting the most appropriate sense of the given ambiguous word in the given context. In this study, our aim is determining the sense of the words, which have multiple senses, in certain context for Turkish. Simplified Lesk Algorithm and collocations are used as the methods in the implementation of this task. The test results are evaluated in terms of the precision and recall metrics.

Keywords: Word Sense Disambiguation, Simplified Lesk Algorithm, Collocations.

1. GİRİŞ

Kelime Anlamı Belirginleştirme (KAB) işlemine kelime anlamının belirsiz olduğu durumlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Belirsizlik doğal dil işlemenin çoğu uygulamasında (makine çevirisi, bilgi erişimi, dilbilgisi çözümlemesi, vb.) çözülmesi gereken önemli problemlerden biridir. Doğal dillerde yapısı gereği karşılaşılan farklı belirsizlik durumları bulunmaktadır. Bu durumlar genel olarak sözdizimsel (syntactic) ve sözlüksel (lexical) olarak ortaya çıkmaktadır. Sözdizimsel belirsizlik, bir cümle sözdizimi nedeniyle farklı şekillerde yorumlanabildiği durumda ortaya çıkar. Örneğin, (1) cümlesinde istenen kitabın Ahmet'e mi yoksa babasına mı ait olduğu belli değildir.

Babası Ahmet'ten kitabını getirmesini istedi. (1)

Kelime anlamı belirsizliği, diğer bir deyişle sözlüksel belirsizlik (lexical ambiguity) bir kelimenin birden fazla anlamı olması durumunda ortaya çıkan bir durumdur. Sözlüksel belirsizliğin genel olarak iki türü vardır: eş seslilik (homonymy) ve çok anlamlılık (polysemy). Eşseslilik, sözlüksel bir birimin rastlantısal olarak iki ya da daha fazla ayrı ve birbirinden bağımsız anlam taşıması olarak tanımlanır. Örneğin, <http://guzelturkcemiz.org> internet sitesinden alınan (2)'deki dörtlükte “yüz” kelimesinin üç farklı anlamı ile kullanımı bir arada görülmektedir. İlk satırda “rakam” olan anlamıyla, ikinci satırda “surat” anlamıyla ve son satırda ise “yüzmek fiili” olan anlamıyla kullanılmıştır.

Bahçede var *yüz* güzel
Endam güzel *yüz* güzel (2)
Uzaklara açılma
Kıyılarda *yüz* güzel

Çok anlamlılık ise, tek bir sözlüksel birimin pek çok farklı ancak birbirleriyle bağlantılı anlamları olmasıdır. Çok anlamlılıkta kelimenin asıl anlamından kopmadan yeni bir anlamı karşılaması söz konusudur ve sözlüklerde bir madde başlığı altında kelimelerin birden fazla anlamı sıralanır. “Ay” kelimesi ünlem olarak kullanılan “ay!” kelimesiyle eş sesli olmakla birlikte, kendi içinde çok anlamlıdır ve dünyanın uydusu olan gök cismini ve yılın aralıklara bölünmüş zaman dilimlerini karşılamaktadır. “Ay” kelimesinin bu iki anlamına bakıldığında birincisinin somut olan bir kavrama karşılık geldiği, ikincisinde ise soyut olan zaman kavramını karşıladığı görülmektedir. “Ay” kelimesinin bu iki anlamı arasındaki ilişki,

ayın dünya etrafında bir kez dönmesinin bu zaman dilimlerini oluşturmasından kaynaklanmaktadır (Kurudayıoğlu M., Karadağ Ö., 2005).

İnsanlar için bir kelimenin verilen bir bağlamda hangi anlamı ile kullanıldığını belirlemek kolaydır. Çünkü insan bu anlama işlemini gerçekleştiren bilişsel bir sisteme sahiptir. Ama bu belirleme işlemi bilgisayarlar için kolay olmamaktadır. Kelime anlamı belirsizliğinin çözümü ise KAB işlemiyle gerçekleştirilir. Bu çalışmada Türkçe için hesaplamalı olarak gerçekleştirilmiş bir KAB uygulaması anlatılmıştır. Öncelikle KAB işlemine ilişkin bilgiler, devamında kullanılan yöntemlere ilişkin bilgiler verilmiştir. Son olarak da geliştirilen uygulama anlatılmış ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. KELİME ANLAMI BELİRGİNLEŞTİRME

KAB problemi, *YZ-tam (AI-complete)* olarak tanımlanmaktadır. Yani ilk olarak yapay zekadaki bütün zor problemler çözüldükten sonra çözülebilecek bir problemdir (Ide N., Veronis J.,1998). Dolayısıyla, zor bir problemdir. Bu sebeple başarımda etkili olacak yöntemin kullanımı, KAB probleminin etkin çözümünde çok önemli olmaktadır.

KAB işleminde kelimenin bulunduğu bağlam ve kelimelerin anlamlarının ayrılması önemlidir. Çok anlamlı bir kelimenin anlamını belirlemede bağlam önemli bir rol oynar. Bu sebeple bütün KAB yaklaşımları belirginleştirmede kullanılacak bilgiyi sağlayan hedef kelimenin bağlamına ihtiyaç duyar. Bağlam iki şekilde kullanılır:

1. Hedef kelimenin yanındaki kelimelere bakılabilir. Burada hedef kelimeye belli bir uzaklıktaki kelimeler hedef kelimeye olan uzaklıkları ve dilbilimsel özellikleri vb. bakılmaksızın sadece birlikte bulunmasına bakılarak düşünülür.
2. Hedef kelime ile yanındaki kelimeler arasındaki ilişkisel bilgiye bakılabilir. Bu ilişkiler uzaklık bilgisi, sözdizimsel ilişki, seçimsel öncelikler, eşdizimlilikler ve anlamsal kategoriler olabilir.

Çoğu belirginleştirme görevi, öncelikli bilgi kaynağı olarak bir kelimenin bulunduğu yerel bağlamı kullanır. Yerel veya mikro bağlam genellikle bir metindeki ya da bağlamdaki hedef kelimenin çevresinde bulunan sınırlı bir pencere uzunluğundaki kelimeler olarak düşünülür. KAB'da karşılaşılan önemli problemlerden birisi, hedef kelimenin çevresinde

bulunan kelimelerin hangi uzaklığa kadar inceleneceğinin net olmamasıdır. Yapılan çalışmalarda tespit edilmiş bir en iyi uzaklık değeri yoktur (Agirre E., Edmonds P., 2006).

Kelime anlamlarının doğru bir şekilde ayrımının yapılması KAB'daki diğer önemli hususlardan biridir. Makinece okunabilir sözlükler ve WordNet gibi sözlüklerden alınan anlamlar doğal dil işleme çalışmaları için çok geniş boyuttadır. Bazı anlamlar diğer anlamların özelleşmiş şeklidir. Kimi durumlarda sözlüklerde bulunmayan anlamların kullanılması da gerekebilir. Bu geniş anlam farkı KAB'da zorluklar çıkarmaktadır. Anlamların ayrılması kaba ayrımlı (coarse-grained) ve ince ayrımlı (fine-grained) seviyede yapılmaktadır. Kaba ayırım, kelimenin birbiriyle ilgisi olmayan farklı anlamları olması durumunda yapılan ayırımdır. Yani kelimenin eş sesli olması durumu ile ilgilidir. Örnek olarak “kara” kelimesini ele alalım. Tablo 1’de verilen anlamlar kaba ayrımlıdır. Verilen örnek cümlelerde kullanılan “kara” kelimeleri eş seslidir.

Tablo 1. “Kara” kelimesinin kaba ayrımlı anlamları

Anlam no	Anlam tanımı	Örnek cümle
1. anlam	Yeryüzünün denizle örtülü olmayan bölümü, toprak.	İçlerinden biri <i>kara</i> göründü diye bağırdı.
2. anlam	En koyu renk, siyah; ak, beyaz karşıtı.	Ben bir <i>kara</i> ağaç gölgesi buldum.

Kelimenin birbirine yakın anlamları olması durumu göz önüne alınarak oluşturulan anlamlar ince ayrımlıdır. Kelimenin çok anlamlı olması durumunda yapılan bir ayırımdır. “Kara” kelimesi için yapılabilecek ince ayrımlı anlamlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. “Kara” kelimesinin ince ayrımlı anlamları

Anlam no	Anlam tanımı	Örnek cümle
1. anlam	En koyu renk, siyah; ak, beyaz karşıtı.	Ben bir <i>kara</i> ağaç gölgesi buldum.
2. anlam	Esmer.	Güneşte yanmış, <i>kara</i> bir çocuk gördüm.

Bu tabloda, “kara” kelimesinin 2. anlamı, 1. anlamına bağlı olarak ortaya çıkmış bir yan anlamdır.

KAB için günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda birçok yaklaşım ortaya atılmıştır. Kullanılan kaynağa göre yapılan sınıflandırmada iki tür yaklaşım bulunmaktadır (Agirre E., Edmonds P.,2006).

1. Bilgi tabanlı KAB (Knowledge-based word sense disambiguation)

2. Derlem tabanlı KAB (Corpus-based word sense disambiguation)

Bilgi tabanlı KAB’de sözlük benzeri (lexical) kaynaklardan alınan bilgi kullanılmaktadır. Makine tarafından okunabilen sözlükler, eşanlamlılar sözlüğü ve hesaplamalı sözlükler kullanılan kaynaklara örnek verilebilir. Bu yaklaşımda anlam belirsizliği olan kelimenin bulunduğu bağlamı ile birlikte sözlük benzeri kaynaklar kullanılarak KAB işlemi gerçekleştirilir. Derlem tabanlı KAB yaklaşımında bir derleme ihtiyaç duyulur. Derlem üzerinde gerçekleştirilen en başarılı yaklaşımlar istatistiksel yöntemler ve makine öğrenme algoritmaları olmuştur.

KAB alanında şimdiye kadar çalışmalar çoğunlukla İngilizce üzerine yapılmıştır. Türkçe için ise doğal dil işleme kaynaklarının (örn. WordNet, POS (Part Of Speech) etiketlemesi ve biçimsel analiz vb.) bulunmayışı veya kullanımlarında karşılaşılan problemler nedeniyle yapılmış çalışmalar çok azdır. KAB’ın Türkçe’ye uygulandığı KAB çalışmalarından makine öğrenmesi algoritmalarını kullanan çalışmalar vardır (Orhan Z., Altan Z., 2004; Orhan Z., Altan Z., 2005). Bir diğer çalışmada, Türkçe için eşdizimlilik bilgisi ile gerçekleştirilen KAB işlemi bulunmaktadır (Aydın Ö., Tüysüz M.A.A., Kılıçaslan Y., 2007). Ayrıca, geliştirilen uygulamada yöntem olarak belirlenen BLA’nın ve bunun yanında Lesk algoritmasının Türkçe üzerinde uygulandığı farklı bir çalışma da vardır (Mert E., Dalkılıç C., 2009).

3. YÖNTEM

Bu çalışmada bir derlemde elde edilen belirli uzunluktaki bağlamlar üzerinde bilgi tabanlı bir KAB gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirmede Basitleştirilmiş Lesk Algoritması (BLA) uygulanmış, elde edilen sonuçları iyileştirmek amacıyla ayrıca eşdizimlilik özelliğinden faydalanılmıştır. Çünkü hemen hemen tüm yerel ve diğer özelliklerin KAB için faydalı olduğu bilinmektedir ([Agirre E., Edmonds P., 2006).

Lesk algoritmasının (LESK M.,1986) farklı bir türevi olan BLA kelime anlamı kombinasyonlarındaki üstsöl artışını çözmek amacıyla oluşturulmuştur (Kilgarriff A., Rosenzweig J.,2000). Bu algoritmada bir kelimenin doğru anlamı o kelimenin sözlük tanımı ile geçerli bağlamı arasındaki en yüksek örtüşme hesaplanarak belirlenir. Bu algoritmaya ait adımlar aşağıda verilmiştir:

1. Belirginleştirilecek kelimenin tüm anlam tanımlarının makine tarafından okunabilen sözlükten alınması.
2. Her anlam tanımı ile bağlamdaki kelimelerin örtüşme sayılarının hesaplanması.
3. En yüksek örtüşmeyi sağlayan anlamın seçilmesi.

Örnek olarak “el” kelimesini ve bu kelimenin içinde geçtiği bir cümleyi ele alalım:

Dünkü oyunda son eli ben kazandım. (3)

(3) cümlesindeki kelimeler ile Tablo 3’deki “el” kelimesinin anlam tanımlarını oluşturan kelimelerin örtüşme sayısı Tablo 4’deki gibi bulunur.

Tablo 3. “El” kelimesinin anlamları

Anlam no	Anlam tanımı
1. anlam	Kolun bilekten parmak uçlarına kadar olan, tutmaya ve iş yapmaya yarayan bölümü.
2. anlam	İşkambil oyunlarında bir oyuncuya dağıtılan kağıtların tümü.

Tablo 4. “El” kelimesinin anlam tanımlarındaki kelimeler ile (3) cümlesindeki kelimelerin örtüşme sayısı

	(3) cümlesindeki kelimeler
1. anlam tanımını oluşturan kelimeler	0
2. anlam tanımını oluşturan kelimeler	1

Elde edilen bu hesaplama göre en fazla örtüşme kelimenin 2. anlam tanımı ile olmuştur. Burada örtüşme “oyun” kelimesi ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak “el” kelimesi verilen cümlede ikinci anlamı ile kullanılmıştır denir.

Gerçekleştirilen karşılaştırmalı bir uygulamada, BLA ile orijinal Lesk algoritmasından daha iyi duyarlılık (precision) ve etkinlik (efficiency) değerleri elde edilmiştir (Vasilescu F.,

Langlais P., Lapalme G.,2004). Senseval-2'deki tüm İngilizce kelimeler için yapılan belirginleştirme uygulamasında bu algoritma ile elde edilen duyarlılık oranı %58'dir. Bu oran aynı veri üzerinde uygulanan orijinal Lesk algoritması ile elde edilen %42'lik duyarlılık oranından fazladır. Ayrıca BLA'nın Lesk algoritmasına göre en önemli avantajı daha hızlı olmasıdır; böylece dikkat çekici düzeyde zaman karmaşıklığını azaltır.

Eşdizimlilikler KAB, kelime türü bilgisi (part of speech-POS) etiketleme ve makine çevirisi gibi doğal dil işleme uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bazı araştırmacılar KAB uygulamaları içerisinde özellikle makine öğrenmesi yaklaşımlarından biri olan öngörmeli öğrenme (supervised learning) yöntemlerinde eşdizimlilikleri önemli bir özellik olarak kullanmaktadırlar.

Eşdizimlilik terimi ilk olarak Firth tarafından tanımlanmıştır. Firth, bir kelimenin eşdizimlerini, o kelimenin sıklıkla birlikte kullanıldığı yapılar olarak tanımlamaktadır (Firth J. R.,1957). Benzer bir tanımda, “Sözcükbirimlerin anlamsal ya da dilbilimsel birlikteliklerinden kaynaklanan ve kullanım sıklığına bağlı olarak sözlükbirimsel özellik taşıyan söz birlikleri” denmiştir (Sterkenburg P. V., 2003).

KAB açısından eşdizimliliklerin kullanımı önemlidir. Çok anlamlı bir kelimenin yanına başka bir kelimeyi aldığı anda oluşturduğu kelime grubu ile anlam belirsizliğinden kurtulması mümkündür. Örneğin, “kahve” kelimesi tek başına birkaç anlama geliyorken, “kahve falı” kelime grubunda tek bir anlamı vardır.

Eşdizimlilikler, farklı kelime türlerinin oluşturduğu kelime öbeklerinde ortaya çıkabilir (OCDSE, 2003):

- sıfat ⇔ isim (kara yüz, özel hayat)
- zarf ⇔ fiil (kolayca yapmak, açıkça söylemek)
- isim ⇔ isim (duvar pası, yazar hakkı)
- niteleyici söz ⇔ isim (bir kısım, bir tarafa)
- fiil ⇔ isim (çıkılmaz yol, koşar adım)
- fiil ⇔ fiil (gezip gelmek, atıp tutmak)

...

Çalışma kapsamında kullanılan eşdizimlilikler sadece “isim ⇔ isim” ve “sıfat ⇔ isim” özelliği taşımaktadır. Çünkü yukarıda verilen kelime öbeklerinin tümünü kapsayan eşdizimliliklerin temin edilebileceği bir Türkçe Eşdizim Sözlüğü bulunmamaktadır.

4. GELİŞTİRİLEN UYGULAMA

Çalışma sırasıyla şu aşamalardan oluşmaktadır:

1. Kelime seçimi
2. Örnekleme toplama
3. Örneklerin hazırlanması
4. Gerçekleştirim
5. Değerlendirme

1. Kelime Seçimi: Uygulama için isim kategorisinde ve kaba anlamları belirgin bir şekilde ayrılmış çok anlamlı kelimeler seçilmiştir. Bu özellikleri taşıyan kelimelerin seçiminde Türk Dil Kurumuna (TDK) ait güncel sözlükten faydalanılmıştır (Türk Dil Kurumu Türkçe Sözlüğü). Seçilen kelimelerimiz “el”, “pas”, “hayat”, “hak” ve “yüz” kelimeleridir.

2. Örnekleme toplama: Örnekleme verisi olarak kullanılan bağlamlar Türkçe Ulusal Derlem’inden (TUD) elde edilmiştir (Türkçe Ulusal Derlemi). TUD, 50 milyon kelimededen oluşan, 20 yıllık bir dönemi (1990- 2009) kapsayan, günümüz Türkçesinin çok sayıda farklı alan ve türlerden yazılı ve sözlü örneklerini içeren, geniş kapsamlı, dengeli ve temsil yeterliliğine sahip, genel amaçlı bir referans derlemdir. TUD-Tanıtım Sürümü, 4438 veri kaynağından seçilen, 9 konu alanını ve 34 dilsel türü içeren metin örneklerinden oluşmaktadır. Kullanıcılar seçtikleri kelimeler için medya, metin örnekleme, konu alanı, türev metin biçimi, yazar cinsiyeti, yazar türü, hedef okur ve metin türü kısıtlama ölçütleriyle sorgularını gerçekleştirebilirler.

3. Örneklerin hazırlanması: Seçilen her kelime için kelimenin bağlamın ortasında bulunduğu HEDEFKELİME ± 5 uzunluğunda olan 100 bağlam kullanılmıştır. Verilen pencere uzunluğu sezgisel olarak belirlenmiştir, ancak bu alanda yapılan çalışmalarda kullanılan pencere uzunlukları da göz önünde bulundurulmuştur. Uygulamada kullanılan bağlamların seçimi TUD’da kelimeler için yapılan sorgu sonucu elde edilen bağlamlar içinden yapılmıştır. TUD-Tanıtım sürümü tek kelime ya da kelime grubunu bağlam içinde arama işlevine sahiptir. Bu arama sonucunda hedef kelimelerin

HEDEFKELİME $\bar{\tau}$ 35 kelimelik bağlamlarına erişebilmektedir. TUD’da hedef kelimeler için yapılan sorgularda 1990- 2009 yıllarını kapsayan kitaplardan bağlamların seçimi tercih edilmiştir. Çünkü kitaplardaki metinler editör sürecinden geçtiği için yazımsal bir hata bulunma olasılığı oldukça düşüktür. Böylece elde edilen bağlamlarda ayrıca yazımsal hata düzeltme işlemine ihtiyaç duyulmamıştır.

BLA’nın uygulanmasında ihtiyaç duyulan veriler, hedef kelimeye ait sözlük tanımı ve hedef kelimenin geçtiği bağlamlardır. Uygulama için seçilen kelimelerin sözlük tanımları TDK güncel sözlükten alınmıştır. Bu sözlükte kelimelerin anlamları kaba ve ince ayrımlı anlamları arasında ayırım yapmaksızın tanımlanmıştır. Lesk algoritması ve türevleri olan algoritmalar sözlük tanımına oldukça bağımlıdır. Sözlüklerdeki kelime tanımları ise maalesef oldukça kısadır ve kelimenin ince ayrımlı anlamları arasındaki farklılığı yeterince sağlamamaktadır. Bu sebeple uygulama sadece kaba ayrımlı anlamlar üzerinden yapılmıştır. Her kelime için ince ayrımlı anlamları bir araya getirilip kaba ayrımlı anlam grubu oluşturulmuştur. “Pas” kelimesi için oluşturulan bu yapı Tablo 5’de görülmektedir.

Tablo 5. “Pas” kelimesinin kaba ve ince ayrımlı anlamları

Kaba ayrımlı anlamları	İnce ayrımlı anlamları	Anlam tanımı
1	1	Su içinde ve nemli havada metallerin, özellikle demirin yüzeyinde oksitlenme sonucunda oluşan madde.
	2	Bazı asalak mantarların çeşitli bitkilerde oluşturduğu portakal sarısı veya kahverengi lekeler.
	3	Bu lekelerden ileri gelen bitki hastalığı.
	4	Demir veya demir alaşımlarının aşınması sonunda ortaya çıkan ve esas itibarıyla demir oksit ve hidroksitten meydana gelen aşınma türü.
	5	Bar
2	1	Bazı top oyunlarında oyuncuların birinin topu takım arkadaşına geçirmesi
	2	Bazı iskambil oyunlarında sırası kendisine gelen oyuncunun oyuna o elde katılmayacağını belirten bir söz

Tablo 6’da ise “pas” kelimesi için hazırlanan bağlam örneklerinden birkaç tanesi verilmiştir. Bu tabloda ayrıca hedef kelimenin verilen bağlamlarda hangi anlamlarıyla kullanıldığı bilgisi

de bulunmaktadır. Bu bilgi BLA'nın uygulanması sonucunda elde edilen sonuçların doğruluğunun testinde kullanılmıştır.

Tablo 6. “Pas” kelimesinin bağlam örnekleri

Bağlam	Kaba ayrımlı anlamı
bu cihandan. İçindeki küf ve pasa sevda ile çekti gitti bu	1
yaşayan bir dinazor çıkaramayız. Ama pasa bakarak demirin şeklini, kırıklara bakarak	1
ülkede yedik, sevdik sevildik ve kire pasa direndik yeniden sevdalanıyorum sana bunca	1
Bu, topu bir kişiden diğerine pas verme becerisinin gerçek bir alıştırması	2
değilim ya, diye düşünerek sulamayı pas geçiyorum. Bu akşam o kavunu	2

BLA'nın uygulanmasının ardından, elde edilen sonuçların iyileştirilmesi amacıyla kelimelerin eşdizimlilik özelliğinden faydalanarak yapılan belirginleştirme için hedef kelimelerin eşdizimlilikleri de TDK sözlüğünden alınmıştır. “Pas” kelimesi için oluşturulan yapı Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. “Pas” kelimesinin eşdizimlilikleri

Eşdizimlilik	Solundaki Kelime	Sağındaki kelime	Kaba ayrımlı anlamı
pas mantarı	?	mantarı	1
pas rengi	?	rengi	1
bodur pas	Bodur	?	1
kir pas	Kir	?	1
bakır pası	bakır	?	1
buğday pası	buğday	?	1
demir pası	emir	?	1
sektirme pas	sektirme	?	1
tek pas	tek	?	2
ara pası	ara	?	2
duvar pası	duvar	?	2

Uygulamada, bağlamlarda eşdizimlilik aranmasında HEDEFKELİME ± 3 yanındaki kelimelere bakılmıştır. Türkçe’de eşdizimlilik oluşturan yapıların birbirilerine olan

uzaklıklarının bu yapının oluşmasına etkisi üzerine bir tespit bulunmamaktadır. Bu yüzden uygulamadaki HEDEFKELİME \bar{F} 3 seçimine sezgisel olarak karar verilmiştir.

4. Gerçekleştirim: Uygulamada BLA ve eşdizimlilik özelliği bir arada kullanılarak belirginleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada örnekler üzerinde BLA ile KAB işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu algoritmanın uygulanamadığı bağlamlara ve hedef kelimenin anlamını doğru tespit edemediği bağlamlara iyileştirme amaçlı eşdizimlilik özelliği ile tekrar bir belirginleştirme işlemi uygulanmıştır.

BLA'nın uygulamasında bağlamı oluşturan kelimeler ve anlamı oluşturan kelimelerin karşılaştırması için öncelikle bu kelimelerin tümünün köklerinin bulunması gerekmektedir. Türkçe'nin eklemeli bir dil olması bu kök bulma işlemi zorunlu kılmaktadır. Bu işlem için de Türkçe için takı analizi yapan Zemberek yazılımı kullanılmıştır (Zemberek Projesi). Kök bulma işleminin sonucunda oluşan bağlam kelime köklerinden oluşmaktadır. Sonrasında tekrarlanan kelimelerin ve etkisiz kelimelerin (stop words) bu bağlamdan çıkarılmasına gerek duyulmuştur. Uygulamada kullanılan etkisiz kelimelerin belirlenmesinde Fatih Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Doğal Dil İşleme Grubunun hazırlamış olduğu Türkçe Etkisiz Kelimeler Listesi'nden faydalanılmıştır (F.Ü.B.M.B.D.D.İ.G.T.E.K.L). Çünkü tekrarlanan kelimelerin ve etkisiz kelimelerin bağlamlardan çıkarılmaması BLA'dan elde edilen sonucu da olumsuz etkilemektedir. Örneğin, hedef kelime için hatalı anlam bulunmasına neden olan durumlar ile karşılaşılmıştır. “Pas” kelimesinin içinde geçtiği aşağıda verilen (4) bağlamında bulunan “ve” kelimesi, “pas” kelimesinin Tablo 5’de verilen 1. kaba ayrımlı anlam tanımını içinde üç defa bulunmaktadır.

“takımın oyuncuları onu durduramıyordu. Koşuyor, pas veriyor, savunmaya yardım ediyor ve” (4)

BLA bu durumda (4) bağlamında “pas” kelimesinin 1. anlamı ile kullanıldığı sonucunu vermektedir. Buradaki “ve” kelimesi hem etkisiz bir kelimedir, hem de birden fazla anlam tanımında bulunmaktadır. Anlam tanımından bu kelimenin çıkarılması, Basitleştirmiş Lesk algoritmasının anlamı etkileyen “oyuncu” kelimesini bularak doğru olan 2. anlamı atamasına neden olur.

Uygulamanın devamında BLA'nın uygulanmadığı bağlamlar ve algoritmanın hatalı olarak sonuç verdiği bağlamlara iyileştirme amaçlı, eşdizimlilik özelliği ile tekrar bir KAB işlemi uygulanmıştır. Verilen bağlamlar içindeki eşdizimlilikler hedef kelimenin sağında ve solunda bulunan HEDEFKELİME \mp 3 uzaklıktaki kelimelere bakılarak tespit edilmiştir. Zemberek yazılımı ile kök bulma işlemi hem bağlamdaki kelimelere hem de eşdizimliliği oluşturan kelimelere uygulandıktan sonra karşılaştırma yapılmıştır.

5. Değerlendirme: KAB için performans değerlendirme ölçütleri olarak duyarlılık ve geriçağırım (recall) kullanılmaktadır ([Ağırre E., Edmonds P.,2006). Bu performans ölçütlerinin KAB için nasıl ifade edildiği aşağıda verilmiştir:

$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{Anlamı doğru olarak belirginleştirilen örnekleme sayısı}}{\text{Sistem tarafından belirginleştirilen toplam örnekleme sayısı}}$$

$$\text{Geriçağırım} = \frac{\text{Anlamı doğru olarak belirginleştirilen örnekleme sayısı}}{\text{Toplam örnekleme sayısı}}$$

BLA'nın ve eşdizimliliklerin bir arada kullanılması sonucu geliştirilen sistemin değerlendirmesi Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Duyarlılık ve geriçağırım değerleri

Kelimeler	BLA		Eşdizimlilik bilgisi		BLA&Eşdizimlilik bilgisi	
	Duyarlılık	Geriçağırım	Duyarlılık	Geriçağırım	Duyarlılık	Geriçağırım
El	0.90	0.38	0.91	0.32	0.91	0.58
Hak	0.79	0.23	1	0.47	0.91	0.59
Hayat	0.96	0.46	1	0.28	0.97	0.61
Pas	0.87	0.46	0.97	0.69	0.91	0.83
yüz	0.63	0.27	1	0.34	0.76	0.52
Ortalama	0.83	0.36	0.98	0.42	0.89	0.63

KAB literatüründe anlam etiketleme görevi olan uygulamalarda doğruluk (accuracy) değeri geriçağırım olarak değerlendirilmektedir (Palmer M., NG H. T., DANG H. T.,2006). BLA'nın uygulanması sonucunda elde edilen başarı oranı %36'dır. Örnekleme verisi içinde anlamı hatalı bulunan bağlamlar ve algoritmanın anlam ataması yapmadığı bağlamlar üzerinde eşdizimliliklerin aranması ile birlikte bu oranın %63 değerine çıktığı görülmektedir.

Uygulamada kelime köklerinin tespitinde kullanılan Zemberek yazılımı kimi durumda kelimenin yapısına göre birden fazla kök üretebilmektedir. Birden fazla kök olması durumu uygulama içerisinde göz ardı edilerek kök bulma modülünün üretmiş olduğu ilk kelime kökü değerlendirmeye alınmıştır. Bunun sonucu olarak BLA’da hatalı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiş ancak bu sonuçların kullanılan bağlam örnekleri içindeki sayısının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan eşdizimlilik özelliğine etkisine bakıldığında rastlantısal olarak doğru sonuçlar ürettiği de gözlemlenmiştir. “El” kelimesinin geçtiği (5) bağlamında rastlantısal olarak doğru olan 1. anlam bulunmuştur. Bu rastlantısal sonuç “el birliği” eşdizimliliğinden “bir” kökü ile bağlamdaki “birileri” kelimesinden gelen “bir” kelimesi eşleşmesi ile ortaya çıkmıştır.

“uzun bir tirada zamanın vardır, el çırpır birileri, bir iki damla” (5)

Bağlamalarda eşdizimlilik aranmasında HEDEFKELİME $\bar{\tau}$ 3 uzunluğunun belirlenmesi çoğu durumda doğru sonuç üretmiştir. Ancak bazı durumlarda rastlantısal doğru sonuçlar üretilmesine ve oldukça az sayıda hatalı sonuç elde edilmesine neden olmuştur. Rastlantısal olarak doğru sonuç üretilen (6) bağlamında “el ilanı” eşdizimliliği ile bir eşleşme gerçekleşmiştir. Halbuki bu bağlamda bu eşdizimlilik bulunmamaktadır.

“sürerdi bu sayfayı bitirmesi. Kimseler elinden alamazdı bu ilanların baştan sona” (6)

Eşdizimlilik özelliğinin hatalı anlam ataması yaptığı bir örnek (7) bağlamında gerçekleşmiştir. Burada “el adamı” eşdizimliliği nedeniyle 2. anlamı atanmıştır, ancak “el” kelimesi bu bağlamda 1. anlamı ile bulunmaktadır.

“merdivenler adeta yıkılırcasına ses verdi. Elleri silahlı üç adam kapının önünde” (7)

Elde edilen sonuçlar ışığında, eşdizimlilik özelliğinin KAB işlemine etkisinin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Uygulamada sadece TDK sözlüğünden alınan eşdizimliliklerle işlem yapılmıştır. Örnek bağlamlara baktığımızda bazılarının TDK sözlüğünde bulunmayan eşdizimli yapıları içerdiği görülmüştür. Aşağıdaki “el tezgahı” eşdizimliliğini içeren (8) bağlamı buna bir örnektir.

“yankılanıyor çarşıda. Küçük birkaç dükkanda el tezgahlarında ipek bürgü dokuyan dokuma” (8)

Bazı bağlamlardaki eşdizimli yapılar tespit edilebilseydi daha yüksek bir başarımla elde edilebileceği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak, hedef kelimeler için eşdizimliliklerinin alınabileceği bir kaynak olarak Türkçe Eşdizimli Sözlükler'in hazırlanmasının KAB çalışmalarında faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Eşdizim Sözlükleri dilde kelimeler arasındaki anlam ve sözdizimi ilişkilerini vermesi sebebiyle bir dilin işleyişini ve yapısını ortaya koyması açısından da önem arz etmektedir (Çetinkaya B.,2009). Bu konuda Türkçe için hazırlanmış bir "Türkiye Türkçesi Eşdizim Sözlüğü'nün Sayısallaştırılması" projesi bulunmaktadır (T.T.E.S). Ancak kullanıma açıldığı belirtilen bu çalışma için verilen internet sayfasına erişim mümkün olmamaktadır. Bunun yanında proje bilgilendirme sayfasında fiil ⇔ zarf || sıfat ⇔ isim yapısında eşdizimlilikleri belirlendiği belirtilmektedir (T.T.E.S.S.P.B.S). Eğer bu çalışma içinde kullanılabilseydi sadece sıfat ⇔ isim yapısındaki eşdizimliliklerin elde edilmesinde faydalı olabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, isim türünde seçilen beş kelime için BLA ile eşdizimlilik bilgisinden faydalanılarak bir KAB uygulaması geliştirilmiştir. Uygulamadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, diğer bilgi tabanlı KAB uygulamaları içerisinde % 89 duyarlılık ve %63'lük geriçağırım ile başarılı olduğu söylenebilir.

Uygulamanın yapılışı esnasında ortaya çıkan durumlar ve bunlara üretilen çözümlerden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında bazı tespitlerde bulunulmuştur. Hedef kelimenin eşdizimlilik oluşturduğu kelime ile bir kelime öbeği oluşturup oluşturmadığı durumunun tespitinin doğru eşdizimliliğin bulunmasında faydalı olabileceği düşünülmektedir. Bağlamda bir ayrıştırma (parsing) işlemi uygulanarak bu sağlanabilir. Bunun yanında, uygulamada kelime kökünün bulunması işleminde birden fazla kökün bulunduğu durumlar ile karşılaşmaktadır. Burada bu köklere gelen eklerin kontrolü ile doğru kökün tespit edilmesi hem BLA'nın hem de eşdizimliliklerin uygulanmasında doğruluk oranını artıran bir sonuç verebilir.

KAYNAKLAR

- KURUDAYIOĞLU M., KARADAĞ Ö., Kelime Hazinesi Çalışmaları Açısından Kelime Kavramı Üzerine Bir Değerlendirme, Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, 293-307, 2005.
- IDE N., VERONIS J., Word Sense Disambiguation: The State of the Art, Computational Linguistics, 1998.
- AGIRRE E., EDMONDS P., Word Sense Disambiguation: Algorithms and Applications, E. Agirre and P. Edmonds, Eds. Springer, New York, 2006.
- ORHAN, Z., ALTAN Z., Makine Öğrenme Algoritmalarıyla Türkçe Sözcük Anlamı Açıklaştırma, ELECO'2004 , Bursa/Türkiye, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, pp. 344-348, 2004.
- ORHAN Z., ALTAN Z., Determining Senses for Word Sense Disambiguation in Turkish, International Enformatika Conference (IEC'05) , August 26-28, 2005.
- AYDIN Ö., TÜYSÜZ M.A.A., KILIÇASLAN Y., Türkçe için bir Kelime Anlamı Belirginleştirme Uygulaması, XII. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2007.
- MERT, E., DALKILIÇ, C.: Word sense disambiguation for Turkish. In: 24th International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS 2009), Guzelyurt, September 14-16, pp. 205–210, 2009.
- LESK M., Automated Sense Disambiguation Using Machine-readable Dictionaries, Proceedings of the SIGDOC Conference, 1986.
- KILGARRIFF A., ROSENZWEIG J., Framework and Results for English SENSEVAL, 2000.

- VASILESCU F., LANGLAIS P., LAPALME G., Evaluating variants of the Lesk approach for disambiguating words, LREC 2004, 2004.
- FIRTH J. R., Modes of Meaning, Papers in Linguistics 1934-1951, London:Oxford University Press, s. 190-215, 1957.
- STERKENBURG P. V., A Practical Guide to Lexicography. Amsterdam/Philedelphia: John Benjamins Publising Company, 2003.
- OCDSE, Oxford Collocation Dictionary for Students of English, Oxford University Press, 2003.
- Türk Dil Kurumu Türkçe Sözlüğü, <http://tdk.org.tr/tdksozluk>.
- Türkçe Ulusal Derlemi, <http://www.tnc.org.tr/index.php/tr/>.
- Zemberek Projesi, <https://zemberek.dev.java.net/>.
- Fatih Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Doğal Dil İşleme Grubu, Türkçe Etkisiz Kelimeler Listesi, <http://nlp.ceng.fatih.edu.tr/blog/tr/?p=31>, 2010.
- PALMER, M., NG, H. T., AND DANG, H. T., Evaluation of WSD systems. In Word Sense Disambiguation: Algorithms and Applications, E. Agirre and P. Edmonds, Eds. Springer, New York, NY, 75–106, 2006.
- ÇETİNKAYA B., Eşdizimli sözlükler. Turkish Studies International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic, 4 (4): 196-206, 2009.
- Türkiye Türkçe'sinin Eşdizim Sözlüğü, <http://esdizim.mersin.edu.tr/>.
- Türkiye Türkçesi Eşdizim Sözlüğü'nün Sayısallaştırılması Projesi Bilgilendirme Sayfası, http://tuam.mersin.edu.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=65.

TEL ÇEKME İŞLEMİNDE REDÜKSİYON ORANININ AKMA VE ÇEKME MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Cem S. ÇETİNARSLAN¹, Serhan Karaman GENÇ^{2*}, Ali GÜZEY³

^{1,2}Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Edirne, Türkiye

³Arsay Tel Fabrikası, Kırklareli, Türkiye

* serhankaraman@trakya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada C oranları farklı olan çelik malzemelere (SAE1006, SAE1015, SAE1010B22) tel çekme işlemi uygulanmıştır. Bu uygulamadaki parametreler %C oranı ve redüksiyon oranıdır. Daha sonra, elde edilen deney numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Uygulanan bu testler sonucunda akma ve çekme mukavemeti, redüksiyon ve %C oranıyla ilişkilendirilmiştir. C oranının ve deformasyon (redüksiyon) oranının malzemelerin akma ve çekme dayanımlarını etkilediği saptanmıştır

Anahtar kelimeler: Redüksiyon oranı, tel çekme, %C oranı, akma mukavemeti, çekme mukavemeti

REDUCTION RATIO EFFECTS ON YIELD AND TENSILE STRENGTH IN WIRE DRAWING PROCESS.

ABSTRACT

In this study, wire-drawing process was applied material which have different C content (SAE1006, SAE1015, SAE1010B22). % C ratio and the reduction ratio are the parameters of this application. The tensile test was applied to samples obtained. As a result of these tests, %C rate and reduction rates were associated with yield and tensile strength. It was determined that the %C rate and reduction rates affect the yield and tensile strength.

Key words: Reduction ratio, Wire-drawing, %C ratio, Yield strength, Tensile strength.

1. GİRİŞ

Metal ve makine sanayisinin vazgeçilmez unsurlarından olan demir esaslı ürünlerin başında demir esaslı teller ve bu tellerden üretilmiş çeşitli boyutlarda ve özelliklerde parça ve parça takımları gelmektedir. Örneğin çivi, zincir, vida, civata, perçin gibi bağlantı elemanları, elektrik kabloları gibi elektriksel elemanlar, su tesisatı kelepçeleri, müzik aletleri vb. gibi birçok ürünlerin mamul olmadan önceki halleri tellerden ibarettir.

Telin M.Ö. 3000 yıllarından itibaren kullanılmaya başlandığı tahmin edilmektedir. 12. y.y.'dan itibaren çekme matrislerinden bahsedilmeye başlandığı görülmektedir. 1350 'li yıllarda ise artık endüstriye ilk makineleşmiş (su kuvvetiyle çalışan) tel çekme donatımını getiren, Nuremberg'li Rudolph olmuştur. Aynı yıllarda İngiltere'de Londra, York, Coventry ve Bristol'de bir grup sanatkâr, önemli bir ulusal endüstri haline gelmiş olan bu endüstriyi meydana çıkarmışlardır. Yünlü mamuller endüstrisinin gelişmesi, yün tarakları yapmak amacıyla tel imalatını teşvik etmiş ve bu sanat erbabı, Yorkshire gibi yünlü mamullerin çok olduğu bölgelerde kendi kendilerini teşvik etmiştir ki, bu gün bile bu bölgeler İngiltere'de, çok miktarda tel çekme atölyelerinin bir araya toplandıkları yerlerdir (Balin,2004; Özer,1993) 1862'de George Bedson ilk defa sürekli haddelerle tel çekilmesini sağlamıştır. Osram ve Krup şirketleri lamba flamanlarının seri imalatçısı olmuşlardır. Matrisler elmasa benzer bir malzemeden yapılıp, ilk defa 1925 yılında Amerika'da işletmeye konulmuştur. 1929'dan beri Amerika'da General Electric, Firth Sterling gibi şirketler halen tungsten karbür matrisler üretmektedir. Tel imalat tarihinin ilk günlerinden itibaren telcilerin başlıca gayeleri; endüstride işlemlerin tamamen otomatize olması, daha uzun ve ağır tel kangalların kullanılması, geliştirilmiş kaynak teknikleri, daha iyi matrisler ve yüksek metalürjik kalite olarak bilinmektedir.(Güzey,2009)

Beretta ve Boniardi, 1998'de, ötektoid çelik tellerde yorulmanın yüzey hatalarına etkilerini incelemişlerdir. Tiernan ve Hillery, 2008'de, matris kullanmadan tel çekme yöntemleri hakkında analizler ve çalışmalar yapmışlardır. Bu yöntemde çekilecek tellerin bir matris içerisinden geçerek değil de ekseriyetle sıcaklığa ve hıza bağlı plastik deformasyonların merkezkaç kuvvetlerinin etkileriyle telin çapının küçültülmesi çalışmaları üzerinde durmuşlardır. Murakawaa, Jina, ve Hayashib, 2004'te elmas kaplı haddeler kullanarak kuru ve yarı ıslak tellerin çekilebilirliğini incelemiştir. Özellikle ultrasonik titreşim metodu ile birlikte elmas haddelerin kullanımının alüminyum bazlı tellerin üretiminde başarı

olduğunu göstermişlerdir. Brard 1991'deki çalışmalarında, çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum tel çekme işleminde kullanılan kuru ve sıvı yağlayıcıların özellikle yüzey temizleme işlemleri, kalsiyum ve sodyum sabunların tel yüzeyine ve çekmeye etkileri üzerinde durmuştur. Koner, 1992'de tungsten karbür matrislerin sahip olması gereken özellikleri üzerine çalışmıştır. Matris geometrisi, giriş, redüksiyon alanı, yataklama ve çıkış olmak üzere dört ana başlıkta incelemiştir. McNulty 2006'daki makalesinde, tel çekme hızının artırılması, makine kapasitelerinin artırılması, pratik matris değişiminin ve elektronik kontrollü değişken makine tiplerinin işlem verimliliğini artıracaklarını belirtmiştir. Pilarczyk 2006'daki deneylerinde, tellerin içyapısını incelemiştir. Redüksiyon miktarı arttıkça, hidrodinamik ve geleneksel metotla çekilmiş telin içyapısının, makara matrisle çekilene göre keskin olduğunu, homojen olmadığını üç boyutlu topografi çekerek göstermiştir. Varol 1995'deki makalesinde, tel çekme işleminde ara tavlama yapılmadığı sürece deformasyon oranı ile birlikte malzemenin akma dayanımı ve sertlik oranının artacağını, bununla birlikte deformasyon oranı artışı ile birlikte % kesit daralması değerinin düşeceğini deneylerle göstermiştir. (Ünseren M., 2006)

Teknolojik olarak incelemede, tel çekme için esas olan malzeme akışı ele alınmaktadır. Malzeme akışının düzenli olup olmaması, çekme kuvvetine, çekme işine ve bunların sonucu olarak çekilen telin kalitesine etki etmektedir. Burada amaç, minimum çekme kuvveti ve işi ile en hatasız mamulü elde etmektir. Tümü dikkate alındığında malzeme akışının önemi ortaya çıkmaktadır.

Tel çekmede malzeme akışına etkiyen en önemli faktörler;

- Çekilen malzemenin cinsi
- Yağlama
- % Redüksiyon
- Matris ve matris açısı

Bu çalışmada da % Redüksiyon ve karbon yüzdesi bakımından malzemenin cinsi faktörleri çeşitlendirilerek, yapılan çekme deneyleri neticesinde elde edilen akma ve çekme mukavemetleriyle ilişkilendirilecektir.

2. MATERYAL ve METOT

Yapılacak olan çekme deneyleri için % karbon değerleri, birbirine farklı oranlarda ve yakın üç farklı malzeme seçilmiştir. Bunlar: SAE1006, SAE1015, SAE1010B22'dir (Tablo 1). Bu malzemelerden C-S analizi sonucunda elde edilen karbon değerleri sırasıyla; %0.06, %0.14, %0.21'dir. Gerekli hazırlık safhalarından sonra (mekanik temizleme, kimyasal temizleme) sabit redüksiyon oranında çap 5.5'ten 4.81'e düşürülmüştür. Değişken redüksiyon oranlarında ise çap 5,5'ten önce 4.81'e sonra 4,0'a ve en son da 3.01' düşürülmüştür(Tablo 2 ve Şekil 1). Deney numunesi olarak 250 mm uzunluğunda, farklı ve aynı redüksiyon oranları uygulanmış teller kullanılmıştır. Redüksiyon oranları aşağıdaki denklem ile elde edilmiştir.

$$R\% = \frac{D_{giris}^2 - D_{çiktis}^2}{D_{çiktis}^2} \times 100 \quad (1)$$

Tablo 1. Tel çekmede kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	%C	%Si	% Mn	%P	%S	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	% B
SAE 1006	0.06	0.2	0.35	0.04	0.05	0.3	0.15	0.3	0.03	-	-
SAE 1015	0.14	0.15	0.40	0.02	0.015	0.1	0.08	0.1	0.05	0.03	
SAE 10B22	0.21	0.15	1.00	0.015	0.015	0.1	0.08	0.1	0.05	0.02	0.002

Tablo 2. Sabit ve değişken redüksiyon oranlarında geçilen kademelerdeki çap değişimleri

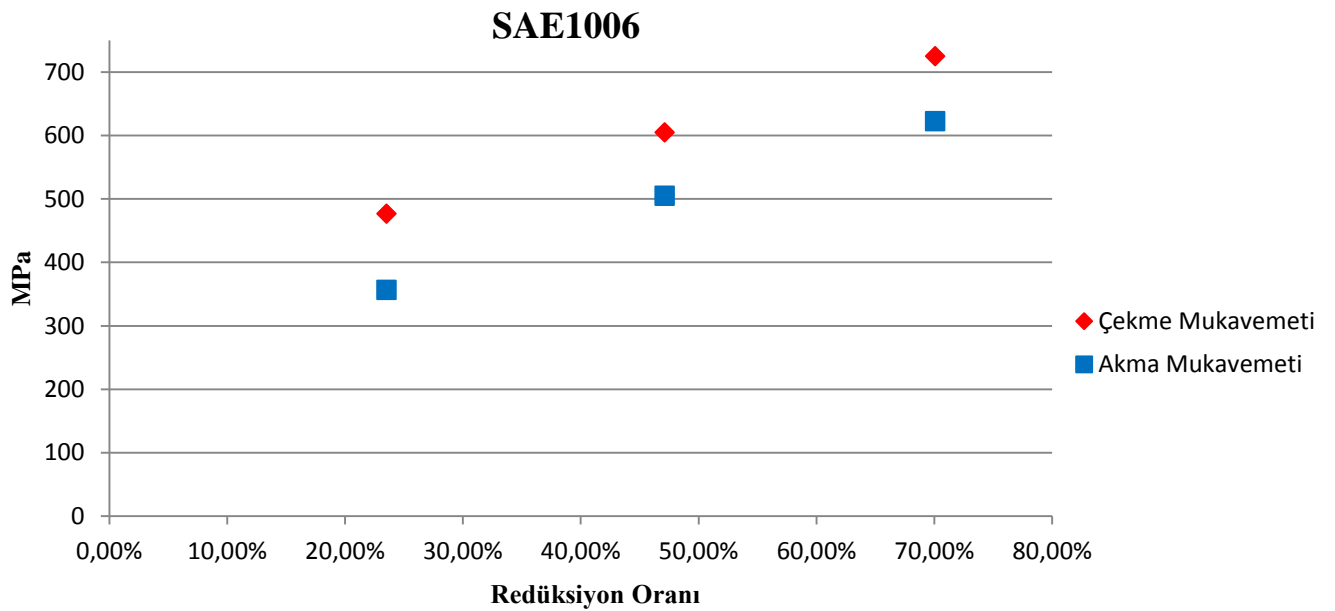
	1.Kademe	2.Kademe	3.Kademe	4.Kademe
Değişken Redüksiyon Oranında Çap Değişimi	5.5	4,81	4,0	3,1
Sabit Redüksiyon Oranında Çap Değişimi	5,5	4,81		



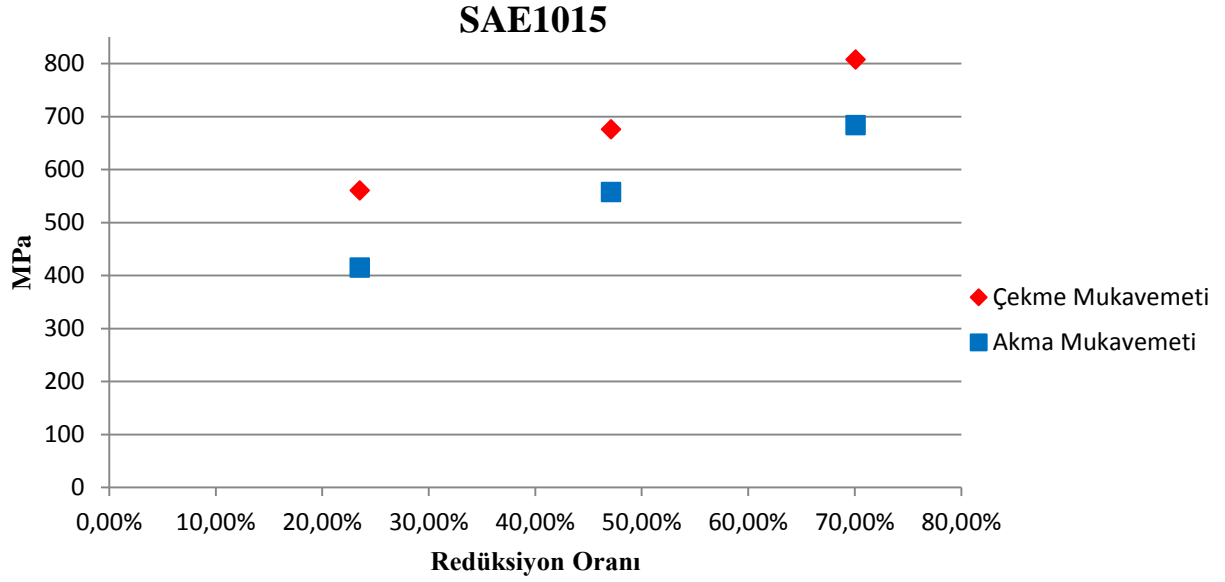
Şekil 1. Tel çekme prosesi ve üretim hattı

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

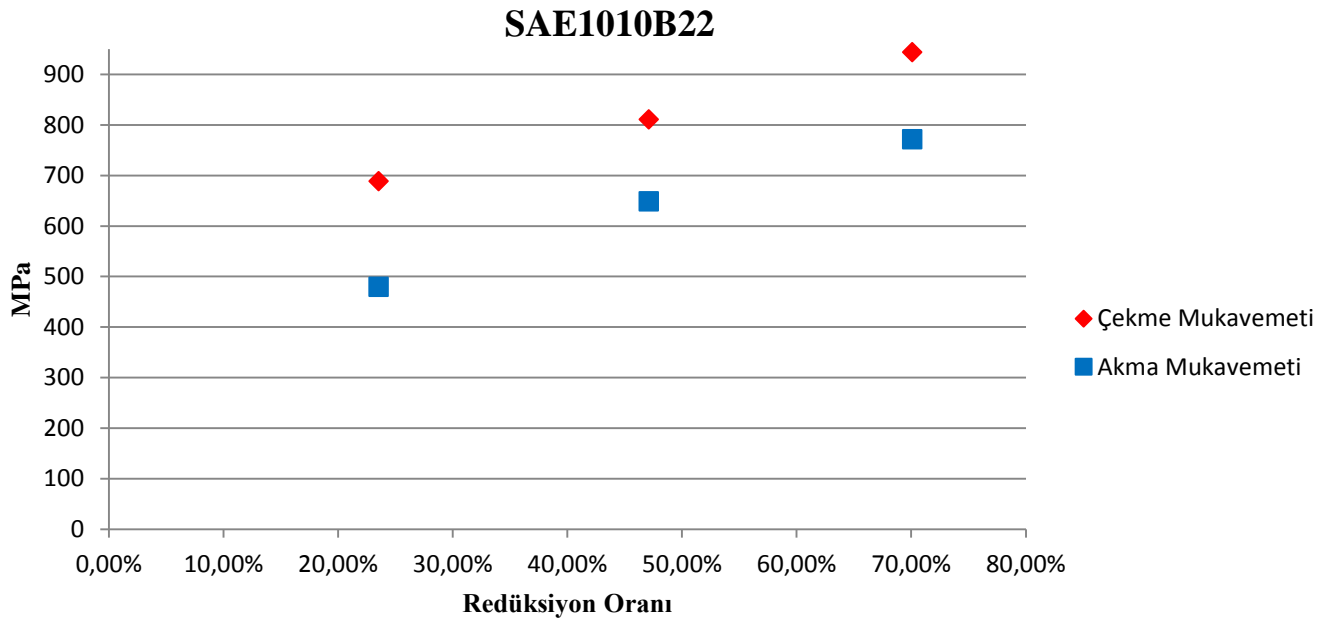
Redüksiyon oranları değiştirilerek dört farklı malzemeye yapılan tel çekme işleminden sonra elde edilen 250mm uzunluğundaki deney numunelerine çekme testleri uygulanmış ve bu deneylerin sonuçları aşağıda verilen tablo ve grafiklerde redüksiyon oranıyla ilişkilendirilmiştir.



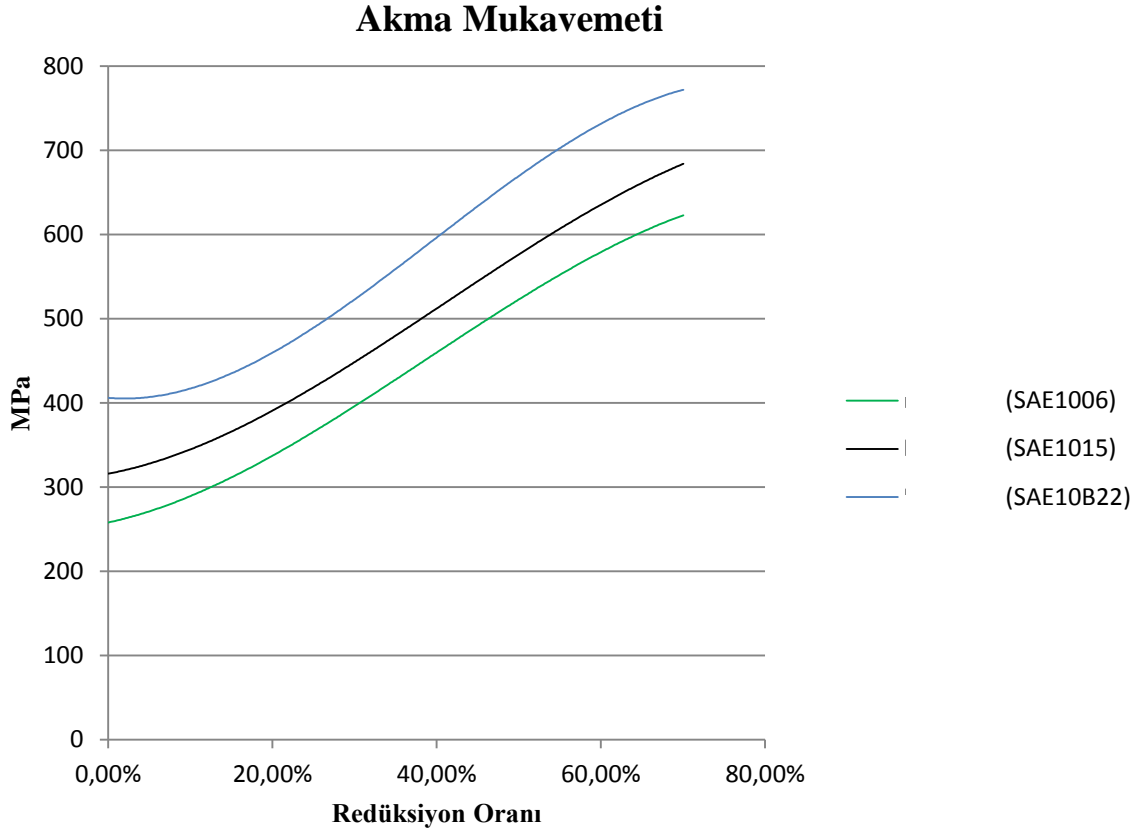
Şekil 2. SAE1006 malzemesinde redüksiyon oranı ile akma ve çekme mukavemeti ilişkisi



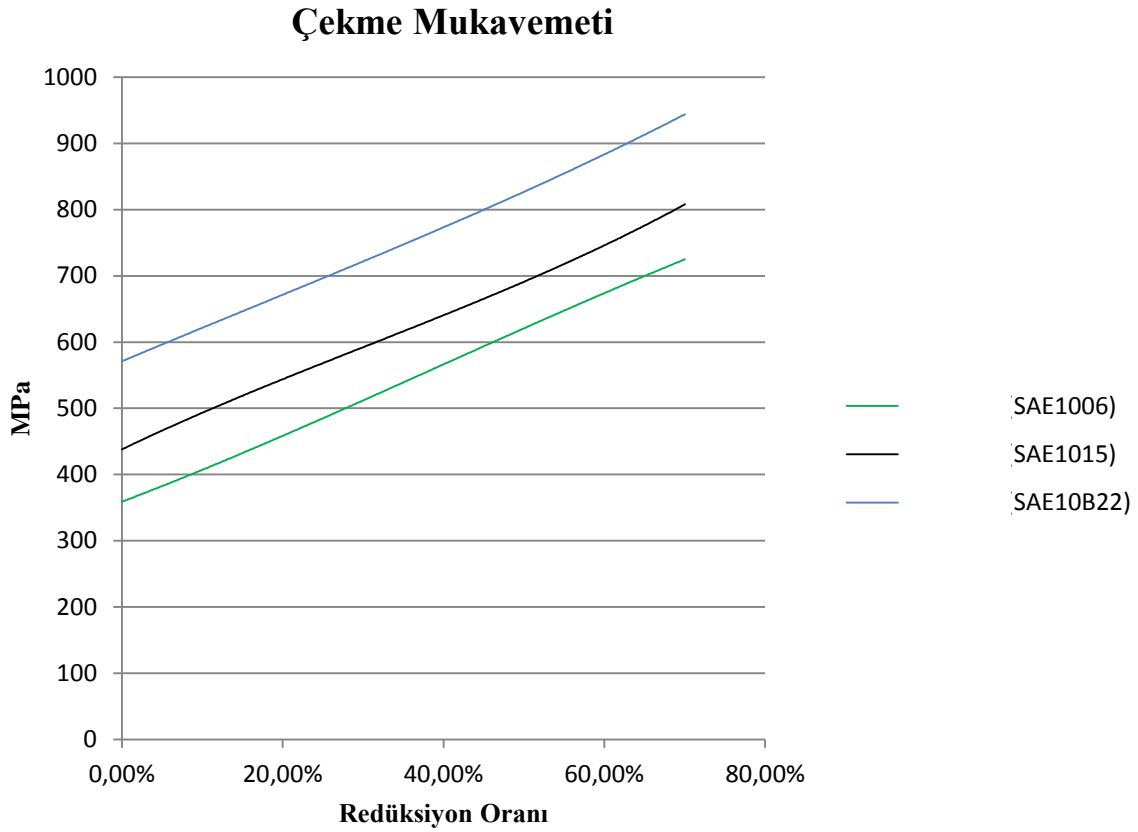
Şekil 3. SAE1015 malzemesinde redüksiyon oranı ile akma ve çekme mukavemeti ilişkisi



Şekil 4. SAE1010B22 malzemesinde redüksiyon oranı ile akma ve çekme mukavemeti ilişkisi



Şekil 5. Farklı malzemelerin (değişik %C oranı) Redüksiyon oranlarıyla akma mukavemetleri ilişkisi



Şekil 6. Farklı malzemelerin (değişik %C oranı) Redüksiyon oranlarıyla çekme mukavemetleri ilişkisi

Tablo 3. Sabit redüksiyon oranında yapılan test sonuçlarına göre akma ve çekme dayanımı artış miktarları

SAE1006		SAE1015		SAE10B22	
Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)	Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)	Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)
100	120	125	151	160	209
100	121	126	147	150	208
104	124	120	157	140	195

Tablo 4. Redüksiyon oranındaki artış ile malzeme, akma dayanımı artışı ve çekme dayanımı artışı ilişkisi

% Redüksiyon Oranı Artışı	SAE1006		SAE1015		SAE10B22	
	Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)	Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)	Akma Dayanımı Artışı (MPa)	Çekme Dayanımı Artışı (MPa)
99	188	94	123	74	118	
258	246	242	238	243	240	
365	366	368	370	366	373	

Çeliklerin temel alaşım elementi olan karbon, çeliklerin üretim işlemleri sırasında yapıdaki yerini alır. Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır. Bu durumdan dolayıdır ki bu deneylerde düşük karbonlu çelikler seçilmiştir. Şekil 2-4'te görüldüğü üzere karbon oranı daha yüksek olan malzeme akma ve çekme mukavemeti değerleri daha yüksek çıkmıştır. Redüksiyon oranı ne olursa olsun bu değişmemiştir. Şekil 5 ve 6'de malzemelerin (%C oranlarının) birbirlerine göre akma ve çekme değerlerinde değişen redüksiyon oranına göre karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 3.'ye bakacak olursak; aynı redüksiyon oranıyla, yani aynı plastik şekil değişimine maruz kalan ve %C oranları farklı üç malzemenin akma ile çekme dayanımının deformasyon öncesi ve sonrası aldığı değerler farkıyla, yani artış miktarıyla, çekme dayanımı farkı kıyaslandığında artan plastik şekil değişimiyle her ikisinin de değerleri artarken, aralarındaki farkların %20'den %36'ya çıkarak arttığı, yani birbirlerinden uzaklaştıkları gözlemlenmiştir. Bu oranları redüksiyon oranının değiştirerek gözlemlediğimizde tablo 4. oluşmuştur. Buna göre: redüksiyon oranının artmasıyla, akma dayanımındaki artışın oranını koruyarak diğer malzemelerde de (%C oranı farklı) tekrarladığını ve bu benzerliği çekme dayanımı artışında da koruduğu görülmektedir.

Özetle; Farklı C oranlarına sahip çelik tellerin çekme deneyi sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Artan redüksiyon oranıyla akma ve çekme mukavemeti değerlerinin arttığı görülmüştür. (Cho ve ark., 2002; Alawode ve Adeyemi 2005)
- Akma ve çekme eğrileri arasındaki fark artan deformasyonla beraber artmıştır
- Ayrıca %C değerleri farklı da olsa (düşük karbonlu) redüksiyon oranı artınca, ilerleyen deformasyon oranlarında, akma ve çekme mukavemeti değerlerindeki artış miktarı aynı olacak kadar birbirine yaklaşması dikkat çekici bir bulgudur.

KAYNAKLAR

- ALAWODE A.J., ADEYEMI M.B. Effects of degrees of deformation and stress-relief temperatures on the mechanical properties and residual stresses of cold drawn mild steel rods. *Journal of Materials Processing Technology*. 160/2: 112-118, 2005.
- BALİN, B. Seçilen Karakteristiklerin Tel Çekme İşlemi Üzerindeki Etkileri. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 71 s, İstanbul. 2004.
- BERETTA S., BONIARDI M. Fatigue Strenght and Surface Quality of Eutectoid Steel Wires. *International Journal of Fatigue* ,1999.
- BRARD, D., Lubrication – Quality and Innevation, *Wire Industry*, 733-734. 1991.
- CHO H., JO H.-H., LEE S.-G., KIM B.-M., KIM Y.-J., Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wiredrawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 2002.
- GÜZEY A., Demirsel Tellerin Üretim Sürecinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne 2009.
- KONER, S., Tungsten Carbide Wire Drawing Dies, *Wire Industry*, 350-356. 1992.
- MCNULTY, M., Spotlight on Drawing Machines, *Wire and Cable Technology*, 54–56. 2006.
- MURAKAWAA M., JINA M., HAYASHIB M. Study on semidry wire drawing using DLC coated dies. *Surface and Coating Technology*, 2004.
- PILARCZYK, J. W., The Effect of Roller Die Drawing on the Mechanical Properties and Some ASTRO Characteristics of High Carbon Steel Wires, *Wire Industry*, 80-93. 2006.

TIERNAN P. HILLERY M.T. An analysis of wire manufacture using the dieless drawing method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008.

ÜNSEREN, M. Tel Çekme Matrisleri Üzerine Bir Araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi 123 s, Isparta 2006.

VAROL, R. Az Karbonlu Çeliklerde Tel Çekme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23-29. 1995

YAZIM KURALLARI

Trakya University Journal of Engineering Sciences, her yıl Haziran ve Aralık aylarında olmak üzere yılda iki sayı çıkar ve Türkçe veya İngilizce dillerinde **Mühendislik ve Mimarlık** alanındaki teorik ve deneysel makaleleri yayınlar. Dergide orijinal çalışma, araştırma notu, derleme, teknik not, editöre mektup, kitap tanıtımı yayınlanabilir. Makalelerin başlıkları Türkçe ve İngilizce olarak yazılır. Basılacak eserlerin daha önce hiçbir yerde yayınlanmamış ve yayın haklarının verilmemiş olması gerekir. Dergide yayınlanacak yazıların her türlü sorumluluğu yazar(lar)ına aittir. Dergimizde Türkçe ve İngilizce metinler yayınlanabilir. Ancak, metin İngilizce yazılmış ise Türkçe özet, Türkçe yazılmış ise geniş İngilizce özet olmalıdır. İngilizce özet kısmında kısaca giriş, materyal ve metod, sonuçlar ve tartışma başlıkları yer almalıdır. ***İngilizce olarak yazılan makalelere yayın önceliği verilir.***

Makalelerin sunulması

Makaleler e-posta yoluyla editör veya editör yardımcısına gönderilir. Makalede yer alan tüm yazarlar, çalışmalarının yayın haklarını ***Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'***ne verdiklerine dair **Telif Hakları Formu'**nu imzalamalıdır. Makalede yer alan tüm şekil, resim, tablolar v.s. elektronik ortamda sunulmalıdır. Dergi yönetimi bunları elektronik ortama aktarmaktan sorumlu değildir.

Makale sunumu yapılırken:

- Makalenin dergiye sunulduğuna dair üst yazı.
- Makale ile ilgili dökümanlar
- Yazarlar tarafından imzalanmış olarak Telif Hakları Devretme Formu (*Bu form editörden veya dergi internet sitesinden alınabilir*), Editör veya Editör yardımcısına iletilmelidir.

Eserler, Yayın Komisyonu'na **Word** programıyla **12 punto** büyüklüğündeki **Times New Roman** tipi harflerle ve en az 1.5 aralıklı olarak yazılmış olarak gönderilir. ***Makaleler, 15 basılı sayfayı geçmemelidir.*** Yazar adları yazılırken herhangi bir akademik unvan belirtilmez. Çalışma herhangi bir kurumun desteği ile yapılmış ise, birinci sayfanın altına kurumun bu çalışmayı desteklediği yazılır.

Makale aşağıdaki sıraya göre düzenlenir:

Başlık: Kısa ve açıklayıcı olmalı, büyük harfle ve ortalanarak yazılmalıdır.

Yazarlar: Adlar kısaltmasız, başlığın altına yan yana, soy adlar büyük harfle ortalanarak yazılır. Adres (ler) tam yazılmalı, kısaltma kullanılmamalıdır. 1'den fazla yazarlı çalışmalarda, yazışmaların hangi yazarla yapılacağı belirtilmeli ve **yazışma yapılacak yazarın adres, telefon, fax ve e-posta adresi başlığın hemen altına yazılmalıdır.**

zet ve Anahtar kelimeler: Türkçe ve İngilizce zet 250 kelimeyi geçmemelidir. zetin altına küçük harfle ve yanına anahtar kelimeler (key words) yazılmalıdır. Anahtar kelimeler, zorunlu olmadıkça başlıktakilerin tekrarı olmamalıdır. İngilizce zet sayfanın sol kenarından "Abstract" sözcüğü ile başlamalı, ve İngilizce başlık İngilizce zetin üstüne büyük harfle ortalanarak yazılmalıdır. Makaledeki ana başlıklar ve varsa alt başlıklara **numara verilmemelidir.**

Giriş: Çalışmanın amacı ve geçmişte yapılan çalışmalar bu kısımda belirtilmelidir. Makalede SI (Systeme International) birimleri ve kısaltmaları kullanılmalıdır. Diğer kısaltmalar kullanıldığında, metinde ilk geçtiği yerde 1 kez açıklanmalıdır.

Materyal ve Metod: Eğer alışma deneysel ise kullanılan deneysel yöntemler detaylı ve açıklayıcı bir biçimde verilmelidir. Makalede kullanılan metod/metodlar, başkaları tarafından tekrarlanabilecek şekilde açıklayıcı olmalıdır.

Sonuçlar: Bu bölümde elde edilen sonuçlar verilmeli, yorum yapılmamalıdır. Sonuçlar gerekirse tablo, şekil ve grafiklerle de desteklenerek açıklanabilir.

Tartışma: Sonuçlar mutlaka tartışılmalı fakat gereksiz tekrarlardan kaçınılmalıdır. Bu kısımda, literatür bilgileri vermekten çok, çalışmanın sonuçlarına yoğunlaşılmalı, sonuçların daha önce yapılmış araştırmalarla benzerlik ve farklılıkları verilmeli, bunların muhtemel nedenleri tartışılmalıdır. Bu bölümde, elde edilen sonuçların bilime katkısı ve önemine de mümkün olduğu kadar yer verilmelidir.

Teşekkür: Mümkün olduğunca kısa olmalıdır. Teşekkür, genellikle çalışmaya maddi destek sağlayan kurumlara veya kişilere veya makale yayına gönderilmeden önce inceleyip önerilerde bulunan uzmanlara yapılır. Teşekkür bölümü kaynaklardan önce ve ayrı bir başlık altında yapılır.

Kaynaklar: Yayınlanmamış bilgiler kaynak olarak verilmemelidir. (*Yayınlanmamış kaynaklara örnekler: Hazırlanmakta olan veya yayına gönderilen makaleler, yayınlanmamış bilgiler veya gözlemler, kişilerle görüşülerek elde edilen bilgiler, raporlar, ders notları, seminerler gibi*). Ancak, tamamlanmış ve jüriden geçmiş tezler ve DOI numarası olan makaleler kaynak olarak verilebilir. Kaynaklar, makale sonunda alfabetik sırada (yazarların soyadlarına göre) sıra numarası ile belirtilerek verilmelidir.

Makale ve kitapların referans olarak verilmiş şekilleri aşağıdaki gibidir:

Makale: Yazarın soyadı, adının baş harfi, makalenin başlığı, derginin adı, cilt numarası, sayfa numarası, basıldığı yıl. Dergi adı italik yazılır

Örnek:

FEUGARD DC., ABNER R., WAYLAND D. Modelling daylight illuminance. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 23: 93-109, 1994.

MEHTA PK. Studies on Blended Cements Containing Santorin Earth. *Cement and Concrete Research*. 11: 507–518, 1981.

Kitap: Yazarın soyadı, adının baş harfi, kitabın adı (varsa derleyen veya çeviren ya da editör), cilt numarası, baskı numarası, sayfa numarası, basımevi, basıldığı şehir, basıldığı yıl.

Örnek:

DUFFIE JA., BECKMAN WA. Solar Engineering of Thermal Processes, Second Ed. Wiley Interscience, New York, 54-59, 1991.

Kitapta Bölüm: Yazarın soyadı, adının baş harfi, makale adı, sayfa numaraları, basıldığı yıl. Parantez içinde: Kitabın editör(ler)i, kitabın adı, Sayfa sayısı, yayınlayan şirket veya kurum, yayınlandığı yer.

Örnek:

BROWN B, AARON M. The politics of nature. New York, 230-257, 2001. [Editörler: SMİTH J. The rise of modern genomics. 3rd edn. Wiley].

Kongre, Sempozyum: Yazar (lar)ın soyadı, adının başharfi, makale başlığı, kongre adı, kitapçık adı, varsa cilt numarası, sayfa numarası, yıl ve kongrenin yapıldığı yer.

Örnek:

CAPPLEMAN O. Communication in the Studio. *FIDE' 98 International Conference on First Year Architectural Design Education Proceedings*, Faculty of Architecture Istanbul Technical University, Cilt V. S. 48-54, 1998, Istanbul.

İnternet: Eğer bir bilgi herhangi bir internet sayfasından alınmış ise (*internetden alınan ve dergilerde yayınlanan makaleler hariç*), kaynaklar bölümüne internet sitesinin ismi tam olarak yazılmalı, siteye erişim tarihi verilmelidir.

Kaynaklara metin içinde numara verilmemeli ve aşağıdaki örneklerde olduğu gibi belirtilmelidir. Örnekler:

... x maddesi atmosferde kirliliğe neden olmaktadır (Landen, 2002). İki yazarlı bir çalışma kaynak olarak verilecekse, (Landen ve Bruce, 2002) veya Landen ve Bruce (2002)'ye göre. ... şeklinde olmuştur; diye verilmelidir. Üç veya daha fazla yazar sözkonusu ise, (Landen ve Ark., 2002) veya Landen ve Ark. (2002)'ye göre olduğu gösterilmiştir; diye yazılmalıdır.

Kaynak gösterilecek yayında kaç isim varsa, kaynaklar bölümünde tümü belirtilmeli, Landen ve Ark., 2002, gibi kısaltma yapılmamalıdır.

Dipnotlar: Mümkünse dipnotlardan kaçınılmalı, bu tip notlar kaynaklar kısmında verilmelidir.

Grafik ve Tablolar: Tablo dışında kalan fotoğraf, resim, çizim ve grafik gibi göstermeler “Şekil“ olarak verilmelidir. Resim, şekil ve grafikler net ve ofset baskı tekniğine uygun olmalıdır. Her tablo ve şeklin metin içindeki yeri belirtilmelidir. Tüm tablo ve şekiller makale boyunca sırayla numaralandırılmalı (Tablo 1., Şekil. 1), başlık ve açıklamalar içermelidir. Grafik ve şekiller basılı sayfa boyutları dikkate alınarak çizilmelidir. Şekillerin sıra numaraları ve başlıkları, alta, tabloların ki ise üstlerine yazılır.

Ekler: Tüm ekler ayrı sayfaya yazılmalı ve Romen rakamları ile numaralandırılmalıdır.

Sunulan makaleler, öncelikle Dergi Yayın Kurulu tarafından ön incelemeye tabii tutulur. **Dergi Yayın Kurulu, yayınlanabilecek nitelikte bulmadığı veya yazım kurallarına uygun hazırlanmayan makaleleri hakemlere göndermeden red kararı verme hakkına sahiptir.** Değerlendirmeye alınabilecek olan makaleler, incelenmek üzere iki ayrı hakeme gönderilir. Dergi Yayın Kurulu, hakem raporlarını dikkate alarak makalelerin yayınlanmak üzere kabul edilip edilmemesine karar verir. Makaleler, aşağıda verilen adrese gönderilmelidir. Daha fazla bilgi için <<http://fbe.trakya.edu.tr>> sitesine girilebilir veya Editör – Yardımcı Editör ile iletişime geçilebilir:

Editör : Yrd.Doç.Dr. Altan MESUT

Yardımcı Editör : Yrd.Doç.Dr. Deniz AĞIRSEVEN

Trakya Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Balkan Yerleşkesi
22030 - EDİRNE

Tel : 0284 235 82 30

Fax : 0284 235 82 37

e-mail : tujes@trakya.edu.tr