

CMS HCAL HADRONİK KAPAK KALORİMETRESİNDEKİ HİBRİD FOTO-DİYOTLARIN ENERJİ KAZANÇ KARARLILIĞI ÇALIŞMALARI*

*The Test Results On Gain Stability Of Hybrid Photo-Diodes
Of The CMS Hadronic Endcap Calorimeter*

Hasan Fatih KIŞOĞLU
Fizik Anabilim Dalı

Aysel KAYIŞ TOPAKSU
Fizik Anabilim Dalı

ÖZET

CMS (Compact Muon Solenoid) detektöründeki gereksinimlerden dolayı, hadronik kapak kalorimetresinde (HE) yüksek verimli hibrid foto-diyotlar (HPD) kullanılmaktadır. Multi-alkali foto-diyot tabanlı HPD' ler hem bu gereksinimlere cevap vermekte hem de kalorimetredeki ışıdayıcıların yaydığı ışığa karşı yüksek bir hassasiyet sağlamaktadır. Böyle bir kalorimetre yapısı, tanımlanan bir izdüşümsel geometride, $1.3 \leq |\eta| \leq 3$ psüdorapidite aralığını kapsamaktadır. İyi tanımlanmış bir kalorimetrede, tüm kısımlar arasında uyumluluğun olması için, kazanç, sinyalizasyon zamanı,... gibi değerlerde iyi bir senkronizasyon olması gerekmektedir. Bu çalışma HE kalorimetresinde kullanılan HPD' lerin kazanç kararlılığı ile ilgili bazı test sonuçlarını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: CMS, HCAL, hadronik kapak, kazanç, HPD

ABSTRACT

According to necessities of the CMS detector high-rate hybrid photodiodes (HPD) were used on the hadronic endcap calorimeters (HE). Multialkali photodiode based HPDs respond to these requirements as well as providing a high sensitivity to light emitted by scintillators in calorimeter towers. This structure covers a pseudorapidity range of $1.3 \leq |\eta| \leq 3$ on the defined projective geometry of the calorimeter. There should be a good synchronization in the values of gain, signaling time,...etc of all sectors of a well-defined calorimeter for harmonious functioning. This study presents some test results related to the gain stability of HPDs used on the HE.

Keywords: CMS, HCAL, hadronic endcap, gain, HPD

Giriş

Yüksek enerji fiziği, maddenin temeli olarak bilinen, atom altı parçacıkların yapılarını ve aralarındaki etkileşimleri inceleyen fizik dalıdır.

* Yüksek Lisans Tezi - MSc. Thesis

Bu parçacıkları ve bunlar arasındaki temel etkileşimleri inceleyen modele Standart Model denir.

Yüksek enerji fiziğinde parçacıklar, parçacık–kuvvet ilişkisine dayandırılarak incelenir. Standart Model, bu ilişkilerden doğan teorilerin oluşturduğu bir modeldir. Standart Model'e göre; 1/2 spin kuantum sayısına sahip lepton ve kuarklar maddenin temelini oluştururlar. Parçacıkları fermiyonlar ve bozonlar diye ikiye ayıracak olursak, fermiyonlar arasında yer alan kuark ve leptonlar, spin kuantum sayıları 1/2 olan ve Fermi – Dirac istatistiğine uyan parçacıklardır. Fermiyonlar, dolayısıyla, "Pauli Dışarlama İlkesi" ne de uyarlar.

Standart Model'in pek çok öngörüsünün, günümüzdeki hızlandırıcılarla elde edilen deneysel verilerle örtüşmesine rağmen eksik olduğu bazı konular vardır. Bu nedenle SM'in daha ötesinde bir fizik öngören birkaç model daha tanımlanmıştır. Bunlar, Büyük Birleştirme Teorisi (GUT), Süper Simetri (SUSY) ve Kompozitlik modelleridir. SM'de eksik olduğu düşünülen veya cevap verilemeyen konular arasında en dikkat çeken kütle problemi olarak alınabilir. SM'de bazı parçacıkların kütleleri matematiksel olarak hesaplanamamaktadır. Bilindiği gibi zayıf etkileşmenin ara parçacıkları W^{\pm} , Z^0 bozonları ve elektromanyetik etkileşmenin ara parçacığı fotondur. Bu parçacıkların hepsi de etkileşmelerin ara parçacıkları olmalarına rağmen neden W^{\pm} ve Z^0 büyük kütlelere sahip iken foton kütesizdir? Düşük enerjilerde elektromanyetik ve zayıf etkileşme farklı özelliklere sahipken neden yüksek enerjilerde benzer özellikler taşımaktadırlar?, ...gibi sorulara SM cevap verememektedir. Belki de bu problemin açıklığa kavuşturulması ile "kütle" kavramının tanımı tam olarak yapılabilecektir. SM'de, kütlelerin kaynağı ve düşük enerjilerde elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerdeki farklılığın nedeni olarak "Higgs" parçacığı gösterilmektedir.

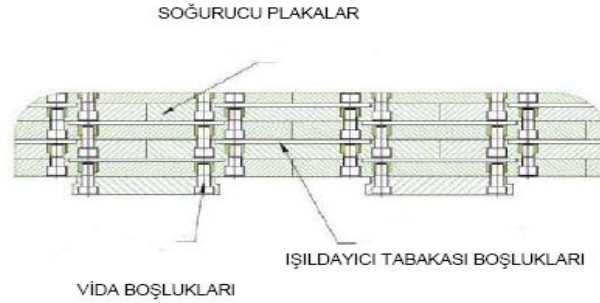
Higgs parçacığını gözlemlenmek ve Standart Model' in cevaplayamadığı diğer sorulara cevap bulabilmek için çalışmalar dünya üzerinde birkaç yüksek enerji fiziği laboratuvarında yapılmaktadır. Bu laboratuvarlardan en büyüğü İsviçre-Fransa sınırında bulunan Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi (CERN)'dir. Bu merkezde kurulan ve 2008 yılı sonlarına doğru çalıştırılması düşünülen Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) ve iki büyük deneyde Higgs parçacığı gözlemlenmeye çalışılacaktır. Bu iki deneyden birisi de Sıkı Muon Solenoidi (CMS)'dir. Bu deneyde Higgs parçacığının, varsayılan, çeşitli bozunum mekanizmaları incelenecektir. Bu incelemeler için etkileşme sonrasında ortaya çıkan parçacıkları gözlemlenmek, ve bu gözlem için ise parçacıkların enerjilerini, momentumlarını belirlemek gerekir. Parçacıkların bu fiziksel niceliklerini ölçmek için, CMS deneyinde, çeşitli detektörler kullanılmakta ve etkileşme sonunda ortaya çıkan parçacıkları bu yapıya yönlendirebilmek için manyetik alan kullanılmaktadır. CMS deneyinde kullanılan detektörlerden biri de, hadronik parçacıkları tespit etmek amacıyla kullanılan, hadronik kalorimetredir(HCAL). Bu çalışmada CMS deneyinde kullanılan HCAL alt detektörünün hadronik kapak (HE) kısmında yapılan, kalite kontrol testleri sırasındaki enerji kazanç kararlılığının ölçümleri ve sonuçları anlatılmaktadır.

Materyal ve Metot

CMS'deki kapak bölgesi, silindirik bir kutu şeklindeki detektörün her iki ucunda bulunmaktadır. Her iki uçtaki kapak bölgelerine yerleştirilen hadronik kapaklar HE+ ve HE- olarak isimlendirilmiştir. HE'nin sahip olduğu psüdorapidite aralığının, BHÇ'de çarpıştırılacak olan proton demetlerinin son durumunda ortaya çıkan parçacıkların %34'ünü kapsamasından ve detektörün en az 10 yıl çalıştırılması düşünüldüğünden dolayı kalorimetrenin yüksek bir radyasyona maruz kalacağı beklenmektedir. Bu nedenle, BHÇ'de kullanılacak olan yüksek ışıklılığı ($L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) da dikkate alırsak, HE'nin radyasyona karşı yüksek bir dayanıklılığa (MRad düzeyinde) sahip olması gerekmektedir. Ayrıca demet içerisindeki öbeklerin 40 MHz frekansla (25 ns) çarpışmaları, ortaya çıkacak ürünleri yüksek sayma hızı gerektirdiğinden HE detektörü bu gereksinime de cevap vermelidir.

HCAL'ın kapak bölgeleri solenoid mıknatısın içerisine yerleştirildiğinden dolayı, bu kısımların 4 T'lık manyetik alandan etkilenmemesi için HE'nin yapım malzemesi olarak yeterince iyi özelliklere, soğurma uzunluğuna ve uygun maliyete sahip pirinç malzemeler (%70 Cu ve %30 Zn) kullanılmıştır. Detektörlerdeki bu soğurucular, yüksek enerjili parçacıkların enerjilerini ölçme amacıyla kullanılan ve bunu parçacık enerjisini soğurarak yapan elemanlardır.

HE'de kullanılan soğurucular ise, tek bir parçacığın enerji çözünürlüğünden daha ziyade, HB ile HE arasındaki boşluğu azaltmak için dizayn edilmiştir [CMS Collaboration, 2008]. Soğurucu plakalar, aralarında sıralı boşluklar olacak şekilde birbirlerine bağlanmışlardır. Bu 79 mm'lik soğurucu plakalar arasında parçacıkların etkileşerek sinyal oluşturduğu ışıldayıcı tabakalar için 9 mm'lik boşluklar bırakılmıştır (Şekil 1). HE'nin toplam boyu, elektromanyetik kalorimetrenin kristallerini de içerecek şekilde, 10 etkileşme uzunluğu (λ) kadardır [CMS Collaboration, 2008].



Şekil 1 Soğurucu plaka kesiti

Böyle bir soğurucu yapısının enerji çözünürlüğü

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\%100}{\sqrt{E}} \oplus \%2 \quad (1)$$

olarak verilir[http://rdms-cms.jinr.ru/docs/rdms_1/hadron/HEenglish.html].

HE'de soğurucularla birlikte kullanılan ve aynı zamanda detektörün “aktif elemanı” olarak bilinen ışıldayıcılar enerji soğurduğunda yaklaşık 520 nm'lik mavi ışık yayımlarlar. Yayımlanan bu ışığı dalga boyu öteleyici fiberler (WLS) toplamaktadır. Bu fiber kablolar ışıldayıcılardan aldığı ışığı foto-detektörlere uygun dalga boyunda taşımaktadırlar. Işıldayıcı tabakalarının üzerinde WLS fiberlerinin yerleştirilmesi için oyuklar vardır.

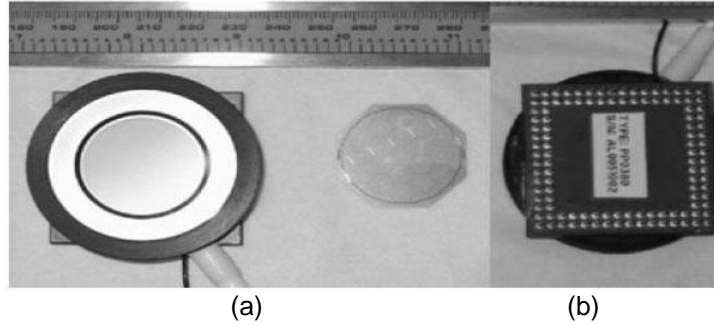
WLS fiberlerinin iki ucunun hassas olması gerektiğinden elmas kesiciler ile işlenmiştir. Alınan ışığın şiddeti ne kadar fazla olursa foto-detektörler üzerine düşen ışık, dolayısıyla okunan sinyal o kadar kuvvetli olur. Bu nedenle WLS fiberlerinin bir ucunun alüminyum ile kaplanması yansıtıcı görevi görmesini sağlar. Bu şekilde ışıldayıcının her bölgesinden gelen ışık toplanabilir. Fiberlerin diğer ucu ise fotodetektörlere bağlı olan başka bir fiber optik kabloya bağlıdır. Karo şeklindeki ışıldayıcılar ince kenarlarından boyanarak (ışık kaybını azaltmak için) ve düzlemsel kalıbın içerisine konularak tabaka şekline dönüştürülür. Bu şekildeki tabakalardan hadronik kapak bölgelerinde toplam 1368 tane, "karo" lardan ise 20916 tane vardır. Bu şekilde iki tane ışıldayıcı tabakası HE'de bir sektörü temsil etmektedir.

HE kalorimetresinde 18 tane sektör vardır. Kalorimetrenin farklı bölgelerinden gelen sinyallerin yerlerini saptamak amacıyla bir izdüşümsel geometriye ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle kalorimetre “katman”lar ve “kule”lere ayrılarak haritalandırılmıştır. HE için katmanlar, numaraları 0'dan başlayarak 17'ye kadar (18 tane); kuleler ise 16'dan başlayarak 29'a kadar (14 tane) devam etmektedir. Ayrıca kalorimetre, büyüklüğünden dolayı, A, B, C olarak üç kısma ayrılmıştır. Böyle bir gereksinim, meydana gelebilecek aksaklıklardan kalorimetrenin bütününe etkilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Böylece aksaklık hangi kısımda ise sadece o kısım etkilenmektedir.

Hadronik kalorimetrede (HCAL) ışıldayıcı karolar üzerine düşen parçacıklar vasıtasıyla yayınlanan yaklaşık 520 nm 'lik dalga boyundaki mavi ışık WLS fiberlerle okuma ünitesine taşınır[Cushman ve arkadaşları, 2002]. Bir ucu, aynı zamanda, WLS fiberleri ile de bağlantılı olan optik kablolar aldıkları bu mavi ışığı optik bağlayıcılara taşırlar ve buradan düzlemsel şerit şeklindeki fiber kablo paketleri yardımıyla bu ışık foto-diyotlara taşınır. HCAL tarafından kullanılan foto-diyot, bir S20 foto-katottan oluşan ve vakumlanmış bir tüp içerisine konulan bir hibrid fotodiyottur[Cushman, 2004].

Bu tüpün içerisinde 3.3 mm 'lik bir boşluk vardır ki burada, foto-katottan sökülen elektronların silikon foto-diyota yüksek bir enerji ile çarpması için hızlandırılması sağlanır. Hızlanan elektronların çarptığı bu silikon fotodiyot ise sık aralıklarla dizilmiş, altıgen yapılı birçok küçük foto-diyottan oluşmaktadır.

4T'lık manyetik alan foto-diyot seçiminde silikon kullanmamızı gerektirmektedir. Bu nedenle karşımıza iki alternatif çıkmaktadır: APD veya HPD. Bu iki seçenek arasında yapılan tercih, test demeti olarak bilinen, düşük enerjili ve düşük ışıklılığa sahip (BHÇ'de kullanılacak olan demete göre) parçacık demetleri ile yapılan araştırmalar sonucunda yapılmıştır. Elektron, müon ve pion demetleri kullanılarak yapılan testler sonucunda HPD'nin MIP (Minimum İyonize eden Parçacıklar) ve radyoaktif kaynakla yapılan kalibrasyon sonucundaki DC sinyale karşı tepkisinin, APD'den oldukça iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca müonların oluşturduğu ve "nükleer karşı efekt" şeklinde isimlendirilen fon sinyali de HPD' lerde azaltılmıştır. HPD'de karşılaşılan düşük akım değerini önlemek için, fotodiyota, yüksek gerilim ve denetim gerilimi (bias gerilimi) uygulanabilir. Bir HPD'nin görünümü şekil 2'deki gibidir.

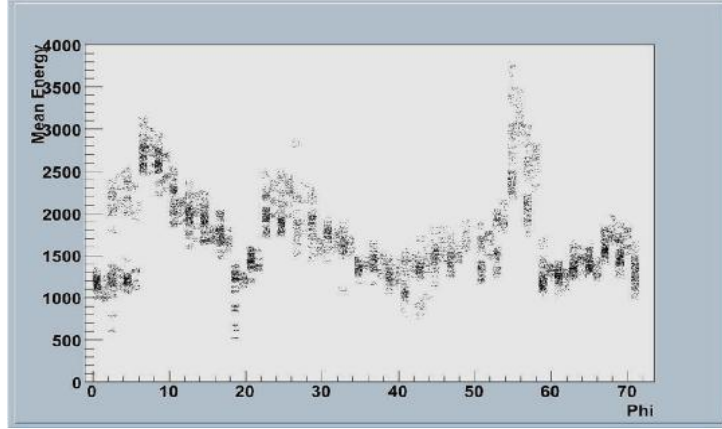


Şekil 2 HCAL'ın kullandığı örnek bir HPD. Silikon foto-diyot HPD'nin ortasına yerleştirilmektedir (a).Arka yüzeyi ise okumayı sağlayan elektroniklere bağlanmaktadır (b).

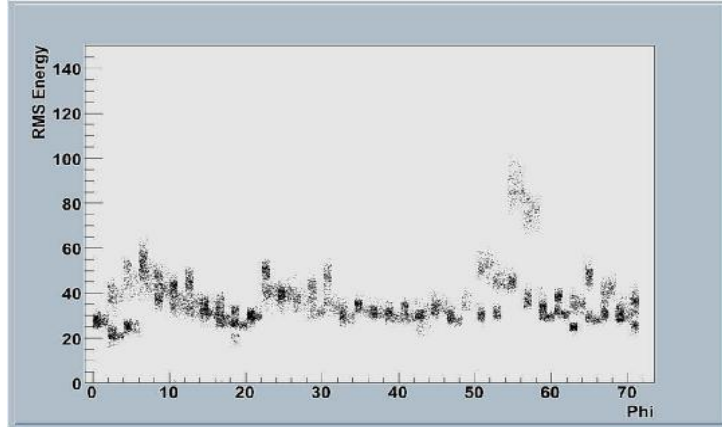
Araştırma ve Bulgular

HE+ kalorimetresinde kullanılan HPD'lerde enerji-kazanç kararlılığını gözlemleyebilmek için, kalorimetrenin A, B ve C kısımlarından veriler alınmıştır. Bu veriler +12V'luk LED verileri olup, sadece uygun olanları kullanılmıştır. Alınan her bir veride, kalorimetreye 1000 puls içeren sinyal gönderilmiş ve bu sinyaller aracılığıyla detektörün tepkisi olarak gözlenebilen olaylar (etkileşmeler) incelenmiştir. Elde edilen bu verilerde ortalama enerji, ortalama enerjinin KKO (Kare Kök Ortalama) değeri, detektörün ortalama cevap süresi ve bu cevap süresinin KKO değerlerine bakılmıştır.

İlk olarak kalorimetrenin üç kısmını da içeren genel veriler alınmıştır. Bu genel veriler ile referans veri seçilmiştir. HE+ kalorimetresinin tüm sektörlerinden alınan veriler şekil 3 ve şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3 Bütün HE+ kısımlarından alınan verilerin ortalama enerjileri

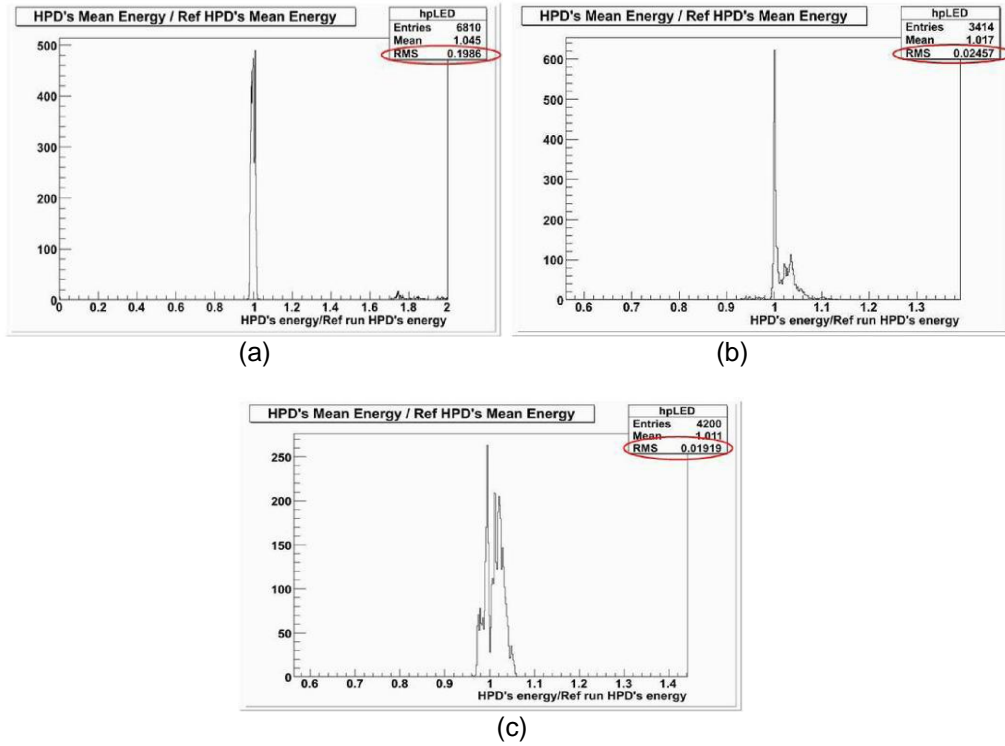


Şekil 4 Bütün HE+ kısımlarından alınan verilerin KKO değerleri

Bütün kısımların uyumluluğu söz konusu olduğu için tüm sektörlerden alınan verilerin KKO değerlerinin sabit olmasını, yani, alınan değerlerin istatistiksel olarak geniş bir aralığa yayılmamasını bekleriz. Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü gibi

enerjinin ortalama değeri yaklaşık 1600 fC, KKO değeri ise yaklaşık 40 fC civarındadır. Burada “enerji” ifadesi aslında her bir kısımdaki HPD’lerde analogdan dijitale dönüştürülen sinyal (ADC count) dir. Zaman birimi olarak ise BHÇ’deki çarpışma sıklığı (25 ns) “bx” (bunch-crossing) kullanılmıştır. Bu verilere göre seçeceğimiz referans veri %2.5’luk hata payı içerisinde olmalıdır.

Her bir kısımdaki enerji-kazanç kararlılığını görebilmek için üç kısımdan da alınan LED verileri incelenmiştir. Enerji-kazanç kararlılığı için her bir veriden elde edilen değer, bundan daha önce alınan ve kendimize referans olarak kabul ettiğimiz veri değerleri ile karşılaştırılmıştır. Böylece verilerdeki enerji kazancı değerinin kararlılığının korunup korunmadığı incelenmiştir (şekil 5).

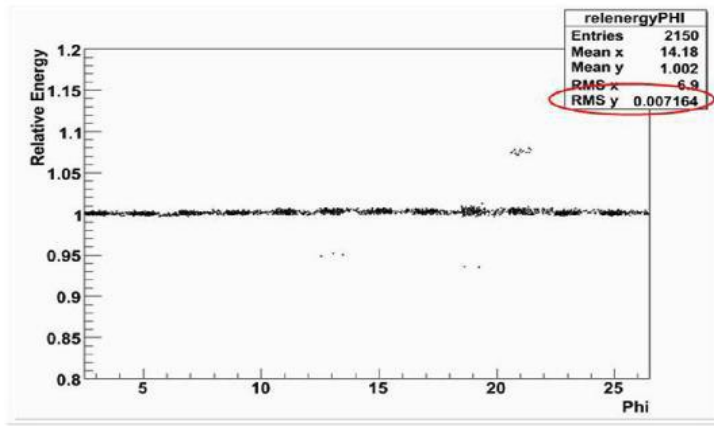


Şekil 5 HE+ kalorimetresindeki A (a), B (b) ve C (c) kısımlarının referans veri ile karşılaştırılması

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü gibi B ve C kısımları referans veriden %2 kadarlık bir fark gösterirken A kısmı referans veriden %20 farklılık göstermiştir. Ayrıca

A kısmı için alınan verilerden beş tanesinde 2 numaralı sektör ($\Phi = 3, 4, 5, 6$) referans veriden 2 katı farklılık veya ötelenme göstermiştir. Bundan dolayı A kısmından bir takım veriler daha alınarak sıcaklık ve sinyaldeki gecikmenin enerji kazancı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Sinyalin kalorimetreye varış süresindeki gecikmenin etkisini görmek amacıyla arka arkaya alınan iki verinin oranları (relative energy) incelenmiştir. Bu değerler şekil 6'da gösterilmiştir.



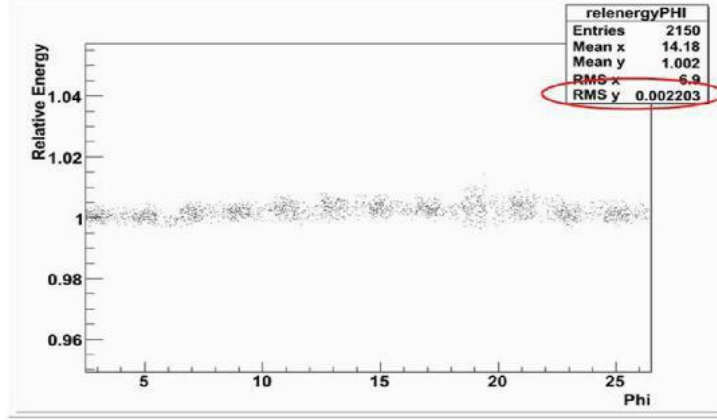
Şekil 6 Sinyal gecikmesinin enerji kazancına etkisi. Dikey eksenle tanımlanan "relative energy", birbirini takip eden iki veriden elde edilen enerjilerin oranıdır.

Normalde, HPD'lerden elde edilen enerjilerin sinyaldeki gecikmelerden etkilenmemesini bekleriz. Bu nedenle birbirini takip eden iki veriden alınan enerjilerin oranının 1 olması gerekmektedir. Ancak, grafikten görüldüğü üzere, bu oran bazı yerlerde (gecikmenin 2 bx olduğu phi değerleri) beklenen değer dışına çıkmıştır. Buna göre, sinyaldeki gecikmenin enerji kazancını etkilediği düşünülmektedir.

Bir sektörden elde edilen enerji ortalama bir enerjidir. Bu ortalama enerji, bir sektördeki dört HPD'de, 10 bx (250 ns) zaman aralığı boyunca depolanan yükün ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Bu ortalama kütle-merkezi formülü kullanılmaktadır. Ortalama enerjiyi \bar{E} , i inci bx zaman aralığında elde edilen enerjiyi ise E_i ile gösterirsek bir sektörden elde edilen ortalama enerji;

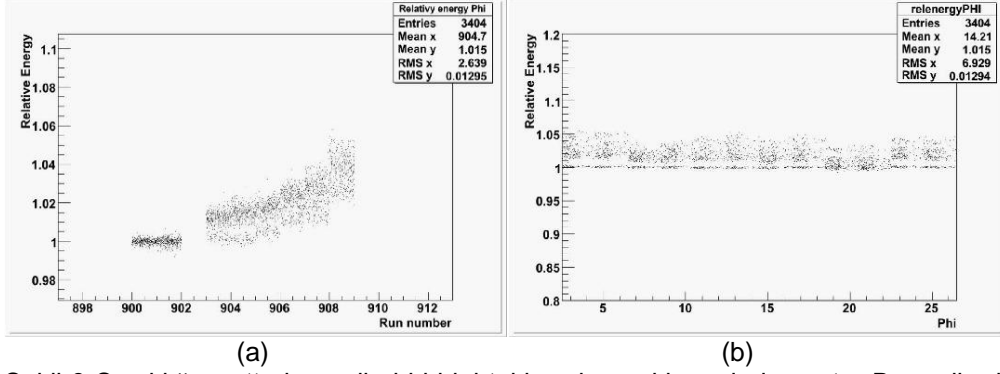
$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{10} iE_i}{10} \quad (2)$$

olur. Sektörden elde edilen bu ortalama enerji hesabına istenmeyen gürültü fon sinyali de katılmaktadır. Enerji ortalaması hesabına sadece maksimum sinyal civarındaki dört sinyali katarak ve diğer sinyalleri bu hesaba katmayarak yeniden bir ortalama enerji tanımlanmıştır. Bu şekilde yapılan bir ortalama enerji ile sadece sektördeki dört HPD'den alınan enerjiyi göz önünde tutmaktayız. Böylece HPD sinyallerinden çok küçük olan bu gürültü fon sinyallerinin çıkarılması ile KKO değerini daha da düşürebiliriz. Bu şekilde hesaplanan ortalama enerjiye göre elde edilen sonuç şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7 Yeniden hesaplanan ortalama enerjiye göre sinyal gecikmesinin enerji kazancına etkisi azaltılmıştır. KKO değeri %0.2'ye düşmüştür.

HPD'lerden elde edilen enerji kazancının sıcaklıkla değişimini görebilmek için ise sıcaklığı 20 °C'den 38 °C'ye yükselterek birbiri ardına sekiz veri alınmıştır. Bu verilerden elde edilen sonuçlar şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8 Sıcaklığın artırılması ile birbirini takip eden sekiz veri alınmıştır. Bu verilerden sıcaklığı her arttırmada kazancın bir önceki veriye göre arttığı görülmektedir (a). Sıcaklığın artırılması ile arka arkaya alınan verilerin oranı ise “1” değerinden daha büyüktür (b).

Sonuç

HE+ kalorimetresindeki HPD’lerin enerji-kazanç kararlılığı incelenmiştir. Kararlılık incelenmesinde kullanılacak olan referans veri, kalorimetreden alınan genel veriler ve bu verilerin KKO değerlerinin bize izin verdiği aralıklar arasında seçilmiştir. Bu referans veri ile kalorimetrenin üç kısmından alınan bağımsız veriler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre B ve C kısımları referans veriden yaklaşık %2, A kısmı ise yaklaşık %20 farklılık göstermiştir. Bu farklılığın sıcaklık ve sinyaldeki gecikmeden kaynaklandığı düşünülmüştür. Sinyaldeki gecikmenin etkisi yapılan yeni bir ortalama enerji hesabı ile azaltılmıştır. Ayrıca alınan verilerden sıcaklığın da HPD’lerin kazancını etkilediği görülmüştür.

Kaynaklar

ANONİM, 2008. 14 Şubat 2008 http://rdms-cms.jinr.ru/docs/rdms_1/hadron/HEenglish.html

CMS Collaboration, 2008, “The CMS Experiment at the CERN LHC” (yayınlanmamış).

CUSHMAN P.B., 2004, “The Performance of the Multi-Channel Hybrid Photodiodes for CMS HCAL”, High Energy Physics, ICHEP 2004, p.964-967.

CUSHMAN P.B. ve arkadaşları, 2002, “CMS HCAL Hybrid Photodiode Design and Quality Assurance Stations”, IIB Fall 2002, Paper No.1.