

LED'LERİN İKİ DİRENÇ MODELİ İLE ISIL SİMÜLASYONU VE ÖLÇÜM İLE DOĞRULANMASI

M. Berker YURTSEVEN

Sermin ONAYGİL

Güven ÖĞÜŞ

byurtseven@itu.edu.tr

onaygil@itu.edu.tr

ogusguven@hotmail.com

İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, Ayazağa Yerleşkesi, 34469, Maslak, İstanbul,
Tel: 0 212 285 38 79 Faks: 0 212 285 38 84

ÖZET:

LED'lerin ışık çıktıları ve renk özellikleri jonksiyon (eklem) sıcaklıklarındaki artıştan etkilendiği için, bu durum armatür üretiminde dikkatle incelenmesi gereken bir sorun olarak gösterilmektedir. LED ışık kaynağı kullanan sistemlerin performansı, jonksiyon (eklem) sıcaklıklarının artmasıyla düşmektedir. Gerçeğe uygun armatür tasarımları için, kullanılacak LED çipinin performansını doğrudan etkileyen LED jonksiyon (eklem) sıcaklığı tahminin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada JEDEC'in geliştirdiği iki-direnç kompakt ısıl modeli ve ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı kullanılarak seçilen örnek bir downlight LED armatürdeki sıcaklık dağılımı bulunmuş ve kullanılan LED'lerin jonksiyon (eklem) sıcaklıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarına karşılık düşen LED çip ışık akısı katalog değerleri kullanılarak armatürün ışık akısı hesaplanmış, daha sonra bu değer Ulbricht küresi ölçümleri ile doğrulanmıştır. Bilgisayar simülasyonu kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların, deneme-yanılma yöntemi ile yapılan tasarımlara göre daha hızlı ve pratik çözümler olduğu ve prototip aşamalarını kısıltabildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LED, Isıl Simülasyon, İki Direnç Kompakt Isıl Modeli, LED Armatür Isıl Tasarımı

1. GİRİŞ

LED'ler esnek kullanım olanakları ve olası enerji tasarrufları öne çıkarılarak hem iç hem de dış aydınlatma armatürlerinde kullanılmaya başlanan yeni teknoloji ışık kaynaklarıdır. Küçük boyutları ve yoğun ışıkları nedeni ile özellikle kamaşma problemlerinin çözülmesi gereken LED'li armatürlerin tasarımında da, konvansiyonel armatürlerde olduğu gibi detaylı optik tasarımların yapılması gerekmektedir. Yüksek güçlü LED çiplerinde sıcaklık çok önemli bir etken olduğu için, optik tasarımın yanı sıra ısıl tasarım da önem kazanmaktadır. Isıl tasarımda LED çipleri ile birlikte, çiplerin dizildiği baskı devre kartı, ısıl arabirim malzemeleri, armatür malzemeleri, ortam koşulları gibi parametreler de göz önüne alınmalıdır. LED'lerin ışık akılarının, ömürlerinin ve renksel özelliklerinin yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilendiği bilinmektedir.

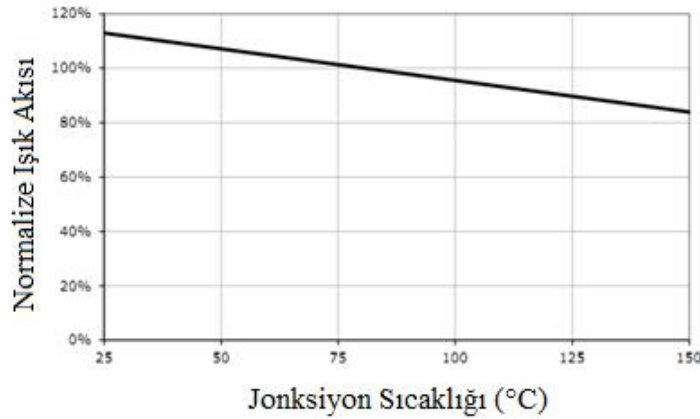
Optimum çalışma sıcaklıkları aşıldığında LED'lerin bozulma oranları artmakta, renk özellikleri değişmekte, ışık akıları ve ömürleri azalmaktadır. Sonuç olarak LED'lerin kataloglarında verilen değerlere ulaşamamakta ve LED çip bazında verilen etkinlik faktörleri armatür formunda önemli ölçüde düşmektedir. LED'lerde üretilen ısının transferi konvansiyonel ışık kaynaklarından farklı bir biçimde olmaktadır. Konvansiyonel ışık kaynakları üretilen ısıyı genel olarak taşınım ve ışıyım yolu ile uzaklaştırırken, LED'lerde ana mekanizma iletimdir. İletim bazlı ısı transferinin göz önüne alınmadığı armatür tasarımları ile verimsiz armatürler üretilebilmektedir. Isının LED jonksiyonundan (ekleminden) ortamdaki akışkana aktarılabilmesi için ısıl bir yol çizilmesi gerekmektedir. Tablo 1'de bazı örnek ışık kaynakları için ısı transfer mekanizmalarının yüzdesel dağılımı gösterilmiştir [1].

Tablo 1. Örnek Işık Kaynaklarının Isı Transfer Mekanizmalarının Yüzdesele Dağılımı

Işık Kaynağı	Işınım (%)	Taşınım (%)	İletim (%)
Enkandesen	>90	<5	<5
Flüoresan	40	40	20
Deşarj Lambası	>90	<5	<5
LED	<5	<5	>90

Yüksek üretim hacimleri sebebiyle, ışık akısı testleri çok kısa periyotlarda gerçekleştiği için, üreticiler LED çiplerinin ışık akılarını genelde çipler ısıl dengeye ulaşmadan ölçmektedir. Bu nedenle LED üreticilerinin kataloglarında verilen ışık akısı değerleri genel olarak üretim hollerinin sıcaklığı kabul edilen 25°C'de verilmektedir (testlerde LED'lerin ısınmaları için yeterli süre beklenmediği için, jonksiyon sıcaklıkları ortam sıcaklığına eşit kabul edilir). Söz konusu LED çipler armatür içinde kullanıldıklarında ise jonksiyon sıcaklıkları 25°C'den yüksek olmaktadır. Diğer bir deyişle, yüksek sıcaklıklar nedeni ile ışık akıları, ortam sıcaklığındaki değerinden daha düşüktür. Bu durum literatürde mevcut birçok çalışmada kanıtlanmıştır [2-5]. Şekil 1'de örnek bir LED'in jonksiyon

(eklem) sıcaklığına bağlı olarak ışık akısındaki azalma gösterilmiştir [6]. Bu gerçek nedeniyle, sadece katalog verileri baz alınarak yapılan tasarımlara göre üretilen armatürlerin ışık akıları hedeflenenden düşük çıkmaktadır. Tüm bu olumsuzlukların önlenmesi için, LED armatürün ısıl tasarımının olası jonksiyon (eklem) sıcaklıkları doğru tahmin edilerek detaylı bir şekilde yapılması ve LED çip üreticilerinin de farklı sıcaklıklarda LED ışık akısı değişim değerlerini kataloglarında vermesi gerekmektedir.



Şekil 1. Jonksiyon Sıcaklığının Işık Akısına Etkisi

2. KOMPAKT ISIL MODELLER

Teknolojinin gelişmesi, elektronik elemanların ısıl analizlerinin yapılmasını kolaylaştırmıştır. Sadece elektronik elemanların değil, bu elemanları içeren sistemlerin bütünsel olarak analizi de olası hale gelmiştir. Isıl analizlerdeki yüksek hesaplama sürelerini kısaltmak için, elektronik elemanların basitleştirilmiş

modelleri kullanılmaktadır. Katı Hal Teknolojileri Komitesi (Solid State Technology Associations – JEDEC) elektronik elemanların kolay modellenebilmesi için kompakt ısıl modeller geliştirmiştir [7]. Bu modellerde aşağıdaki varsayımlar kullanılmaktadır:

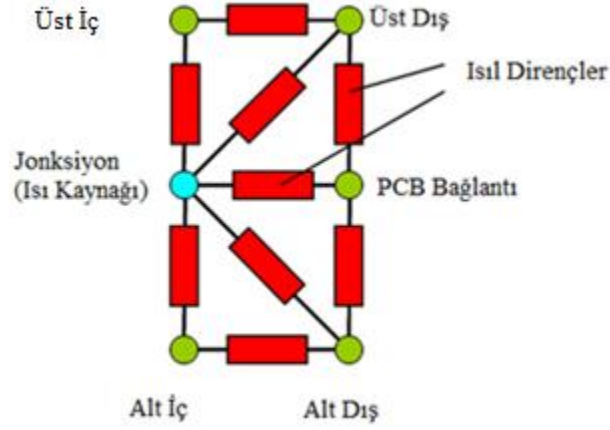
- Elektronik elemanın ısı yayan jonksiyon (eklem) bölgesi tek nokta ile temsil edilir.

- Elektronik eleman bir baskı devre karta monte edilmiştir.
- Isı akışı yönü üst yüzeyden çevreye, yan yüzeylerden çevreye ve alt yüzeyden baskı devre kartına olarak tanımlanır.
- Isı akış yollarını ve dirençleri tanımlamak için ısıl direnç ağları kullanılır.
- Dış yüzeyler tekil bir nokta ile temsil edilir.

JEDEC tarafından standardize edilmiş iki kompakt ısıl model vardır.

- DELPHI (DEvelopment of Libraries of PHysical models for an Integrated design)
- İki-direnç (2D)

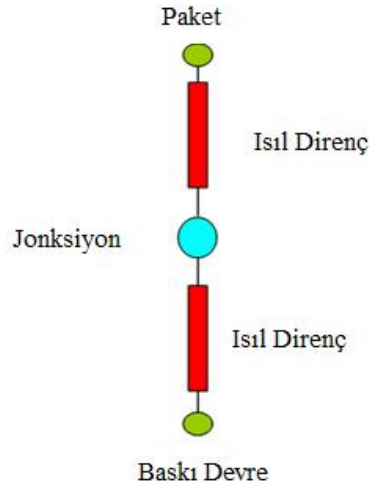
DELPHI kompakt ısıl modeli, sınırlı sayıda noktadan oluşan ve ısıl dirençlerle birbirine bağlı bir modeldir (Şekil 2).



Şekil 2. JEDEC DELPHI Kompakt Isıl Modeli

Sadece üst ve alt ısıl yollardan oluşan İki Direnç (2D) kompakt ısıl modeli ise, ısı akış yollarını daha basit bir biçimde

göstermektedir. Her yol için tek bir ısıl direnç yeterli görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. JEDEC İki Direnç Kompakt Isıl Modeli

İki direnç (2D) modeli için jonksiyon (eklem), ısının üretildiği yer olarak kabul edilmiştir. Paket noktası genel olarak dış ortama açık olan yüzey, baskı devre

noktası ise elektronik elemanın karta bağlandığı yerdir. İki direnç modelinde ısının gidebileceği iki yol vardır. LED'lerin yapısı iki direnç modeli ile

modellenmeye uygundur. Bir LED ışık kaynağı ısının üretildiği jonksiyon noktası, dış ortama açılan paket yapısı ve baskı devre kartına bağlantı noktaları ile karakterize edilebilmektedir. 2D modelinde, elektronik elemanın yan yüzeylerinden oluşabilecek kayıplar ihmal edilmektedir. LED'lerin de yan yüzey alanları çok küçük olduğu için, bu kabul çok büyük hatalara neden olmamaktadır. Şekil 2 ve 3'ten görüldüğü gibi 2D modeli, DELPHI modeline göre daha basittir. Basit yapısı nedeniyle, piyasada yaygın kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımlarına adaptasyonu da daha kolaydır.

Bir sonraki bölümde, 2D modelinin HAD yazılımında kullanımı ve LED simülasyonları açıklanacaktır.

3. İKİ DİRENÇ (2D) MODELİ İLE LED SİMÜLASYONU

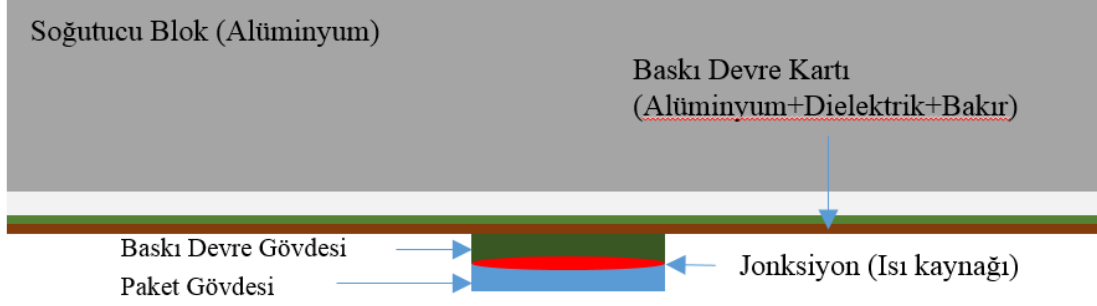
Çalışma için IP 20 sınıfında, 90 mm çapında, 6 adet LED ışık kaynağı içeren, lensli bir downlight aydınlatma armatürü seçilmiştir (Şekil 4). Armatürde CREE firmasının XP-E LED çipleri kullanılmıştır. Konica-Minolta CL200A marka renk ölçer ile ölçülen LED'lerin renk sıcaklıkları (CCT) 4200 Kelvin olarak belirlenmiştir. Armatürde alüminyum içerikli baskı devre kartı kullanılmıştır.



Şekil 4. Çalışmada Kullanılan Downlight LED'li Armatür

Seçilen downlight armatür bilgisayar ortamında birebir modellenmiş ve HAD programı kullanılarak armatür üzerindeki sıcaklık dağılımı çözülmüştür. LED üreticileri, LED'lerin ısıl gücünün, elektriksel gücün %75-85'i arasında bir değer olarak alınmasını önermektedir [6]. Bu öneriler doğrultusunda çalışmada gerçekleştirilen simülasyonda tek bir LED çip üzerindeki ısıl güç, elektriksel gücünün % 85'i olarak kabul edilmiştir. Kullanılan 2D modelinde LED ışık kaynakları,

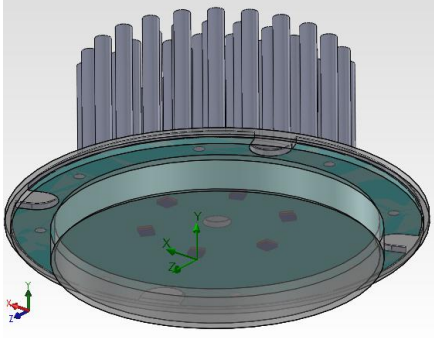
ortalarında ısı kaynağı bulunan iki adet katı gövde ile modellenmiştir. Gövdelerden biri armatürün baskı devre kartına bağlı bölümünü, diğeri ise ortamdaki akışkana açık paket bölümünü temsil etmektedir. Bu iki gövdenin ısıl dirençleri kullanılan LED çiplerin katalog bilgilerinden alınmıştır (Şekil 5). HAD yazılımında, sıcaklık değişimlerinin yüksek olacağı düşünülen yerlerde çözücü ağ yapısı daha sık oluşturulmuştur.



Şekil 5. Downlight Isıl Model Yapısı

Oluşturulan model ile ilgili karakteristik değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Model Karakteristik Değerleri

3 Boyutlu Model	LED Sayısı	LED Başına Isıl Güç [W]	LED Isıl Direnci [°C/W]	Armatür Toplam Isıl Gücü [W]	Ortam Sıcaklığı (°C)
	6	1.6	5	9.6	25

Modelde kullanılan malzemeler ile ilgili özellikler de Tablo 3’de verilmektedir.

Tablo 3. 3 Boyutlu Modelde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Malzeme	Kullanıldığı Yer	Kalınlık (mm)	Isıl İletkenlik (W/mK)
Dielektrik + Bakır	Baskı Devre Kartı	0.03 mm	1
Alüminyum	Baskı Devre Kartı ve Soğutucu Blok	1.2 mm/Çeşitli	155 W/mK
PMMA	Lens	1 mm	0.2 W/mK

Simülasyon sonuçlarının, armatürün laboratuvarında yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması amacıyla, armatürün soğutucu bloğu üzerindeki belirli noktaların sıcaklık değerleri program yardımıyla hesaplanmış, simetrik yapıdaki armatürde bu noktaların sıcaklıkları 55.4 °C olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak 2D modeli kullanılarak yapılan simülasyonlar ile LEDlerin jonksiyon (eklem) sıcaklıkları 68.6 °C olarak bulunmuştur.

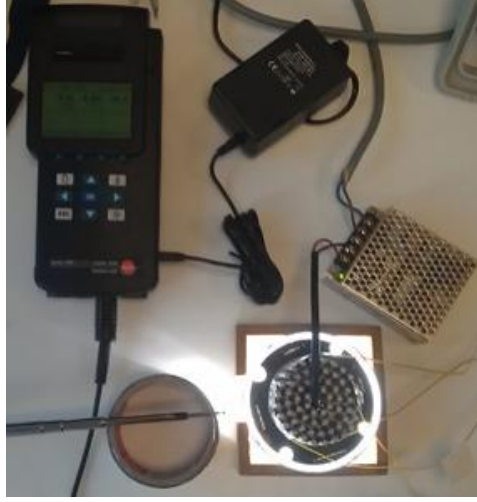
4. ÖLÇÜM İLE DOĞRULAMA

Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için noktasal sıcaklık ve Ulbricht küresinde ışık akısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4.1 Noktasal Sıcaklık Ölçümleri

Simülasyon sonuçlarının laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırılması amacıyla, K-tipi ısı çiftleri ve Luthron TM-946 ölçüm cihazı kullanılarak armatürün soğutucu

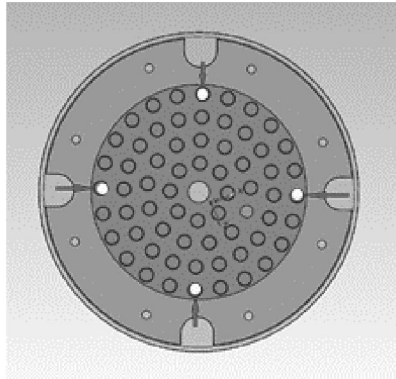
bloğunda noktasal sıcaklık değerleri ölçülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6. Downlight Noktasal Sıcaklık Ölçümleri

Deneyler sırasında, armatürün güç gereksinimi GW-Instek APS 9102 saf sinüs kaynağı kullanılarak sabit ve kesintisiz olarak sağlanmıştır. Armatür 220V (50 Hz) gerilim altında, kendi sürücüsü kullanılarak çalıştırılmış ve güç tüketimi 14.7 W olarak ölçülmüştür. Ortam sıcaklığı $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de tutulmuş ve Testo

454 marka sıcaklık ölçüm cihazı ile kontrol edilmiştir. Ölçümlerden önce armatürün sıcaklık ve güç değerlerinin sabitlenmesi beklenmiştir. Armatür üzerindeki 4 noktadan ölçüm alınarak simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Armatür Üzerindeki Ölçüm Noktaları

Tablo 4. Ölçüm ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ölçüm Noktası	1	2	3	4
Ölçüm ($^{\circ}\text{C}$)	52.5	54.5	52.9	55.1
Simülasyon ($^{\circ}\text{C}$)	55.4	55.4	55.4	55.4
$^{\circ}\text{C}$ Farkı	2.9	0.9	2.5	0.3
% Sapma	%5	%2	%5	%1

Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının toplu olarak verildiği Tablo 4'den, sonuçlar arasında ortalama %3.2'lik fark olduğu görülmektedir. Downlight armatürün simetrik yapısından dolayı, her dört

noktada simülasyon sıcaklık değerleri eşit çıkmıştır.

4.2 Küre ile Işık Akısı Ölçümleri

Downlight armatür için program tarafından hesaplanan jonksiyon (eklem) sıcaklığı 68.6 °C olarak bulunmuştur. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için, bir diğer işlem olarak armatürün ışık akısı ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm için iç yüzeyi ışığı ideal dağıtan ve yansıtma faktörü yaklaşık 1.0 olan 2 m çapındaki LABSPHERE marka Ulbricht Küresi kullanılmıştır.

Program tarafından hesaplanmış jonksiyon (eklem) noktası sıcaklığı (68.6 °C) ve üretici kataloğu kullanılarak downlight armatür ışık akısı 679.8 lümen olarak hesaplanmıştır. Ulbricht küresinde gerçekleştirilen ölçüm sonucunda ise aynı armatürün ışık akısı 693.4 lümen olarak bulunmuştur. Program tarafından verilmiş jonksiyon (eklem) sıcaklıkları ve katalog değerleri kullanılarak elde edilen ışık akısı ile küre ölçüm değerleri arasındaki fark %2 olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada LED ışık kaynaklı bir downlight armatür 2D modelini destekleyen bir HAD programı ile modellenmiş, ısıl simülasyonu yapılmış ve sonuçlar laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4'ten görüldüğü gibi noktasal sıcaklıkların simülasyon ve ölçüm sonuçları farkı ortalama %3.2 olarak bulunmuştur.

Daha ileri bir çalışma için armatürün ışık akısı Ulbricht küresi ile ölçülmüş, HAD programından elde edilen jonksiyon sıcaklıkları yardımı ile kataloglardan hesaplanan ışık akısı değerleri küre ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Aralarındaki fark %2 olarak bulunmuştur.

Model ve laboratuvar ölçümleri arasındaki farkın nedeni, iki direnç modelinin basitleştirilmiş yapısı, programa tanımlanan malzeme özelliklerinin gerçeğe uygun olarak belirlenememesi, HAD

programının nümerik hataları olarak sıralanabilir.

LED jonksiyon (eklem) sıcaklıklarının ölçümü zor ve maliyetlidir. Verimli LED armatürlerin tasarımı için de jonksiyon sıcaklıklarının önceden belirlenmesi gerekmektedir. Yüksek jonksiyon sıcaklıklarının armatür veriminin, ışık çıktısının azalmasına, renk özelliklerinin bozulmasına ve LED ömürlerinin düşmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, LED armatür tasarlarken LED'lerde üretilen ısıyı verimli bir şekilde ortama atabilecek "ısı yollar" tasarlanması ve LED'lerin jonksiyon (eklem) sıcaklıklarının doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın sonuçları JEDEC'in 2D modeli ve uygun bir HAD programı kullanılarak kabul edilebilir sonuçlara ulaşılabilceğini göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Petroski J., "Thermal Challenges in LED Cooling", <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>, (Temmuz 2013'de erişildi)
- [2] Ishizaki S., Kimura H., Sugimoto M., "Lifetime Estimation of High Power White LEDs", Journal of Light and Visual Environment Vol. 31, No. 1, (2007).
- [3] Kıyak İ., Oral B., Topuz V., "Effects of Lighting Performance on Cooling Power LED", Lux Europe, 2009.
- [4] Huang B., Tang C., Thermal-electrical-luminous model of multi-chip polychromatic LED luminaire, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 3366–3373.
- [5] Song B., Han. B, Lee J. Optimum design domain of LED-based solid state lighting considering cost, energy consumption and reliability, Microelectronics Reliability 53 (2013) 435–442
- [6] CREE, Xlamp Thermal Management, <http://www.cree.com>, (Temmuz 2013'de erişildi)
- [7] JEDEC, <http://www.jedec.org>, (Temmuz 2013'de erişildi)