



MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN  
OPTİMUM DİZAYN VE ÇALIŞMA KOŞULLARININ ARAŞTIRILMASI

(*INVESTIGATION OF OPTIMUM DESIGN AND OPERATION  
CONDITIONS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH MPPT*)

Z. Abidin FIRATOĞLU\*, Bülent YEŞİLATA\*

ÖZET/ ABSTRACT

Bu çalışmada, maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) PV kombinasyonlarının sabit güç temini için kullanımına yönelik optimum çalışma şartları araştırılmaktadır. Çalışmanın temel amacı; gereksinim duyulan gücü minimum sayıda PV panel kullanarak temin etmektir. Çalışma üç temel aşamadan oluşmakta olup, sunulan analizler aylık ortalama değerler bazında ve sabit enlem açısı şartlarında yapılmıştır. İlk iki aşamada sırasıyla maksimum toplam radyasyon açısı faktörünü ve maksimum kullanılabilirliği sağlayan dizayn koşulları tespit edilmiştir. Daha sonra bu dizayn koşullarında MPPT yardımıyla PV panellerden elde edilebilecek maksimum volt ve akım değerleri tespit edilmiştir. Çalışmada sunulan yöntem ve diyagramlar yardımıyla optimum panel konfigürasyonunun kolaylıkla belirlenmesi mümkündür.

*In this study, optimum design conditions are investigated for a photovoltaic (PV) configuration that uses a maximum power point tracker (MPPT). The configuration is used for providing constant power at the optimum output values of voltage and current. The main objective here is to minimize the number of PV modules to be used for the specified power output. Theoretical analysis consisting of three basic phases is made for constant latitude angle by using monthly average values of meteorological data. In first two phases, respectively, design conditions to maintain maximum values of radiation and utilizability are determined. The optimum values of voltage and current for these design conditions of the PV array with MPPT are then evaluated. The method and constructed diagrams given here makes the selection of optimal PV array configuration relatively easier.*

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Fotovoltaik, Maksimum Güç Noktası İzleyicisi, Kullanabilirlik  
*Photovoltaic, Maximum Power Point Tracker (MPPT), Utilizability*

## 1. GİRİŞ

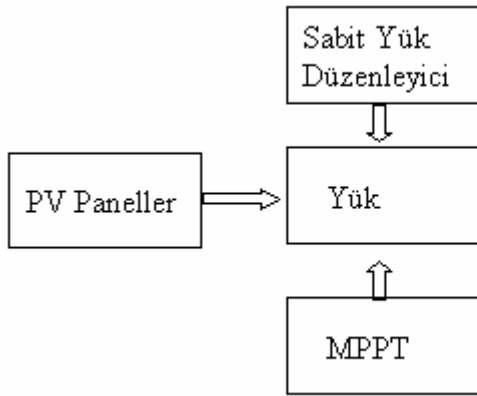
Fotovoltaik (PhotoVoltaic, PV); yarı-iletken malzemelerden oluşmuş hücrelerle güneş ışınımının direkt olarak elektrik enerjisine (DC) çevirebilen teknolojiye verilen isimdir. Fotovoltaik olay 1839 yılından beri bilinmesine rağmen, ilk modern fotovoltaik hücrenin yapımı ancak 1954'te Amerika Birleşik Devletleri Bell Laboratuvarı'nda gerçekleştirilebilmiştir. Bu ilk fotovoltaik hücreler, maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle, sadece uzay araçlarının ihtiyacı olan enerjiyi karşılamak amacıyla kullanılabilmiş, ancak 1970'li yılların başında ortaya çıkan enerji krizi sebebiyle, global enerji ihtiyacına yönelik olarak ta kullanılmaya başlanmıştır (Muntasser vd., 2000). Son çeyrek asırda PV sistemlerin verim ve maliyetlerinde sağlanan ciddi seviyedeki iyileşmeler, bu sistemlerin elektrik üretimindeki kullanım sahasının ve toplam enerji üretimindeki payının hızla genişlemesine sebep olmuştur (Yeşilata & Aktacir, 2001). Kullanımdaki bu artışın gelecek yıllarda daha hızlı bir seyir izleyeceği, 1995 yılında dünyada 375.2 MWp olan kurulu PV sistem gücünün, 2010 yılında 6300 MWp olarak planlanmasından çok açık bir şekilde görülmektedir (Muntasser vd., 2000).

Pratik uygulamalarda kullanılan PV sistemleri; sistemde kullanılan bileşenlerin ve kontrol sisteminin konumuna bağlı olarak üç farklı kombinasyonda incelemek mümkündür; sistem yükünün hiçbir ara düzenleyicisi olmadan direkt PV panellere bağlandığı direkt akupleli kombinasyonlar, sistem yükü ile PV paneller arasında bataryaların yerleştirildiği bataryalı kombinasyonlar ve maksimum çalışma noktası izleyicili (maximum power tracking, MPPT) kombinasyonlar. Direkt akupleli PV sistemlerde, panellerden ışınım şiddetiyle değişen değerlerde çıkan gerilim ve akım, sisteme direkt olarak verilir ve sistemin çalışması ancak ihtiyaç duyduğu gücü (sistem yükü) sağlayan gerilim ve akım değerlerinin temini ile mümkün olur (Kou vd., 1998, Fıratoğlu ve Yeşilata 2001). Bataryalı sistemlerde, panel ile yük arasındaki batarya sistemi güneş ışınım şiddetindeki değişimleri direkt olarak sisteme yansıtmadan sabite yakın bir gerilim ile sistemi çalıştırır (Al-Sahaban ve Mohmoud, 2000), ancak sisteme ulaştırılan gerilim ve akım değerleri maksimum güce karşılık gelen akım ve gerilim değerlerinin altında seyrederek. Söz konusu bu iki kombinasyona alternatif olarak ortaya çıkan maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) sistemlerin, PV panelin her zaman maksimum güç üretecek noktada çalışmasını temin etmesinden dolayı çalışma performansları daha yüksektir (Zaki ve Eskandar, 1996). Sistemde; Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği üzere, PV panelin ürettiği maksimum güce karşılık gelen gerilim, bir düzenleyici yardımıyla, sistemin ihtiyaç duyduğu gerilime dönüştürülür. Maksimum sistem verimliliği için önemli koşullardan biri, panel maksimum güç koşullarını sağlayan akım ve gerilim değerlerinin yük I-V karakteristik eğrisi ile çakışması gerekmektedir. Bu nedenle MPPT içeren PV sistemlerin dizayn aşamasında en önemli unsurlardan biri uygulamadaki yük profilinin bilinmesidir.

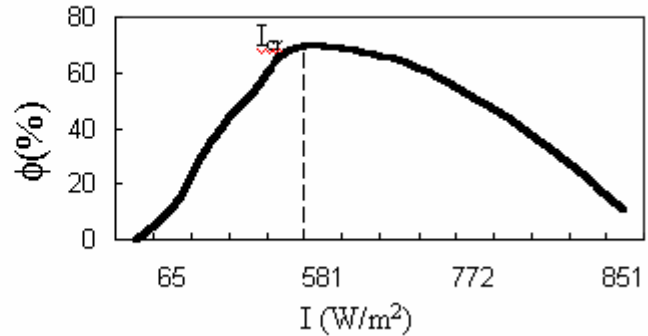
Bu çalışmada, MPPT içeren PV kombinasyonlarının sabit güç (yük) temini (profili) için kullanımına yönelik optimizasyon analizi yapılmıştır. PV sistemlerin sabit yük uygulamalarında kullanımı oldukça yaygın olup, dizayn yapılırken güneş ışınımının lineer olmayan bir şekilde değişmesinden dolayı, panel sayısı seçiminde önemli zorluklar söz konusudur (Agha ve Sbita 2000, Kou vd., 1998). PV uygulamalarında panel birim alanına düşen yükteki azalış, başka bir deyişle panel sayısındaki artış ile ışınım şiddetinin kullanılabilirliği arasında Şekil 2'de gösterildiği gibi bir ilişki mevcuttur. Şekil 2'de görüleceği gibi panel birim alanına gelen ışınım şiddetindeki artışa karşı kullanılabilirlikte belli bir yere kadar artış ve daha sonra azalış gösterdiği bir kritik nokta mevcuttur. Panel maliyetinin sistem içindeki payının yüzde atmış olduğu düşünülürse (Bloos, 2000), ekonomik açıdan bu kritik noktanın saptanması ekonomik açıdan oldukça önemli olacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı; sabit güç çıktısına gereksinim duyulan bir uygulamada bu gücü minimum sayıda PV panel ile karşılayacak bir sistem tasarımı yönelik, kullanıcılar tarafından kolayca kullanılabilir grafiksel bir metot geliştirmektir. Panelden ışınım seviyesine bağlı olarak değişken olarak elde edilen güç değerinin maksimum olması ( $P_{mp}$ ); yani sistemde MPPT kullanımı koşullardan sadece birisidir. Diğer ön koşullar ise; maksimum güneş ışınımını toplayan panel eğim açısının ( $\alpha_{opt}$ ) ve maksimum kullanılabilirliği temin eden kritik ışınım şiddetinin ( $I_{cr}$ ) tespitidir. Bu çalışma bu nedenle önerilen metot üç temel aşamadan oluşmakta olup, her aşamada kullanılan veriler ve elde edilen sonuçlar aylık ortalamayı temsil etmektedirler. Ayrıca; izlenen yöntem genel olmakla birlikte, sayısal hesaplamalar ve diyagramların oluşturulmasında sabit bir enlem açısı ( $I=37^\circ$ ) göz önüne alınmıştır. İlk aşamada  $\alpha_{opt}$  değerleri tespit edilmiş ve aynı enlem açısına sahip tüm bölgeler için bulanıklık indisi ( $B_i$ ) yardımıyla yılın her ayı için optimum toplam radyasyon aç faktörünün ( $R_{opt}$ ) bulunabileceği bir diyagram hazırlanmıştır. İkinci aşamada PV sistem dizaynı için seçilebilecek aylık  $I_{cr}$  değerleri tespit edilmiş ve panel yüzeyine ulaşan toplam günlük ışınım değerleri ( $I_{Te}$ ) yardımıyla aylık  $I_{cr}$  değerinin kolaylıkla bulunabileceği bir diyagram oluşturulmuştur. Son aşamada ise bu tespit edilen kritik ışınım seviyesi ve çevre sıcaklığı verilerini kullanarak panelin maksimum çalışma noktalarındaki akım ( $I_{mp}$ ) ve gerilimin ( $V_{mp}$ ) tespit edilebileceği diyagramlar sunulmuştur.

Çalışma da hazırlanan diyagramlar yardımıyla  $37^\circ$  enlemi boyunca ve seçilen AP- 50 PV panel için yörenin yılın herhangi bir anındaki bulanıklık indisi ve yataya günlük gelen toplam ışınım büyüklüklerinden yararlanarak PV sistemlerin MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulaması için gerekli minimum panel sayısı hesaplanabilir. Farklı enlemler ve paneller için benzer şekilde izlenecek metotla istenilen bölge için optimum koşullarda gerekli minimum panel sayısı ve kombinasyonu saptanabilir.



Şekil 1. PV sistemlerin MPPT uygulamalarının şematik gösterimi.



Şekil 2. MPPT sistemlerinin sabit yük uygulamalarında birim panel alanına gelen ışınım şiddeti ile kullanılabilirlik ( $\Phi$ ) arasındaki ilişki.

## 2. TEORİK ANALİZ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

### 2.1. Panel Optimum Toplam Radyasyon Aç Faktörünün Tespiti

Güneş ışınımının yeryüzüne geliş açısında yıl boyunca değişim görülmemesine rağmen, dünyanın deklinasyon açısındaki değişim güneş ışınımının yatayla yaptığı açıda değişime sebep olur. Yeryüzünün fiziksel yapısından dolayı, yıl boyunca güneş ışınımının, yatay

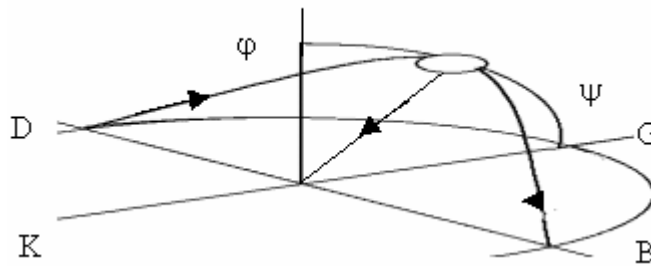
yüzeyle yaptığı açı, yalnızca deklinasyon açısına değil aynı zamanda yörenin enlemine bağlı olarak da değişmektedir. Dünya sabit kabul edilip güneşin dünya etrafında hareket ettiğini varsayılırsa gün boyunca güneşin hareketi Şekil 3'teki  $\varphi\psi$  düzlemin de  $\psi$  ve  $\varphi$  eksenleri üzerindedir. Güneşin  $\psi$  eksenindeki hareketi deklinasyon açısındaki değişmeden dolayı meydana gelip güneşin bu ekseninde gün boyunca yaptığı hareket ihmal edilebilecek düzeydedir. Güneşin  $\varphi$  eksenindeki hareketi ise Şekil 3'te görülen eksen boyunca olup güneşin  $\varphi$  ekseninde çizdiği yörüngenin büyüklüğü, kontrol yüzeyinin bulunduğu enlemin bağımlı birer değişkenidir.

Bir düzlem üzerine gelen güneş ışınımının maksimum olabilmesi için düzlemin iki ekseninde de güneşi takip etmesi gerekir. Pratik uygulamalarda güneşi takip eden düzlemlerin yapımı zor ve pahalı olduğundan basitliği sebebiyle belli bir zaman aralığı için sabit eğim açısı ve sıfır yüzey azimut açısında güneşe yönelmiş bir şekilde yerleştirilmeleri daha uygundur (Dinçer 1995). Optimum eğim açısı; Liu ve Jordon (Bknz: Duffie & Beckman 1991) tarafından eğimli yüzeylere gelen ışınım şiddetini hesaplayan aşağıdaki denklemden yararlanarak saptanabilir.

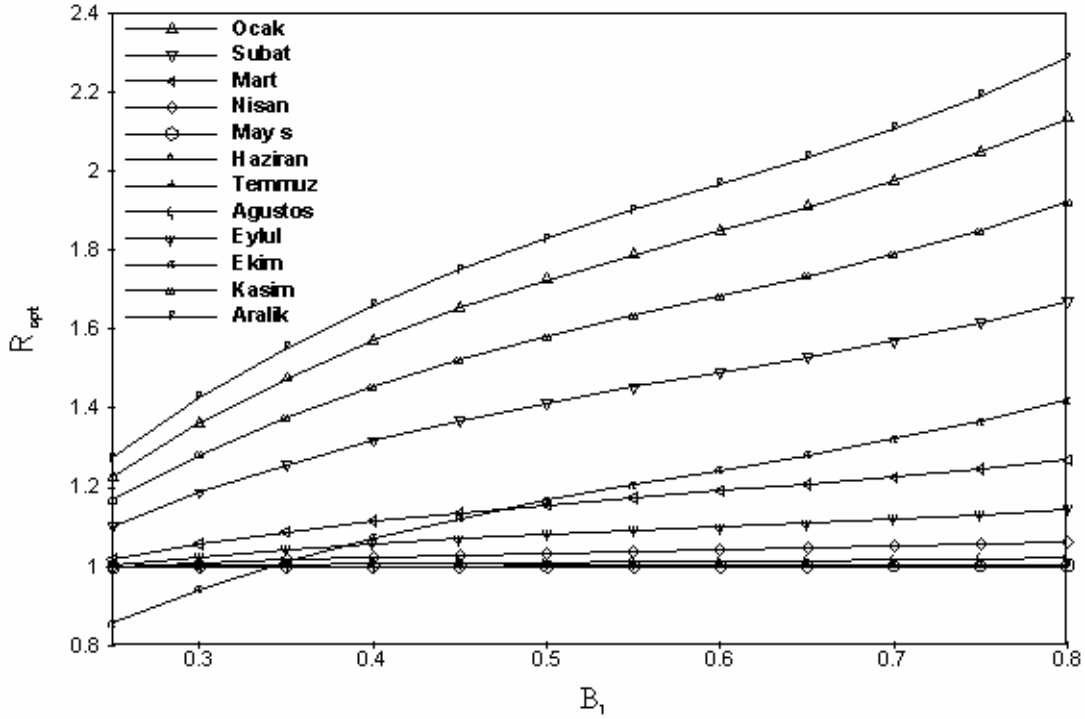
$$I_{Te}(a) = I_{Ty} R = \left( \left( 1 - \frac{I_{dy}}{I_{Ty}} \right) R_d + \frac{I_{yy}}{I_{Ty}} R_y \right) I_{Ty} \quad (1)$$

Denklemden  $I_{Teg}$  eğimli yüzeye gelen aylık ortalama ışınım miktarını ( $\text{kJ/m}^2\text{gün}$ ),  $I_{Ty}$  yatay yüzeye gelen toplam ışınımı ( $\text{kJ/m}^2\text{gün}$ ),  $I_{dy}$  yatay yüzeye gelen aylık ortalama direkt ışınım miktarını ( $\text{kJ/m}^2\text{gün}$ ),  $I_{yy}$  ise yatay yüzeye gelen aylık ortalama yayılı ışınım miktarını ( $\text{kJ/m}^2\text{gün}$ ),  $R$  toplam ışınım açı faktörünü,  $R_d$  direkt ışınım açı faktörünü ve  $R_y$  yayılı ışınım açı faktörünü göstermektedir.  $37^\circ$  enlemi boyunca yüzey azimut açısı sıfır, güneşe yönlendirilmiş ve aylık ortalama optimum eğim açısında yerleştirilmiş bir yüzeyin,  $R_d$  ve  $R_y$  değerlerinin hesabi ile ilgili detaylı bilgi Fıratoğlu ve Yeşilata (2001) tarafından verilmektedir. Fıratoğlu ve Yeşilata (2001) tarafından  $37^\circ$  enlemi için hesaplanan aylık ortalama optimum  $R_{opt}$ ,  $R_{dopt}$ ,  $R_{yopt}$  ve  $\alpha_{opt}$  değerleri Ek1'de verilmiştir.

Toplam-yayılı ve toplam-direkt ışınım arasındaki ilişki,  $B_i$  birer fonksiyonu olduğundan, Eşitlik 1  $I_{Ty}$  ve  $B_i$  olmak üzere iki yerel değişken içerir. Bu iki değişkenden yararlanılarak aylık optimum eğim açısı koşulunda yatay yüzeye gelen ışınım miktarının hesaplanabileceği Şekil 4'deki diyagram hazırlanmıştır. Bu diyagramdan  $37^\circ$  enlemi boyunca herhangi bir yörenin ilk önce  $B_i$  verisinden yararlanılarak optimum toplam açı faktörü ( $R_{opt}$ ) daha sonrada  $I_{Ty}$  verisinden yararlanarak da ortalama aylık optimum eğim açısı koşullarında yerleştirilmiş bir yüzey üzerine gelen ışınım miktarı hesaplanabilir.



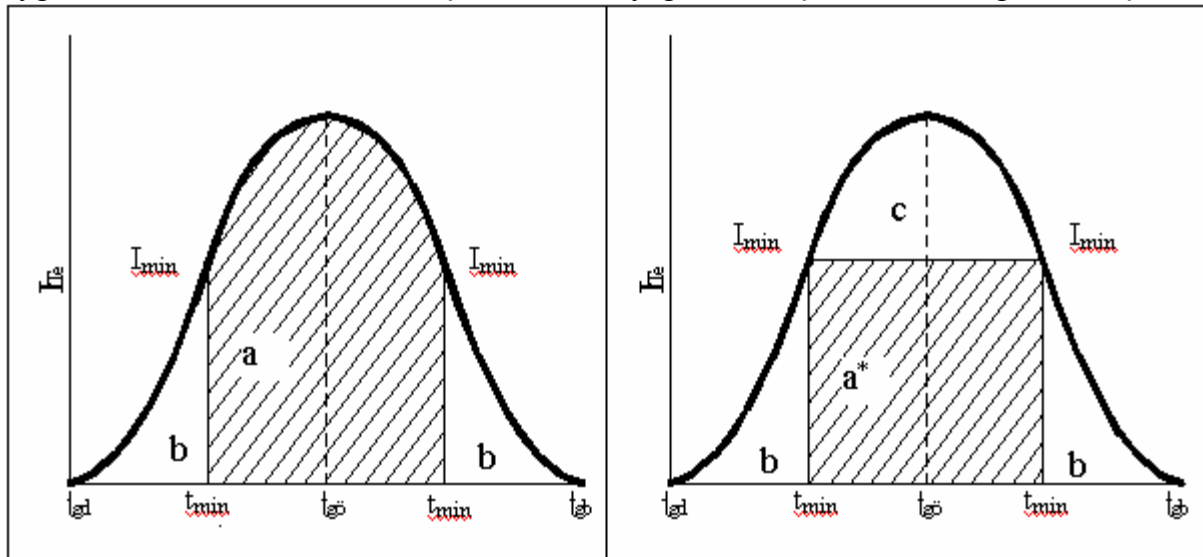
Şekil 3. Güneş ışınımının gün boyunca izlendiği yörünge



Şekil 4. Aylık optimum sabit panel eğim açısı koşulunda Bulanıklık indisine ( $B_i$ ) ile toplam radyasyon aç faktörü ( $R_{opt}$ ) arasındaki ilişki.

## 2.2. Maksimum Kullanılabilirlik Koşularının Tespiti

Işınım şiddetinde yıl ve gün boyunca bir değişim görülür. Bu değişim ivmesi, güneş enerjisi uygulamaları tasarım aşamasındayken ciddi zorlukların yaşanmasına neden olmaktadır. Sistemin kullanılabilirlik tespiti de bu zorluklardan biridir. Literatürde güneş enerjisi sistemler için bu amaçla geliştirilmiş *f-Chart* (Klein & Beckman 1979) yöntemi bulunmaktadır. *f-Chart* yöntemi sabit güç temininde kullanılacak PV sistemlerin kullanılabilirlik saptamasında yetersiz kalmaktadır (Agha & Sbitya 2000). Bu tür uygulamalarda anlık ışınım eğrisi altındaki faydalı işi gösteren alan tanımlaması, diğer uygulamalardan farklıdır. Bu fark Şekil 5'deki diyagramlarda şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. (a) Güneş uygulamalarında, (b) PV sistemlerin MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulamalarında, güneş ışınım şiddetinin gün boyunca ki değişimi.

Şekil 5 (a)'da gösterilen faydalı enerji bölgesinin ('a' bölgesi), önemli bir kısmı ('c' bölgesi), Şekil 5 (b)'de gösterilen PV sistemde  $I(t) > I_{cr}$  olmasına karşın kullanılamamaktadır. Bu bölge sabit güç uygulamalarına özgü bir özellik olup PV sistemlerin sabit yük uygulamasında, sistemin arzuladığı ışınım seviyesinin üzerindeki ışınım seviyelerinin düzenleyici tarafından sisteme (yüke) ulaştırılmayan kısmıdır.

Şekil 5'deki diyagramlardan yararlanılarak panel yüzeyine günlük ulaşan ışınım miktarı;

$$I_{Te} = 2 \int_{t_{gd}}^{t_{min}} I_{Tea}(t) dt + 2 \int_{t_{min}}^{t_{gö}} I_{Tea}(t) dt = 2b + a \quad (2)$$

şeklinde olur. Herhangi bir güneş uygulamasının gün boyunca kullanılabilirliği de Şekil 5 (a)'deki diyagramdan;

$$\Phi = \frac{2 \int_{t_{min}}^{t_{gö}} I(t) dt}{I_{Te}} = \frac{a}{2b + a} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanabilir. PV sistemlerin sabit yük uygulamaları için kullanılabilirlik ise Şekil 5 (b)'deki diyagramdan;

$$\Phi = \frac{2I(t)t}{I_{Te}} = \frac{a^*}{a^* + 2b + c} \quad (4)$$

şeklinde. Bu denklemlerde kullanılan  $t_{min}$  sistemin ihtiyaç duyduğu minimum ışınım seviyesine ulaşılan anı,  $I_{Tea}(t)$  ( $W/m^2$ ), anlık ışınımı  $I_{cr}(W/m^2)$ , sistemin ihtiyaç duyduğu minimum ışınım seviyesini,  $t_{gd}$  güneş doğuş anını,  $t_{gö}$  güneş öğlesini,  $t_{gb}$  ise güneş batış anını göstermektedir. Yapılan incelemelerde panel sayısındaki lineer bir artışın belli bir aralık için Şekil 5 (b)'deki eğrinin altındaki  $a^*$  bölgesinin yani faydalı işin lehine olduğu fakat kritik bir noktadan sonra tersine bir olayın gerçekleştiği görülmüştür. Bu kritik nokta MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulamaları için maksimum kullanılabilirlik noktası olup, bu nokta göz ardı edilerek yapılacak bir kombinasyon termoekonomik açıdan istenmeyen sonuçların doğmasına sebebiyet verebilir.

Şekil 6'da hazırlanan diyagram yardımıyla,  $37^\circ$  enlem boyunca, panel yüzeyine gelen günlük toplam ışınım verisinden yararlanılarak,  $I_{cr}$  değerleri saptanabilir. Bu diyagramın elde edilme süreci kısaca şu şekildedir: İlk etapta, Kılıç (Bknz: Kılıç 1983) tarafından önerilen anlık ışınım denklemi baz alınarak sistemin kullanılabilirliği uzayda bir eğri temsil eden zamana (t) bağımlı tek değişkenli aşağıdaki denklemle ifade edildi;

$$\Phi(t) = a \left[ \cos(bt) + 1.1287 \left( 1 - \exp \left( -4 \left( 1 - \frac{15t}{c} \right)^2 \right) \right) \right] t \quad (5)$$

Denklemdaki a, b ve c katsayıları bölgenin enlemine ve zamana bağlı katsayılarıdır. Kritik noktaları bulabilmek amacıyla, Denklem (5)'in ikinci türevi alınarak ekstremumlarının alabilecekleri pozisyon incelenmiştir. Denklem (5)'in ikinci türevi her durumda, Denklem (7)'deki eşitsizliği sağlayacağından, Denklem (5)'in ekstremumları yani Denklem (6)'daki eşitliği sağlayan tüm t değerlerinde kullanılabilirlik maksimumdur. Newton-Raphson yöntemi yardımıyla Denklem (6)'daki eşitlik yılın her ayı için çözülerek sabit sistem yükünü maksimum kullanılabilirlik koşulunda sağlayan  $I_{cr}$  değerlerine ulaşılmış ve Şekil 6'daki diyagram hazırlanmıştır.

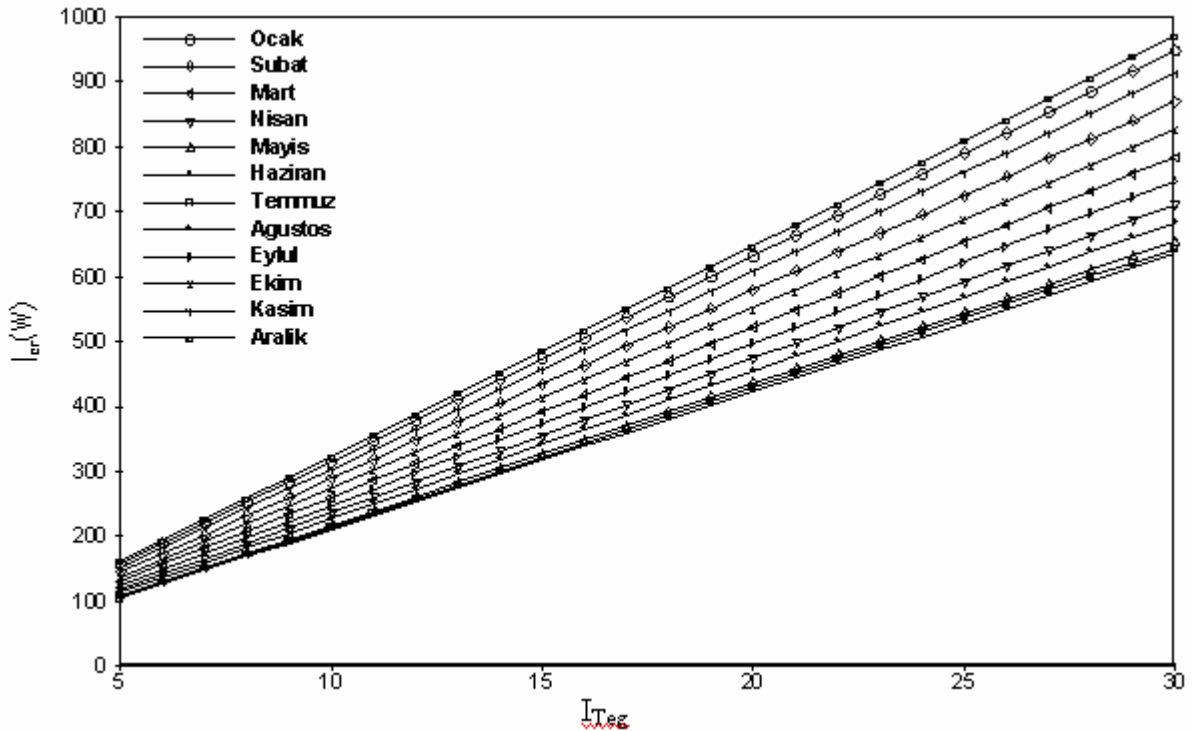
$$\frac{d\Phi}{dt} = a \left[ -b \sin(bt) - 1.1287 \cdot \left( -\frac{30}{c} + \frac{450t}{c^2} \exp\left(-4\left(1 - \frac{15t}{c}\right)\right) \right) \right] \cdot t \quad (6)$$

$$+ a \left[ \cos(bt) + 1.1287 \cdot \left( 1 - \exp\left(-4 + \frac{15t}{c}\right) \right) \right] = 0$$

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} = a \left[ -b^2 \cos(bt) - 1.1287 \cdot \left( \frac{450}{c^2} \exp\left(-4\left(1 - \frac{15t}{c}\right)\right) - \left(-\frac{30}{c} + \frac{450t}{c^2}\right)^2 \exp\left(-4\left(1 + \frac{15t}{c}\right)\right) \right) \right] \cdot t \quad (7)$$

$$+ \left( a \left( -b \sin(bt) - 1.1287 \cdot \frac{15}{c} \exp\left(-4\left(1 - \frac{15t}{c}\right)\right) \right) + \right.$$

$$\left. + \left( a \left( -b \sin(bt) - 1.1287 \cdot \frac{15}{c} \exp\left(-4 + \frac{15t}{c}\right) \right) \right) \right) < 0$$



Şekil 6. Panel yüzeyine günlük gelen toplam ışınım ( $I_{Teg}$ ) miktarı ile kritik ışınım şiddeti ( $I_{cr}$ ) arasındaki ilişki.

### 2.3. PV Panellerin Maksimum Güç Noktasındaki Akım ve Voltaj Değerlerinin Tespiti

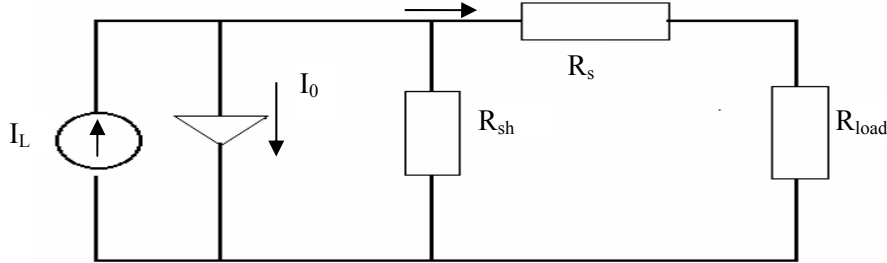
Eşdeğer devresi Şekil 7'de gösterilen PV paneller lineer olmayan güç kaynaklarıdır. Panellerin güç çıktısı ışınım şiddetine ve çevre sıcaklığının birer fonksiyonudur. Panelin uzun dönem performansını hesaplayabilmek için çalışma karakteristikleri ile çevre koşulları arasında matematiksel bir ilişkiye gereksinim vardır. Bu konuda farklı araştırmacılar tarafından önerilen çeşitli matematiksel modeller bulunmaktadır. Bu modellerden en yaygını Loferski (1972) tarafından önerilen;

$$I = I_L - I_0 \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (8)$$

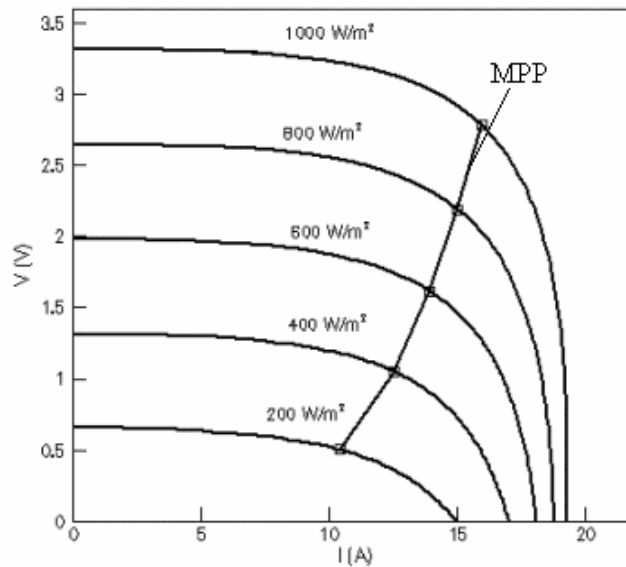
bağıntıdır. Denklemdeki  $I_L$  yüzeye akım düştüğünde üretilen akımı,  $I_0$  karanlık akımı,  $R_s$  seri direnci,  $R_{sh}$  paralel direnci,  $A$  termal voltajı,  $I$  ve  $V$  sırasıyla çalışma akımını ve gerilimini göstermektedir. Denklem (8)'deki  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  ve  $A$  büyüklükleri ışının şiddetine ve çevre sıcaklığına bağlı parametrelerdir. PV panellerle ilgili katalog bilgileri beş parametreyi tanımlama yeterliliğinde değildir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak Townsend, Eckstein ve Al-İbrahim (Bknz: Kou vd., 1998) tarafından, devredeki  $R_{sh} \gg R_s$  gerçeği dikkate alınarak  $R_{sh}$  direnci ihmal edilmiş;

$$I = I_L - I_0 \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right) \quad (9)$$

şeklinde dört parametrelili bir model önerilmiştir. Daha sonraları Duffie ve Beckman (1991) tarafından bu bağıntıdaki dört parametrenin katalog bilgileriyle hesaplanabileceği bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu matematiksel model kullanarak seçilen AP-50 PV panelin çalışma karakteristikleri ve daha sonra Newton-Rapson nümerik çözüm yöntemi kullanılarak saptanan maksimum çalışma noktalarını gösteren Şekil 8'deki diyagram hazırlanmıştır. Ayrıca yine aynı matematiksel model yardımıyla seçilen panelin maksimum çalışma noktasındaki gerilim ve akımın; değişik kritik ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığı değerlerinde bulunabileceği Şekil 9'daki diyagramlar hazırlanmıştır. Bu diyagramlardan yalnızca kritik ışınım şiddeti için değil tüm ışınım şiddetleri için seçilen panelin maksimum çalışma noktasındaki güç çıktısı saptanabilir. Seçilen AP-50 panelin teknik özellikleri Ek 2'de verilmiştir.



Şekil 7. Solar hücrenin eşdeğer devresi

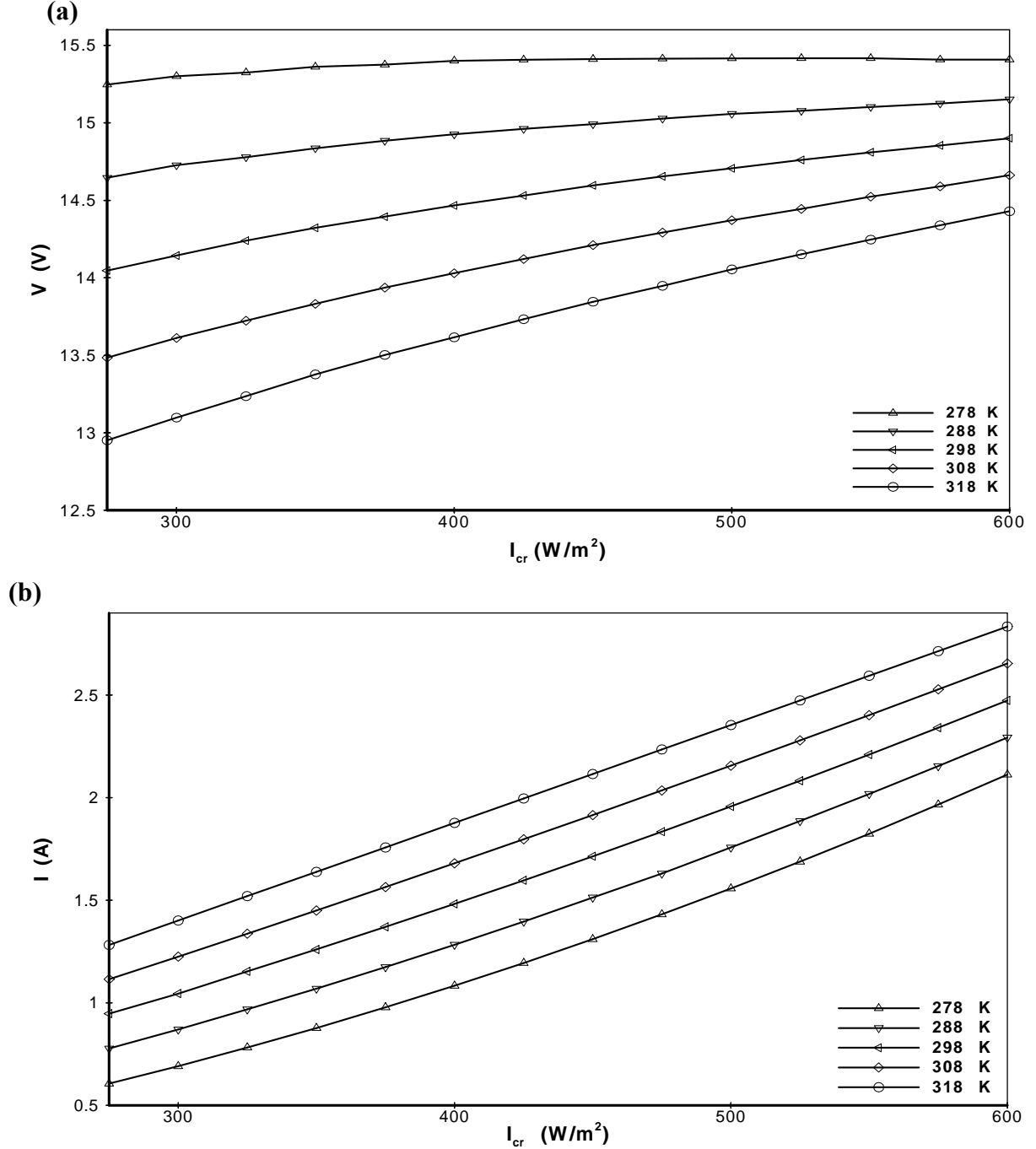


Şekil 8. Seçilen PV panellerin 298 K çevre sıcaklığında ( $T_a$ ) akım ve gerilim karakteristikleri, MPP çalışma noktaları.



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

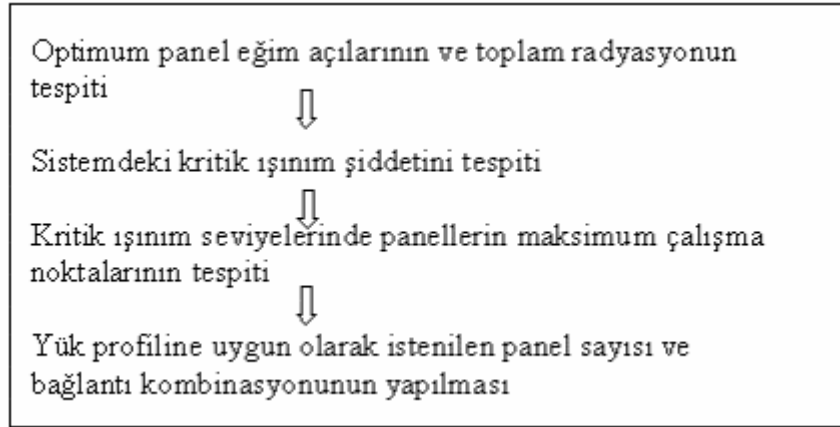
Bu çalışmada PV sistemlerin MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulamalarında, optimum koşullarda minimum panel sayısının araştırabilmesine yönelik grafiksel bir metot önerilmiştir. Bu metot çerçevesinde 37° enlem ve seçilen PV panel referans alınarak çeşitli diyagramlar aylık ortalama değerler bazında hazırlanmıştır. Hazırlanan diyagramlarla 37° enlemi boyunca seçilen panel için yörenin yılın herhangi bir anındaki bulanıklık indisi büyüklüğünden yararlanarak PV sistemlerin MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulaması için gerekli minimum panel sayısı hesaplanabilir.



Şekil 9. Seçilen panelin kritik ışınım şiddetine ve çevre sıcaklığına bağlı olarak maksimum çalışma noktasında gerilim (a) ve akım (b) değerleri.

Diyagramların hazırlanmasında; ilk etapta optimum panel eğim açıları tespit edilmiş ve bulanıklık indisi ile azimut açısı sıfır güneşe yönelmiş bir şekilde yatay yüzeye yelleştirilmiş bir panel için aylık ortalama optimum toplam açı faktörü arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram hazırlanmıştır. Hazırlanan bu diyagram vasıtasıyla, bulanıklık indisi verisinden yola çıkarak aylık ortalama optimum toplam açı faktörü ve dolayısıyla optimum koşullarda panel yüzeyine gelen ışınım miktarı hesaplanabilir. İkinci etapta ise, MPPT uygulamalarında maksimum kullanılabilirlik koşulu araştırılmıştır. Bu çerçevede hazırlanan diyagramda; panel yüzeyine gelen günlük toplam radyasyon verisinden yola çıkılarak, sabit yükte çalışan MPPT uygulamalarında dizayn için seçilecek kritik ışınım şiddeti seviyesi tespit edilebilecektir. Son olarak da tespit edilen dizayn ışınım seviyesi ve projelendirmenin yapıldığı çevre sıcaklığı verilerini kullanarak, panelin maksimum çalışma noktalarındaki akım ve voltajının tespit edilebileceği diyagramlar sunulmuştur.

Benzer şekilde farklı enlemler ve paneller için hazırlanacak diyagramlarla Şekil 10'da özetlenen metodun takip edilmesiyle PV sistemlerin MPPT kombinasyonlarının sabit yük uygulamaları için optimum koşullarda gerekli minimum panel sayısı ve kombinasyonu saptanabilir.



Şekil 10. Sunulan çalışmanın dizayna yönelik kullanım için takip ettiği akış şeması.

### SEMBOLLER LİSTESİ

- $F$  kullanılabilirlik
- $a_{tpo}$  optimum eğim açısı ( $^{\circ}$ )
- $B_i$  bulanıklık indisi
- $I_{cr}$  Kritik ışınım şiddeti ( $W/m^2$ )
- $I_{cr}$  sistemin ihtiyaç duyduğu minimum ışınım seviyesi ( $W/m^2$ )
- $I_{dy}$  yatay yüzeye gelen aylık ortalama direkt radyasyon miktarını ( $kJ/m^2$  gün)
- $I_{Te}$  eğimli yüzeye gelen aylık ortalama ışınım miktarını ( $kJ/m^2$  gün)
- $I_{Tea}(t)$  anlık ışınımı ( $W/m^2$ )
- $I_{Ty}$  yatay yüzeye gelen toplam ışınımı ( $kJ/m^2$  gün)
- $I_{yy}$  yatay yüzeye gelen aylık ortalama yayılı radyasyon miktarını ( $kJ/m^2$  gün)
- $R$  toplam ışınım açı faktörünü
- $R_d$  direkt ışınım açı faktörünü
- $R_{dopt}$  optimum direkt ışınım açı faktörünü

$R_{opt}$	optimum toplam ışı nım aç ı faktörünü
$R_y$	yayı lı ışı nım aç ı faktörünü
$R_{yopt}$	optimum yayı lı ışı nım aç ı faktörünü
$t_{gb}$	güneş batı ş anını göstermektedir
$t_{gd}$	güneş do ğu ş anını ( $s$ )
$t_{gö}$	güneş öğ lesini ( $s$ )
$t_{min}$	sistemin ihtiya ç duydu ğu minimum ışı nım seviyesine ula ş ılan anı ( $s$ )
$I_L$	panel yüzeyine akım dü ş tüğünde üretilen akımı ( $A$ )
$I_0$	Panel karanlık akımı ( $A$ )
$R_s$	panel seri direnci ( $W$ )
$R_{sh}$	panel paralel direnci ( $W$ )
$A$	panel termal voltajı
$I$	panel çalı ş ma akımı ( $A$ )
$V$	panel çalı ş ma gerilimi ( $V$ )
$I_{mp}$	maksimum çalı ş ma noktasında panel ç ıkı ş akımı ( $A$ )
$V_{mp}$	maksimum çalı ş ma noktasında panel ç ıkı ş gerilimi ( $V$ )

## KAYNAKLAR

- Al-Ibrahim A.M., Beckman W.A., Klein S.A., “Desing Procedure for Selecting an Optimum Photovoltaic Pumping System in a Solar Domestic Hot Water System”, Solar Energy, Vol.64, pp. 227-239, 1998.
- Al-Karaghoulı, A., Al-Sabounç ı., A. M., “A PV Pumping System”, Applied Energy, Vol.65, pp. 145-151, 2000.
- Agha K. R., Sbita M. N., “On the Sizing Parameters for Stand-Alone Solar-Energy Systems”, Applied Energy, Vol.65, pp. 73-84, 2000.
- Al-Shaban S., Mohmoud A., “ Self-Control in Storage Unit of PV Plants”, Applied Energy, Vol. 65, pp. 85-90, 2000
- Beckman W.A., Beckman S. A., Duffic J. A., “A Dising procedure for Solar Heating Systems”, Solar Energy, 1979;18:113.
- Bloos, H., “ Analytical and Exerimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems”, Doctor Thesis, University of Oldenburg, 2000.
- Diñçer, B., “Optimum Tilt angle for Solar Collectors Used in Cyprus”, Solar Energy, Vol. 6, pp. 813-819, 1995.
- Duffie, J., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edn., Wiley Interscience, 1991.
- Fırato ğ lu, Z., A., Yeş ilata, Bülent, “Fotovoltaik Güç Destekli Dalgı ç Pompa Sistemlerinde Optimum DizaynKoş ullarının Araş tırılması”, Tesisat Mühendisli ğ i Dergisi, Sayfa:59-66 Nisan-Mart 2001.
- Hsieh S.J., Solar Energy Engineering, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- Kılı ç A., Öztürk A., Güneş Enerjisi, Kipaş Yayı ncılık, 1983.
- Kou S.A., Klein A., Beckman W., “ A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct- Coupled PV Pumping Systems”, Solar Enery, Vol. 64, pp.33-40, 1998.

- Muntasser, M.A. , Bara, M.F., Quadri , H.A. , EL-Tarabelsi, R., La-azebi, I.F., “Photovoltaic Marketing İn Developing Countries”, Applied Energy, Vol. 65, pp 67-72, 2000.
- Veerachary, M., Yadaiah, N., “Ann Based Peak Power Tracking for Supplied DC Motors”, Solar Energy, Vo. 69, pp. 343-350, 2001.
- Yeşilata, B., Aktacir, M.A., “ Fotovoltaik Güç Sistemli Su Pompalarının Dizayn Esaslarının Araştırılması”, Mühendis ve Makine, cilt 42, sayı 493, sy 29-34, 2000.
- Zaki A. M., Eskander M. N., “ Matching of Photovoltaic Motor-Pump Systems for Maximum “, Efficiency Operation”, Renewable Energ, Vol. 7, pp. 279-288, 1996.

**Ek 1. 37 enlemi için sıfır azimut açısı ve güneye yönlendirilmiş eğimli yüzey için aylık ortalama optimum eğim açıları ( $\alpha_{opt}$ ), direkt ışınım aç faktörü ( $R_{dopt}$ ), yayılı ışınım aç faktörü ( $R_{yopt}$ ) ve toplam aç faktörü ( $R_{opt}$ ).**

Aylar	$\alpha_{opt}$ (°)	$R_{dopt}$	$R_{yopt}$	$R_{opt}$
Ocak	65,00	2,32	0,71	1,60
Şubat	56,00	1,79	0,78	1,38
Mart	41,00	1,32	0,88	1,16
Nisan	22,00	1,08	0,96	1,04
Mayıs	5,00	1,00	1,00	1,00
Haziran	0,00	1,00	1,00	1,00
Temmuz	0,00	1,00	1,00	1,00
Ağustos	14,00	1,03	0,99	1,01
Eylül	32,00	1,17	0,92	1,05
Ekim	51,00	1,54	0,81	1,29
Kasım	61,00	2,08	0,74	1,44
Aralık	66,00	2,49	0,70	1,69

**Ek 2 . Seçilen panelin standart test koşullarındaki teknik özellikleri**

Güç(STK)	$I_{ks}$	$I_{mp}$	$V_{av}$	$V_{mp}$	A	h
50 W	3.3 A	3 A	21.5 V	16.7 V	0.56 m <sup>2</sup>	0.114