

ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YOĞUN IŞINLANMIŞ SİLİKON PİKSEL DEDEKTÖRÜ İÇİN KÜME  
RESTORASYONUNUN GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

Işık Gökçen KARSLIOĞLU

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA  
2023

Her hakkı saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YOĞUN IŞINLANMIŞ SİLİKON PİKSEL DEDEKTÖRÜ İÇİN KÜME RESTORASYONUNUN GELİŞTİRİLMESİ VE DOĞRULANMASI

Işık Gökçen KARSLIOĞLU

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ  
Eş Danışman: Dr. Viktor VESZPREMİ

Parçacık hızlandırıcıları elektron, pozitron, proton, müon vb. yüklü parçacık demetlerini hedeflenen enerjilere kadar hızlandıran teknolojik donanımlardır. CERN’de kurulu bulunan ve proton-proton çarpıştırıcısı olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider, LHC) dünyanın en büyük proton hızlandırıcılarına dayalı olarak inşa edilmiştir. LHC, maddeyi yüksek sıcaklık ve yoğunluk koşulları altında araştırmak için özel olarak tasarlanmıştır ve Büyük Patlama’dan kısa bir süre sonra plazma ortamında oluşan kuark-gluon kombinasyonlarının yanı sıra mezon ve baryon oluşumunun incelenmesine olanak tanır. LHC üzerinde değişik amaçlar ile ATLAS, CMS, ALICE ve LHC-b dedektörleri inşa edilmiştir. CMS (Compact Muon Solenoid) dedektörü LHC’de ortaya çıkabilecek yeni bir olguyu gözlemleyebilecek çok yönlü bir dedektördür. CMS dedektörü içinde birden çok dedektör farklı amaçlara hizmet eder. Bu tür bir dedektör, en iç bölgeye yerleştirilmiş ve genellikle izleme sisteminin kalbi olarak adlandırılan Piksel Dedektörüdür. Piksel Dedektörü, yüklü parçacıkların doğru şekilde izlenmesini ve etkileşim noktasının yakınında tepe noktasının yeniden oluşturulmasını kolaylaştıran hassas 3B uzamsal bilgi sağlar. Piksel dedektörünün en içteki katmanının performansı, darbe parametresinin genel çözünürlüğünü önemli ölçüde etkiler. Parçacık çarpışmalarını tespit eden ilk dedektör olarak, radyasyonun yoğun olduğu kısımda yer almaktadır. Piksel kümelerinde radyasyon hasarının neden olduğu herhangi bir bozulma veya çözünürlük kaybı, sahte parçacık izlerinde artışa neden olabilir. Bu nedenle, güvenilir sonuçlar için bu etkiyi azaltmak ve düzeltmek çok önemlidir. Bu çalışmada, kümeler üzerindeki radyasyon hasarını araştırmak için Piksel dedektörünce alınan veriler üzerinde çalışılmış olup parçacık türleri olarak müonlar ve antimüonlar üzerinde odaklanılmış ve sonuçlardaki farklılıkları öncelikle yüklere atfedilmiştir. Çalışmada ayrıca Piksel dedektörünün Modül-1 ve Modül-4’ünü karşılaştırıldı ve bu karşılaştırmada C++ kodları ve parçacık fiziğinde bilgisayar uygulamaları kullanılmıştır. Radyasyonun açığa çıkan kümelere olan etkisi gözlemlendi ve hasarlar için Digi Morphing adı verilen bir kodlama uygulaması ile düzeltme çalışması yapılmıştır.

**Temmuz 2023, 89 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Yüklü parçacık izlenmesi, Kümeleme, Radyasyon hasarı, Piksel dedektörü, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, CMS Kollaborasyonu

## ABSTRACT

Master Thesis  
IMPROVEMENT AND VERIFICATION OF CLUSTER RECONSTRUCTION FOR  
HEAVILY IRRADIATED SILICON PIXEL DETECTOR

Işık Gökçen KARSLIOĞLU

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ  
Co-advisor: Dr. Viktor VESZPREMİ

Particle accelerators are advanced devices used to propel charged beams of elementary particles such as electrons, protons, positrons, muons to aimed high energies. CERN Large Hadron Collider (LHC) is largest particle colliders that is based on proton accelerators with highest energy in the world. The LHC is specifically designed to probe matter under conditions of high temperature and density, and allows the study of meson and baryon formation, as well as quark-gluon combinations formed in the plasma environment shortly after the Big Bang. The LHC includes ATLAS, CMS, ALICE ve LHC-b detectors for several reasons. The CMS detector is positioned at one of four collision points and serves as a versatile detector capable of observing any new phenomena in physics that the LHC may reveal. One such detector is the Pixel Detector, located in the innermost region and often referred to as the heart of the monitoring system. The Pixel Detector provides precise 3D spatial information that facilitates accurate tracking of charged particles and peak reconstruction near the point of interaction. The performance of the innermost layer of the pixel detector significantly affects the overall resolution of the pulse parameter. As the first detector to detect particle collisions, the pixel detector placed in a radiation-rich location is of great importance. Ensuring the accuracy of the data received is crucial to the success of this groundbreaking experiment. Any degradation or loss of resolution in pixel clusters caused by radiation damage can result in an increase in false particle tracks. Therefore, it is very important to reduce and correct this effect for reliable results. In this study, the data received by the Pixel detector was studied to investigate the radiation damage on the clusters. This study focused on muons and antimuons as particle types, and the differences in results were primarily attributed to their charge. The study also compared Module-1 and Module-4 of the Pixel detector. The work was done using C++ codes and computer applications in particle physics. However, the effect of radiation on exposed clusters was observed and damages were corrected with a coding application called Digi Morphing.

**July 2023, 89 pages**

**Keywords:** Charged particle tracking, Clusterization, Radiation damage, Pixel detector, Large Hadron Collider, CMS Collaboration

## TEŞEKKÜR

Büyük bir memnuniyet ve saygıyla danışmanım Prof. Dr. Ömer Yavaş'a teşekkür etmek istiyorum. Zor durumlarda desteğiniz, akıllıca tavsiyeleriniz ve karar vermede bana verdiğiniz özgürlük için teşekkür ederim. Zor zamanlarda yardımınız, desteğiniz ve sabrınız için minnettarım.

Fizikle ilgili tartışmalar için, "dedektör performansı" konusundaki derin bilgisini paylaştığı ve kariyer planlamasındaki paha biçilmez yardımı için Viktor Veszpremi'ye minnettarım. Bana "bir şeyi bilmemenin suç olmadığı" fikrini verdiniz. Bunun için ne kadar teşekkür etsem az... Tez çalışmalarımın tamamına sağladığınız katkı için, beni Macaristan'da ağırladığınız ve enstitünüzün kapısını bana açtığınız için teşekkür ederim.

Krisztina Marton'a analiz konusundaki rehberliği, veri analizi hakkındaki açıklamaları ve kodlama ile ilgili tavsiyeleri için teşekkür ederim.

Koşullar ne olursa olsun, hayatımda ne yapmak istediğimi seçme şansı veren ailem Gizem Karşlıoğlu ve Birsen Kandır'a teşekkür etmek istiyorum. Sevgileri ve sabırları için aileme minnettarım. Ailem olmadan tüm bunları yapmanın bir anlamı olmazdı.

Sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Işık Gökçen KARSLIOĞLU  
Ankara, Temmuz 2023

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	3
2.1 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı.....	3
2.1.1 LHC makinesi.....	3
2.1.2 Çarpışmaların parlaklığı .....	7
2.2 Kompakt Müon Solenoid Deneyi.....	10
2.2.1 Solenoid mıknatıs .....	12
2.2.2 Silikon izleyici .....	13
2.2.3 Kalorimetreler .....	15
2.2.4 Müon dedektörleri .....	20
2.2.5 Tetik sistemi .....	26
2.3 LHC, CMS ve Pixel Dedektör Yenilikleri (Faz-2): .....	29
2.3.1 HL-LHC yükseltmesi .....	29
2.3.2 CMS Faz-2 yükseltmesi .....	31
2.3.3 Faz-2 izleyici yükseltmesine genel bakış .....	33
2.3.3.1 Mevcut izleyicinin sınırlamaları .....	33
2.3.3.2 İzleyici yükseltmesi için gereksinimler .....	35
2.3.4 Yükseltilmiş izleyici konseptine genel bakış .....	38
2.3.4.1 L1 tetikleyicisine izleyici girişi .....	38
2.3.5 Dış izleyici .....	40
2.3.6 Dahili izleyici (The inner tracker) .....	41
2.4. Radyasyon Hasarları .....	42
2.4.1 Okuma elektronlarındaki radyasyon etkileri.....	42
2.4.2 Geçici etkiler .....	43
2.4.3 Kümülatif etkiler .....	44
2.4.4 Dedektör performansı.....	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	46
4. BULGULAR .....	47
4.1 Dedektör ve Küme Özelliklerinin Tekniği.....	50
4.2 Müonlar ve Antimüonlar İçin Küme Yükü ve Küme Boyutu .....	56
4.2.1 Inclusive küme yükü ve küme boyutu .....	67
4.2.2. Küme pozisyonları ve traj içerisindeki izler .....	71
4.2.3 Doluluk grafikleri ve kırılan kümeler .....	76
5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	81
KAYNAKLAR .....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	89

## SİMGELER DİZİNİ

$\vec{B}$	Manyetik Alan
c	Işık Hızı
cm	Santimetre
$\vec{E}$	Elektrik Alan
e	Elektron
eV	Elektron Volt
f	Frekans
GeV	Giga Elektron Volt
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
MeV	Mega Elektron Volt
mrad	Mili Radyan
kW	Kilo Watt
m	Metre
MHz	Mega Hertz
nmrad	Nanometre Radyan
r	Yarıçap
T	Tesla
$\mu\text{m}$	Mikro Metre
$\mu\text{s}$	Mikro Saniye
Km	Kilometre
A	Amper
kA	Kilo Amper
Gj	GigaJoule
B	Barn
S	Saniye
ns	Nanosaniye
L	Parlaklık
$\sigma$	Kesit
n	Proton Sayısı
$\Pi$	Pi Sayısı
$\Phi$	Kartezyen Koordinatlarda x-ekseni
$\theta$	Kutup Açısı
$\eta$	Hızlılık
K	Kelvin Derece
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
$X_0$	Radyasyon Uzunluğu
$\lambda_1$	Nükleer Etkileşim Uzunluğu
$^{\circ}$	Açı Cinsinden Derece
n	Kırılma Indisi
E	Enerji
S	Stokastik Terim
N	Gürültü Terimi
C	Sabit Terim
z	z-ekseni

V	Volt
$\mu$ rad	Miliradyan
H	Higgs
GeV	Giga Elektronvolt
TeV	Tera Elektronvolt
$P_T$	Momentum
$\beta^*$	Beta Fonksiyonu
Mgy	Milligray
kHz	KiloHertz

### **Kısaltmalar**

LHC	Large Hadron Collider
CMS	Compact Muon Solenoid
SM	Standart Model
LEP	Buyuk Elektron-Pozitron Carpistiricisi
ATLAS	A Toroidal LHC ApparatuS
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
LHCb	Large Hadron Collider Beauty
Pp	proton-proton
QCD	Kuantum Kromo Dinamik
ttH	Bir Üst Kuark Çifti ile İlişkili Higgs Bozonu
ECAL	Elektromanyetik Kalorimetre
HCAL	Hadron Kalorimetresi
HB	Varil Kalorimetre
HO	Dış Kalorimetre
HF	Ileri Kalorimetre
DT	Sürüklenme Tüpleri
CSC	Katot Şerit Odaları
RPC	Dirençli Plaka Odaları
GEM	Gaz Elektron Çoğaltıcıları
L1T	Seviye-1 Tetikleyici
HLT	High Level Trigger
TP	Tetikleyici Primitifler
BMTF	Namlu Müon Izi Bulucu
OMTF	Örtüşme Müon Izi Bulucu
EMTF	Uç Kapak Müon Izi Bulucu
LCT	Yerel Yüklü Izler
MPC	Müon Bağlantı Noktası Kartları
CPPF	Konsantrasyon Ön İşleme ve Fan-out
LS3	Long Shot Down
ESPP	Avrupa Parçacık Fiziği Stratejisi
ESFRI	Avrupa Araştırma Altyapıları Strateji Forumu
APD	Çığ Foto Diyot
SiPM	Silikon Fotoçoğaltıcı
HPD	Hibrit Fotodiyot
L1	Seviye-1

PS	Piksel Sensör
CMOS	Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken
SEU	Tek Olay Bozulmaları
ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
CPU	Central Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
L1-L4	Layer-1 ve Layer-4
BPIX	Barrel Piksel Dedektör
FPIX	Forward Piksel Dedektör
ROC	Okuma Çipi
DAQ	Veri Toplama
3B	3-Boyut
Bor3_nodm	Before Radiation without Digi Morphing
Bor3_dm	Before Radiation with Digi Morphing
Eor3_nodm	After Radiation without Digi Morphing
Eor3_dm	After Radiation with Digi Morphing
M1	Module 1
M4	Module 4

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	LHC manzarasının havadan görünümü. Fransa-İsviçre sınırı sarı çizgiyle gösterilir ve LHC tünelleri beyazla gösterilir. Resimde ATLAS'ın hemen altındaki üçgen bina kompleksi, CERN'in ana kampüsüdür .....	4
Şekil 2.2	LHC'nin şematik düzeni. Her oktant bir ekleme noktası içerir. 1, 2, 5 ve 8 numaralı noktalar, çarpışma deneylerinin yerleridir. 3. ve 7. noktalar ışın kolimasyonu içindir. Hadronlar 1. ve 8. Noktalara enjekte edilir, 4. Noktada hızlandırılır ve sonunda 6. Noktada atılır (Lyndon,2008) .....	5
Şekil 2.3	İdeal bir dört kutuplunun manyetik alanı .....	6
Şekil 2.4	LHC Run 2 (2015-2018) pp çarpışmalarının en yüksek anlık parlaklığının (üstteki grafik) ve kümülatif bütünleşmiş parlaklığının (alttaki grafik) evrimleri .....	8
Şekil 2.5	Bir pp çarpışmasındaki etkileşimlerin bir örneği. Bu örnekteki birincil etkileşim, Feynman diyagramı bir üst kuark çifti ile bağlantılı Higgs bozonu üretimidir (T. Gleisberg, 2009) .....	9
Şekil 2.6	CMS dedektörünün bir kesit diyagramı. Tasarım, Faz-1 dedektör yükseltmesi adı verilen bir tasarım aşamasına göre belirlenir (Tai Sakuma, 2019).....	11
Şekil 2.7	CMS detektörünün CMS koordinatları ile ızgaralanmış uzunlamasına bir kesit görünümü (CMS Collaboration. Performance of the CMS, 2018).....	12
Şekil 2.8	CMS'deki manyetik alan, 3,8 T'lik bir merkezi alan gücüyle çalışan, uzunlamasına bir kesitte görüntülenir. Alan değeri $ B $ solda gösterilir ve alan çizgileri sağda gösterilir (CMS Collaboration, 2010).....	13
Şekil 2.9	Faz-1 CMS izleme sisteminin dörtte birinin r-z görünümünde taslağı. Piksel dedektörleri yeşil renkle gösterilirken, tek taraflı ve çift taraflı şerit modüller sırasıyla kırmızı ve mavi segmentler olarak gösterilir .....	14
Şekil 2.10	CMS ECAL'in şematik görünümü (R. M. Brown, 2007) .....	16
Şekil 2.11	HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin konumlarını gösteren r-z görünümünde Faz-1 CMS HCAL'nin dörtte birinin şematik görünümü (J Mans, 2012).....	18
Şekil 2.12	Müon odalarının konumlarını belirten mevcut CMS detektörünün uzunlamasına bir kesit görünümü .....	21
Şekil 2.13	Solda: sürüklenme tüp detektörünün sürüklenme çizgilerini ve izokronları gösteren bir hücrenin taslağı. Sağ: DT üst katmanlarının şematik görünümü (CMS Collaboration. The performance of the CMS, 2013).....	22
Şekil 2.14	Solda: anot tellerinin ve katot şeritlerinin düzenini gösteren bir CSC odasının düzeni. Sağda: CSC çalışma prensibinin bir gösterimi (CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013) .....	23

Şekil 2.15	Çift boşluklu bir RPC'nin şematik görünümü (CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013).....	24
Şekil 2.16	Sol: GEM yapısını ve çalışma prensibini gösteren şematik görünüm. Sağda: GEM'in mekanik tasarımının parçalara ayrılmış görünümü (A Colaleo, 2015).....	25
Şekil 2.17	Çalıştırma 2 sırasında CMS Düzey-1 tetikleme yapısının şeması (CMS Collaboration. Performance of the CMS, 2020).....	28
Şekil 2.18	Faz-1 CMS izleme sisteminin dörtte birinin r-z görünümünde taslağı. Piksel detektörü yeşil renkle gösterilirken, tek taraflı ve çift taraflı şerit modüller sırasıyla kırmızı ve mavi segmentler olarak gösterilir.....	34
Şekil 2.19	Faz-2 izleyici için cm <sup>2</sup> başına 1MeV nötron eşdeğerinde bütünleşmiş parçacık akışı. Gösterilen tahminler, $s = 14$ TeV pp çarpışmalarının 3000 fb <sup>-1</sup> toplam bütünleşmiş parlaklığına karşılık gelir.....	36
Şekil 2.20	r-z görünümünde izleyici düzeninin dörtte birinin taslağı. Inner Tracker'da yeşil çizgiler, iki okuma yongasından oluşan piksel modüllerine ve sarı çizgiler, dört okuma yongasına sahip piksel modüllerine karşılık gelir. Outer Tracker'da mavi ve kırmızı çizgiler, metinde açıklanan iki tür modülü temsil eder.....	37
Şekil 2.21	Hem Inner Tracker (kırmızı) hem de Outer Tracker (mavi) modülleri ve tam izleyici (siyah) dahil olmak üzere, parçacıkların geçtiği ortalama modül katmanı sayısı. Parçacık yörüngeleri, $ z_0  < 70$ mm ve çoklu saçılma dahil değildir.....	38
Şekil 2.22	p <sub>T</sub> modülü konseptinin gösterimi.....	39
Şekil 2.23	Düz bir varil düzeninde, iç varil katmanlarının kenarındaki PS modülleri, modül üstü saplama bulma için büyük bir geometrik verimsizliğe sahip olacaktır.....	41
Şekil 2.24	Çalışma 1'in bütünleşmiş parlaklığını kapsayan piksel okuma eşiğinin (solda) grafiği, 2012'de alınan veriler 6,1 fb <sup>-1</sup> 'de başlar. Diğer iki çizim, 2012'de küme boyutunun gelişimini (ortada) ve küme yükünün Landau uyumunun en olası değerini (sağda) 2012'de bütünleşmiş parlaklığın fonksiyonu olarak göstermektedir.....	45
Şekil 4.1	Boyuna görünümde orijinal dedektör düzenine kıyasla CMS Faz-1 piksel dedektörünün yerleşimi.....	49
Şekil 4.2	Faz-1 BPIX ve FPIX dedektörlerinin, okuma ve kontrol devreleri ile güç ve soğutma hatlarını tutan servis yarım silindirleri ile birlikte bir çizimi.....	49
Şekil 4.3	Küme özelliklerinin listesi.....	50
Şekil 4.4	FPIX dedektörünün şematik bir görünümü.....	52
Şekil 4.5	FPIX dedektörünün gerçek bir görünümü.....	52
Şekil 4.6	FPIX dedektörünün kenarından şematik bir görünümü.....	53
Şekil 4.7	FPIX dedektörünün tepesinden şematik bir görünümü.....	53

Şekil 4.8	BPIX dedektörünün gerçek bir görünümü .....	54
Şekil 4.9	BPIX dedektörünün renkli bir görüntüsü. Görüntüde bulunan noktalar kümeleri temsil etmektedir. Kümelerden daha büyük şekiller ise ROC'leri temsil etmektedir .....	54
Şekil 4.10	Flipped ve non-flipped durumları .....	55
Şekil 4.11	Flipped ve non-flipped durumları .....	55
Şekil 4.12	trajTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) münolar için küme yükü .....	56
Şekil 4.13	trajTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimünolar için küme yükü .....	57
Şekil 4.14	clustTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) küme yükü .....	57
Şekil 4.15	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) münolar için küme boyutu .....	58
Şekil 4.16	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimünolar için küme boyutu .....	59
Şekil 4.17	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) münolar için X-yönündeki küme boyutu .....	60
Şekil 4.18	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimünolar için X-yönündeki küme boyutu .....	60
Şekil 4.19	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) münolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	61
Şekil 4.20	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimünolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	61
Şekil 4.21	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) münolar için X-yönündeki küme boyutu .....	63
Şekil 4.22	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) antimünolar için X-yönündeki küme boyutu .....	63
Şekil 4.23	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) münolar için X-yönündeki küme boyutu .....	64
Şekil 4.24	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) antimünolar için X-yönündeki küme boyutu .....	64
Şekil 4.25	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) münolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	65
Şekil 4.26	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) antimünolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	65
Şekil 4.27	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) münolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	66
Şekil 4.28	Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) antimünolar için Y-yönündeki küme boyutu .....	66
Şekil 4.29	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) münolar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu .....	67

Şekil 4.30	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) münolar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu.....	67
Şekil 4.31	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) münolar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu.....	68
Şekil 4.32	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) münolar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu.....	68
Şekil 4.33	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimünolar için X-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu.....	69
Şekil 4.34	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimünolar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu.....	69
Şekil 4.35	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimünolar için kapsayıcı (Inclusive) küme boyutu .....	70
Şekil 4.36	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) hem münolar hem de antimünolar için X-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu .....	70
Şekil 4.37	Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) hem münolar hem de antimünolar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu .....	71
Şekil 4.38	Traj dx_cl Modül-1 ve Modül-4.....	72
Şekil 4.39	Traj dy_cl Modül-1 ve Modül-4.....	72
Şekil 4.40	Traj dr_cl Modül-1 ve Modül-4 .....	73
Şekil 4.41	Traj dx_simhit Modül-1 ve Modül-4 .....	73
Şekil 4.42	Traj dy_simhit Modül-1 ve Modül-4 .....	73
Şekil 4.43	Traj d_cl2 Modül-1 ve Modül-4.....	74
Şekil 4.44	Traj dx_cl2 Modül-1 ve Modül-4.....	74
Şekil 4.45	Traj dy_cl2 Modül-1 ve Modül-4.....	75
Şekil 4.46	Radyasyondan önce durumda Modül-1 (katman-1) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri (nC_M4<=400) .....	76
Şekil 4.47	Radyasyondan sonra durumda Modül-1 (katman-1) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri (nC_M4<=400) .....	77
Şekil 4.48	Soldan sağa doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing olmadan Run3'ün sonu, Digi Morphing ile Run3'ün sonu için küme durumları.....	77
Şekil 4.49	Radyasyondan önce durumda Modül-4 (katman-4) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri (nC_M4<=400) .....	78
Şekil 4.50	Radyasyondan sonra durumda Modül-4 (katman-4) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri (nC_M4<=400) .....	78
Şekil 4.51	Soldan sağa doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün Başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün Başlangıcı, Digi Morphing Olmadan Run3'ün Sonu, Digi Morphing ile Run3'ün Sonu için küme durumları .....	79
Şekil 4.52	Küme rekonstrüksiyonunun teknik bir görseli .....	80

Şekil 5.1 Soldan sağı doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing olmadan Run3'ün sonu, Digi Morphing ile Run3'ün sonu için küme durumları..... 82



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 İzleyicinin seçilen dedektör bölgeleri veya bileşenleri için maksimum beklenen akıcılık .....	36
Çizelge 4.1 Dört BPIX katmanı ve altı FPIX halkası için ortalama $r$ , $z$ konumlarının ve modül sayısının özeti .....	48
Çizelge 4.2 Piksel alt dedektörlerinin parametre grubu .....	51



## 1. GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcıları yüklü temel parçacık (elektron, proton, pozitron, müon vb.) demetlerini istenen kalitede oluşturan ve hedeflenen enerjilere hızlandıran donanımlardır. Çarpışmalar sonucu parçacık dedektörleri aracılığı ile toplanan veriler deneysel sonuçlara ulaşmak için analiz edilmektedir. LHC (Large Hadron Collider) dünyanın en büyük ve en güçlü parçacık hızlandırıcısı ve aynı zamanda makinesidir. Maddeyi yüksek sıcaklık ve yüksek yoğunlukta incelemek için tasarlanmıştır. Böylece Büyük Patlamadan hemen sonra oluşan plazma ortamındaki kuark-gluon birleşimleri gerçekleşebilir ve bu sayede mezon ve baryonlar oluşabilir. LHC’de çeşitli dedektörler bulunur. Bunlardan bir tanesi CMS (Compact Muon Solenoid) dedektörüdür. LHC, protonları saat yönünde ve saat yönünün tersine doğru neredeyse ışık hızına kadar hızlandırır ve daha sonra onları halkasının etrafında dört yerde çarpıştırır. Bu noktalarda parçacık çarpışmalarının enerjisi kütleye dönüşerek parçacıkları her yöne püskürtür. CMS dedektörü bu dört çarpışma noktasından birinde bulunur. Genel amaçlı bir dedektördür; yani, LHC'nin ortaya çıkarabileceği herhangi bir yeni fizik olgusunu gözlemlemek için tasarlanmıştır. CMS, her yönden saniyede 40 milyon defaya kadar parçacık çarpışmalarının 3 boyutlu "fotoğraflarını" çeken dev, yüksek hızlı bir kamera görevi görür. Çarpışmalarda üretilen parçacıkların çoğu “kararsız” olsa da hızla CMS tarafından tespit edilebilen kararlı parçacıklara dönüşürler. Dedektör, her çarpışmada üretilen (neredeyse) tüm kararlı parçacıkları tanımlayarak, onların momentumlarını ve enerjilerini ölçer ve parçacıkları tanımlayarak veri toplar ve en nihayetinde de bu veriler analiz edilerek çarpışan parçacıkların arkalarında bıraktıkları izler görüntülenir. CMS dedektöründe birden fazla ve çeşitli amaçlarda kullanılmak üzere dedektörler bulunur. Bunlardan bir tanesi izleme sisteminin kalbi denebilecek olan ve en iç noktada bulunan Piksel Dedektörüdür. Piksel dedektörü, etkileşim noktasına en yakın bölgede yüksek hassasiyetli, yüklü parçacık takibine ve tepe noktası yeniden yapılandırılmasına izin veren 3 boyutlu uzay noktaları sağlar. Piksel dedektörü, yüksek iz yoğunluğu ile karakterize edilen, özellikle zorlu bir radyasyon ortamında bulunur. Kısaca, yüklü parçacıkların izleri, CMS dedektörü içinde üretilen proton-proton etkileşimlerinden gelen tüm bozunma ürünlerinin, leptonların ve hadronik duşların yeniden yapılandırılması ve tanımlanmasında başlangıç noktalarıdır. Standart

Model Higgs bozonu ağırlıklı olarak b kuarklara bozunduğundan, bunların tanımlanması Higgs bozonunun özelliklerini incelemek için önemli bir adımdır. İzler, birincil etkileşim noktalarına göre yer değiştirmelerini ölçerek b kuarklardan kaynaklanan hadronik duşları tanımlamak için kullanılır. Pikel dedektörünün en içteki katmanının çözünürlüğü, darbe parametresinin çözünürlüğüne hakimdir. En içte bulunmasından kaynaklı olarak yüksek radyasyona maruz kalan piksel dedektörü, parçacık çarpışmalarını ilk algılayan dedektör olduğu için fazlasıyla önemlidir fakat alınan verilerin düzgün olması yapılan bu büyük deneyin sonuçları için oldukça önemlidir. Yani, radyasyon hasarı ile piksel kümelerinin kırılması, çözünürlük kaybına ve sahte parçacık izlerinin artmasına neden olacaktır. Bu nedenle, bu etkinin düzeltilmesi hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışma, parçacık fiziği deneylerinde radyasyon hasarının kümeler üzerindeki etkisini araştırmak için CERN, CMS ve Pikel detektörünün kullanımına odaklanmaktadır. İncelenen birincil parçacık türleri, yalnızca yükleri bakımından farklılık gösteren müonlar ve antimüonlardır. Bu çalışmada, bu parçacık türleri arasındaki sonuçlarda ortaya çıkan eşitsizliklerin tanımlanması amaçlandı ve bu sonuçlar esas olarak yük tutarsızlığına bağlandı. CMS deneyinin ayrılmaz bir parçası olan Pikel detektörü, parçacık izlerinin saptanmasında ve yeniden yapılandırılmasında hayati bir rol oynar. Bu araştırmada, Modül-1 ve Modül-4'ün özellikleri karşılaştırılarak özellikle Pikel dedektörünün geometrisi analiz edildi. Bu çalışmada ayrıca kümelerin yoğunlukları ile yükleri ve boyutları da incelendi. Küme yoğunluğu grafiklerinin analizi, radyasyon hasarının belirtileri olarak tanımlanan küme kırılmalarının ve kaybolmalarının açık örneklerini ortaya çıkardı. Digi Morphing tekniğinin başarılı bir şekilde uygulanması, C++ kodlarının kullanılmasıyla doğrulandı. Bu uygulamanın bilimsel katkıları önemlidir. Parçacık fiziğinde, grafiklerin doğrudan gözlemlenmesi pratik değildir ve veri analizi simülasyonlarının kullanılmasını gerektirir. Ancak, düşük kaliteli analiz görüntüleri daha az doğru sonuçlar verebilir. Bu çalışma, analiz görüntülerinin kalitesini artırarak yapılan analizlerin önemini göstermektedir. Bu iyileştirme, yeni keşifleri kolaylaştırmak ve parçacık tanımlama süreçlerini iyileştirmek için çok önemlidir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

Standart Modeldeki tüm temel parçacıklar gözlemlendi. Günümüzde parçacık fiziğinin ana odak noktası, SM parametrelerini hassas bir şekilde ölçmek ve Standart Modelin ötesinde fizik aramaktır. Bu hedefi gerçekleştirmenin iyi bir yolu, yüksek enerjili çarpışma deneyleri yapmaktır. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, insanların bu amaçla inşa ettiği en güçlü hadron çarpıştırıcısıdır ve Kompakt Muon Solenoid (CMS) deneyi, LHC'de çarpışmaların sonuçlarını inceleyen deneylerden biridir. LHC'ye genel bir bakış Bölüm 2.1'de verilmektedir ve CMS detektörü Bölüm 2.2'de açıklanmaktadır.

### 2.1 Büyük Hadron Çarpıştırıcısı

İsviçre, Cenevre yakınlarındaki CERN'de bulunan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) (Lyndon,2008), parçacık fiziği araştırmaları için dünyanın en büyük ve en güçlü makinesidir. Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı'ndan (LEP) miras kalan 26,7 km uzunluğunda dairesel bir tünele yerleştirilmiş çift halkalı bir süper iletken hadron hızlandırıcı ve çarpıştırıcıdır. LHC tüneli, yerin 45 ila 170 m arasındaki kaya tabakasında yer alır ve Cenevre Gölü kıyısından Jura dağlarının dibine kadar Fransa-İsviçre sınırı boyunca uzanır. Şekil 2.1, LHC'nin coğrafi konumunu göstermektedir. İki dizi hadron demeti, ana LHC halkasında zıt yönlerde döner ve her biri büyük bir LHC deneyine ev sahipliği yapan dört etkileşim noktasında çarpışır: ATLAS için Nokta 1, ALICE için Nokta 2, CMS için Nokta 5 ve LHCb için Nokta 8.

#### 2.1.1 LHC makinesi

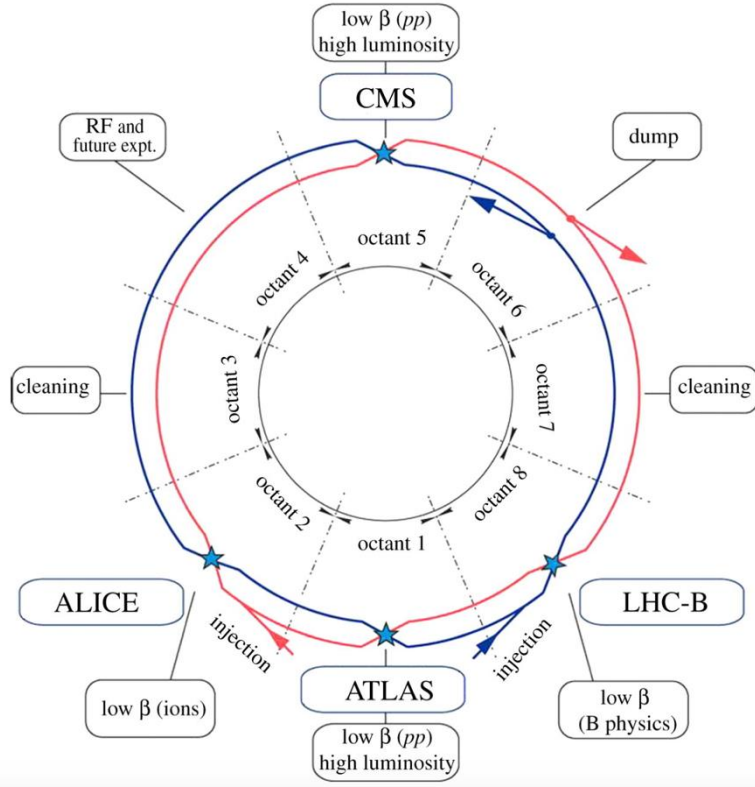
LHC tüneli sekiz yay ve sekiz düz bölümden oluşur. Yaylar, parçacıkların yörüngesini bükmek ve sıkıştırmak için binlerce mıknatıs birimini barındıran LHC çevresinin çoğunluğunu oluşturur. Düz bölümlerin her biri yaklaşık 528 m uzunluğundadır ve deneyler veya kullanım için eklemeler olarak hizmet eder. Yaylar ve düz bölümler, geometrik yerleşimi Şekil 2.2'de gösterilen, her biri bir düz bölümü ve komşu yayların iki yarısını kapsayan sekiz oktan halinde gruplandırılmıştır.



Şekil 2.1 LHC manzarasının havadan görünümü. Fransa-İsviçre sınırı sarı çizgiyle gösterilir ve LHC tünelleri beyazla gösterilir. Resimde ATLAS'ın hemen altındaki üçgen bina kompleksi, CERN'in ana kampüsüdür

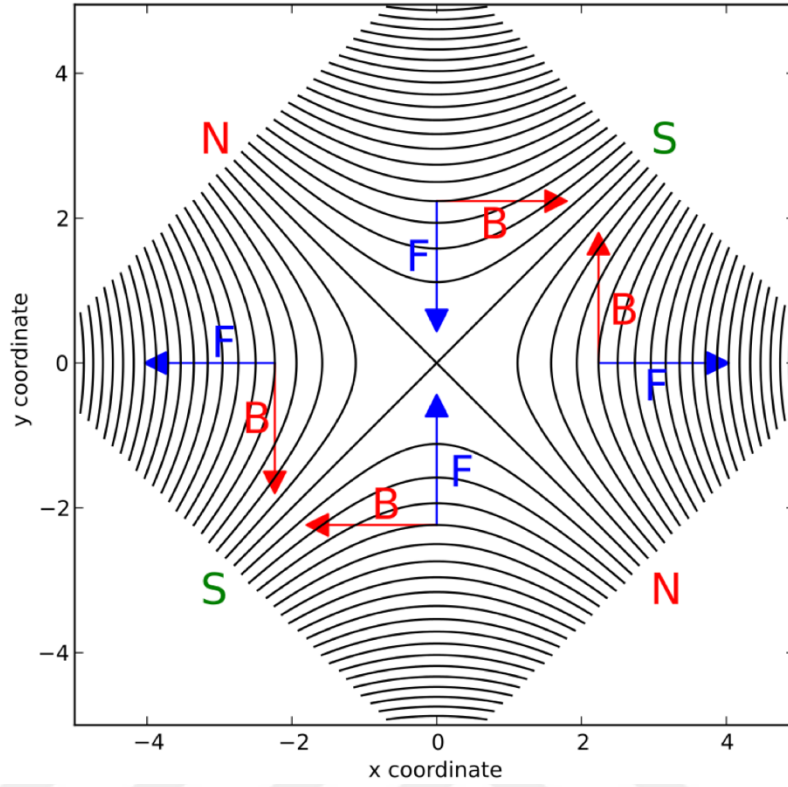
Güçlü mıknatıslar, yüksek enerjili hadronların LHC'de dolaşmasına ve çarpışmasına rehberlik eden şeydir. LHC mıknatıs sistemi, süperakışkan helyumla 1,9 K sıcaklığa soğutulan, kabloların süperiletken kaldığı ve kritik alan güçlerine kadar bir manyetik alan oluşturduğu Nb-Ti kablolarına dayanır. LHC mıknatıslarının maksimum çalışabilir manyetik alanı 8,33 T'dir, bu da 7 TeV'lik bir proton ışın enerjisine veya nükleon başına 2,76 TeV'lik bir ağır iyon ışın enerjisine karşılık gelir.

LHC mıknatıs sistemi (Lyndon,2008), 1232 ana çift kutuplu mıknatıs, yaklaşık 450 dört kutuplu mıknatıs, birkaç bin çok kutuplu düzeltici mıknatıs ve sekiz yerleştirme noktasında birkaç özel mıknatıs tipinden oluşur. Dipoller, kirişleri LHC tüneline dolaşacak şekilde bükür. Her iki ışın da pozitif yüklü olduğundan ancak zıt yönlerde hareket ettiğinden, iki ışın için manyetik alanların da zıt olması gerekir. Tüneldeki alan sınırlaması ve bütçeyi düşük tutma ihtiyacı göz önüne alındığında, iki kiriş borusunun ve iki set mıknatıs bobininin aynı mekanik parçada yan yana monte edildiği "çift delikli" bir tasarım benimsenmiştir ve adına soğuk kütle denir.



Şekil 2.2 LHC'nin şematik düzeni. Her oktant bir ekleme noktası içerir. 1, 2, 5 ve 8 numaralı noktalar, çarpışma deneylerinin yerleridir. 3. ve 7. noktalar ışın kolimasyonu içindir. Hadronlar 1. ve 8. Noktalara enjekte edilir, 4. Noktada hızlandırılır ve sonunda 6. Noktada atılır (Lyndon,2008)

Soğuk kütle, merkezinde delinmiş ve süperakışkan bir helyum kabı ile çevrelenmiş silindirik bir katı demir yapıdır. Her bir soğuk kütlein uzunluğu yaklaşık 15 m, çapı yaklaşık 570 mm ve kütlesi yaklaşık 27,5 tondur. Mıknatıs bobinleri için kararlı bir 1,9 K ortamı sağlar ve bu arada manyetik boyunduruk görevi görür.



Şekil 2.3 İdeal bir dört kutuplunun manyetik alanı

LHC'nin dipolleri, yüksek bir hassasiyetle aynı şekilde üretilir. Manyetik alan gücündeki ve alan homojensizliğindeki göreceli değişim  $10^{-4}$ 'ü geçmemelidir. Dört kutuplular, ışını bir yönde sıkıştıran ve diğer yönde dağıtan gradyan alanları (Şekil 2.3'te gösterilmiştir) sağlar. Belirli alan geometrisine sahip seri haldeki birkaç dört kutup, ışınları odaklayabilir veya odaktan çıkarabilir. Işınların ışın borularında dağılmasını önler, çarpışmalardan önce ışınları yüksek yoğunluğa odaklar ve çarpışmalardan sonra odaklarını bozarlar. Dört kutuplular ayrıca her biri yaklaşık 3,1 m uzunluğunda ikiz delikli soğuk kütleler halinde konuşlanmıştır. Işın parametrelerinde ince ayar yapılmasına yardımcı olan ana dipollerin ve dörtlü kutupların bileşenleri olarak birkaç küçük ölçekli çok kutuplu düzeltici türü kurulur. Yerleştirme mıknatısları çeşitli amaçlara hizmet eder: ışın parametrelerini her özel deneyin ihtiyaçlarına göre ayarlamak veya enjeksiyon veya kurtaj için ışının yönünü aniden değiştirmek. Yerleştirme mıknatıslarının çoğu Nb-Ti süper iletkenlerine dayanırken, radyasyon alanlarında bazıları normal iletken malzemeden yapılmıştır. Bu çeşitli mıknatıslardaki elektrik akımları 60 A (küçük düzelticiler için) ile 12 kA (ana dipoller ve dört kutuplar

için) arasında değişirken, LHC'nin tam çalışması sırasında mıknatıslarda depolanan toplam enerji yaklaşık 10 GJ'dir.

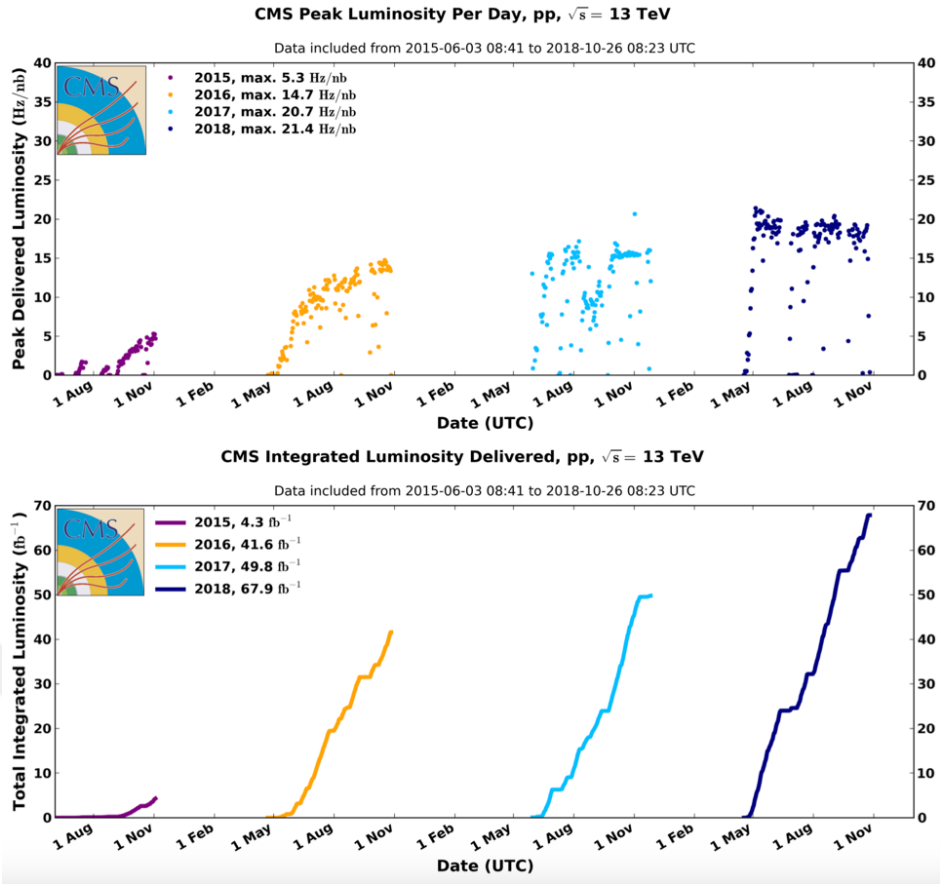
### 2.1.2 Çarpışmaların parlaklığı

LHC'de, protonlar her ışında demetler halinde kümelenir. İki ışın zıt yönlerde dolaşır ve çok yüksek bir oranda birbirini keser. Demet geçişlerinde belirli bir fizik değerlendirilir. Kesit birimi Barn'ı ( $b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ) alır ve belirli bir fizik işleminin belirli bir çarpışma enerjisi altında gerçekleşme olasılığını temsil ederken, anlık parlaklık birimi  $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'i alır. Anlık parlaklık şu şekilde parametrelendirilir:

$$L = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} F \quad (2.1)$$

Burada  $f$ , LHC'de nominal değeri 40 MHz olan demet geçiş frekansıdır ve  $N$ , nominal demetler için  $1 \times 10^{11}$  mertebesinde olan her demetteki proton sayısıdır.  $4\pi\sigma_x\sigma_y$  terimi, giriş kesitinin etkin alanını ölçer; buradaki  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$ , 10  $\mu\text{m}$  mertebesinde nominal değerlere sahip girişin Gauss genişlikleridir. Ek faktör  $F$ , 1'e yakındır. Girişler tam olarak kafa kafaya değil, küçük bir geçiş açısıyla çarpıştığı için geometrik bir düzeltme yapar.

Anlık parlaklık, bir çarpışma deneyleri periyodu boyunca bütünleşmiş parlaklığa toplanır. LHC'de bir önceki veri alma dönemi 2015'ten 2018'e kadar uzanıyordu ve LHC Run 2 olarak bilinmektedir. Şekil 2.4, Run 2 sırasında LHC tarafından sağlanan anlık ve bütünleşmiş parlaklığı göstermektedir.



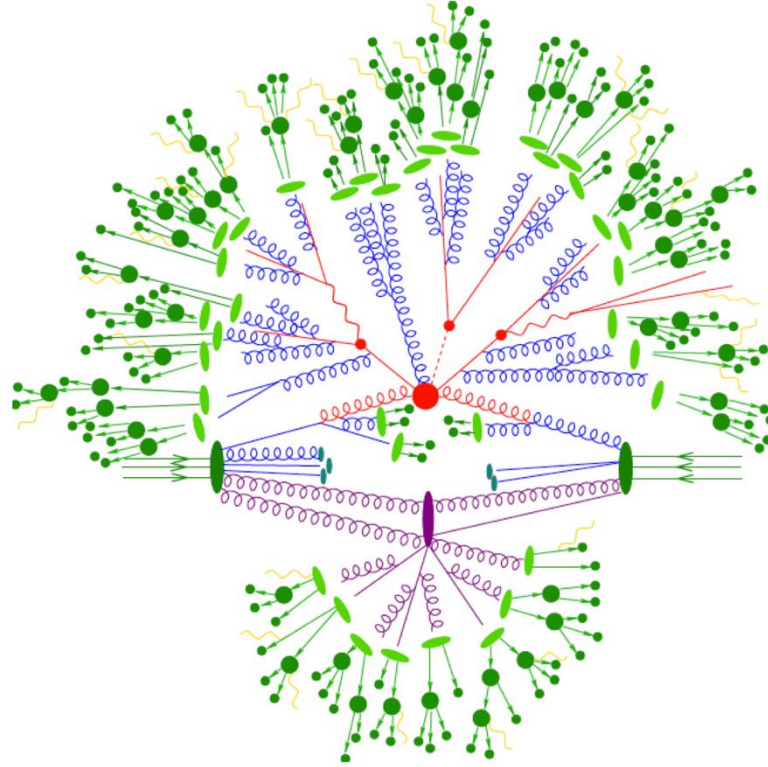
Şekil 2.4 LHC Run 2 (2015-2018) pp çarpışmalarının en yüksek anlık parlaklığının (üstteki grafik) ve kümülatif bütünleşmiş parlaklığının (alttaki grafik) evrimleri

Genel olarak LHC, 2016, 2017 ve 2018 yıllarında CMS'e sırasıyla  $41,0 \text{ fb}^{-1}$ ,  $49,8 \text{ fb}^{-1}$  ve  $67,9 \text{ fb}^{-1}$  çarpışma verisi sağladı. Bu verilerin bir kısmı CMS tarafından kaydedilmez, ancak fizik analizleri için iyi değildir, çünkü bazı dedektör bileşenleri çalışma koşullarında olmayabilir. Fizik analizleri için iyi olan veri kümeleri, üç yıl için  $35,9 \text{ fb}^{-1}$ ,  $41,5 \text{ fb}^{-1}$  ve  $59,7 \text{ fb}^{-1}$  'dir ve toplamda yaklaşık  $137 \text{ fb}^{-1}$  'dir. 2015 yılı veri seti diğer yıllara göre çok daha küçüktür. Genel istatistiklere çok az katkıda bulunur, ancak kalibre edilmesi ve analiz edilmesi çok maliyetlidir.

### 2.1.3 Proton çarpışma ortamı

LHC'deki proton-proton (pp) çarpışmaları, geniş bir enerji spektrumu üzerinde çok çeşitli süreçleri başlatarak, genel amaçlı çalışmalar ve yeni fenomen araştırmaları için ideal bir araç haline gelir. Protonlardaki birlikte partonlar olarak adlandırılan kuarklar

ve gluonlar, sırasıyla hadronize olan ve yüksek çeşitlilikte çeşitli hadronlar oluşturan bir dizi kuark ve gluonun üretildiği QCD süreçlerini başlatabilir. Kuarklar ayrıca elektrozayıf etkileşime katılarak leptonlara dönüşebilen ayar bozonları üretirler. Higgs bozonu kuarklardan ve ayar bozonlarından da üretilebilir. Proton çarpışma deneyleri de yüksek enerji ve yüksek parlaklığa ulaşmanın harika bir yoludur. Lepton veya antiproton içeren diğer deneysel seçeneklerle karşılaştırıldığında, protonları elde etmek (antiprotonlardan) ve hızlandırmak (leptonlardan) daha kolaydır.



Şekil 2.5 Bir pp çarpışmasındaki etkileşimlerin bir örneği. Bu örnekteki birincil etkileşim, Feynman diyagramı bir üst kuark çifti ile bağlantılı Higgs bozonu üretimidir (T. Gleisberg, 2009)

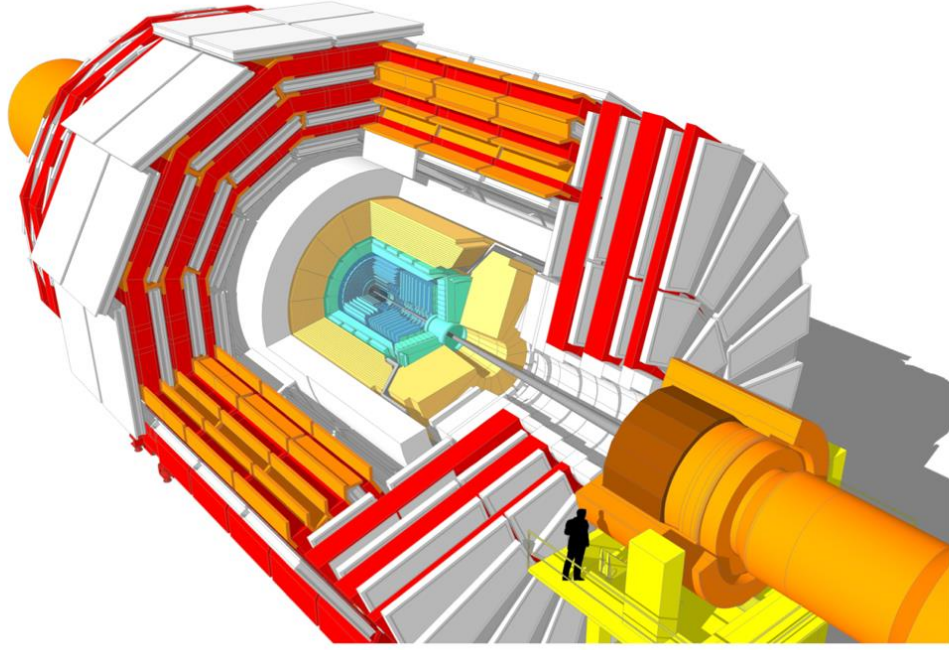
Bu arada, proton çarpışmaları son derece gürültülü bir ortamdır. Şekil 2.5, enerjik bir pp saçılım örneğinde başlatılan etkileşimlerin bir örneğini göstermektedir. Bu örnekteki birincil etkileşim, bir üst kuark çifti (ttH) ile ilişkili Higgs bozonunun üretilmesidir; burada ilmekli kırmızı çizgiler gelen gluonları temsil eder, büyük kırmızı damla birincil etkileşimin tepe noktasıdır ve küçük kırmızı lekeler, Higgs bozonunun (kırmızı kesikli çizgi) ve üst (ve antitop) kuarkların bozunma köşeleridir. Ek QCD radyasyonları,

hadronizasyona uğrayan (açık yeşil lekeler) ve hadronlar (koyu yeşil lekeler) oluşturan döngüsel mavi çizgilerle gösterilir. Bu örnekteki etkileşime, QCD süreçleri yoluyla bir grup hadron üreten daha yumuşak bir ikincil etkileşim (mor damla) eşlik eder. Son olarak, son durum hadronlarından ve leptonlardan fotonlar (kıvrımlı sarı çizgiler) yayılabilir.

Ayrıca, LHC'de kesişen her proton demetinde çoklu pp çarpışmaları meydana gelir. Dedektörler, aynı demet geçişindeki eşzamanlı çarpışmaların yanı sıra zamanlamadaki enstrümantal hatalar nedeniyle diğer demet geçişlerindeki çarpışmalardan gelen, yığın olarak bilinen, aynı anda birkaç çarpışmadan sinyaller alır. Çoğu durumda, bu çarpışmaların tümü QCD etkileşimleridir, bazen çarpışmalardan biri fizikçiler için ilginç süreçlere yol açan sert bir dağılımdır. Bu durumlarda, sert saçılımı içeren çarpışma birincil etkileşim olarak kabul edilir ve diğer çarpışmalara yığılma etkileşimleri denir. Birincil etkileşim içinde, ilgili süreç, örneğin Şekil 2.5'teki ttH süreci hızlı etkileşim olarak adlandırılırken, diğer QCD kaynaklı yan ürünler temel olay olarak adlandırılır.

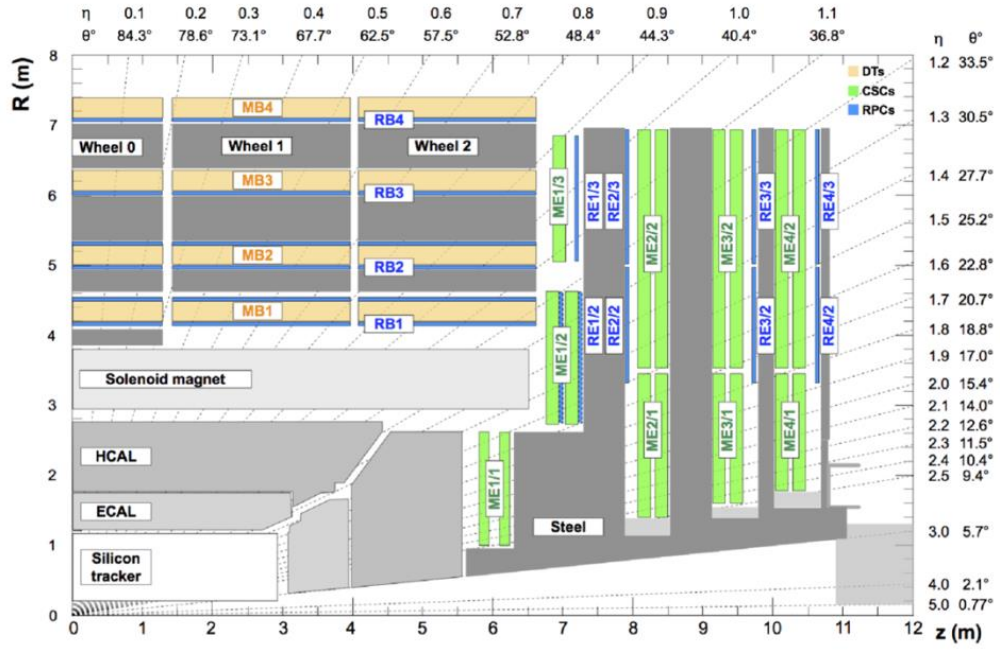
## 2.2 Kompakt Müon Solenoid Deneyi

Kompakt Muon Solenoid (CMS), LHC'nin çarpışma bölgelerinden birinde çalışan genel amaçlı bir dedektördür. Adımı, çekirdeğinde manyetik alan sağlayan ve çeşitli çarpışma ürünlerinin hassas ölçümlerini sağlayan geniş çaplı süper iletken solenoid mıknatısından almıştır. CMS dedektörünün toplam uzunluğu 28,7 m, çapı 15,0 m ve kütlesi 14000 tondur. CMS'nin bir kesit diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmektedir. İçeriden dışarıya silikon tabanlı bir izleme sistemi (şekilde mavi dilimler), bir kurşun tungstat kristal elektromanyetik kalorimetre (ECAL) (mavi bloklar), bir pirinç sintilatör hadron kalorimetre (HCAL) (sarı bloklar), bir süper iletken solenoid (beyaz bloklar) ve birçok katmanlı müon dedektörü (beyaz paneller) ile serpiştirilmiş bir demir dönüş boyunduruğu (kırmızı bloklar) içerir. Bu dedektör bileşenleri, Bölüm 2.2.1 ile 2.2.4'te ayrı ayrı açıklanmıştır. Ek olarak, CMS'nin veri toplaması, Bölüm 2.2.5'te açıklanan bir tetikleme sistemine dayanır.



Şekil 2.6 CMS dedektörünün bir kesit diyagramı. Tasarım, Faz-1 dedektör yükseltmesi adı verilen bir tasarım aşamasına göre belirlenir (Tai Sakuma, 2019)

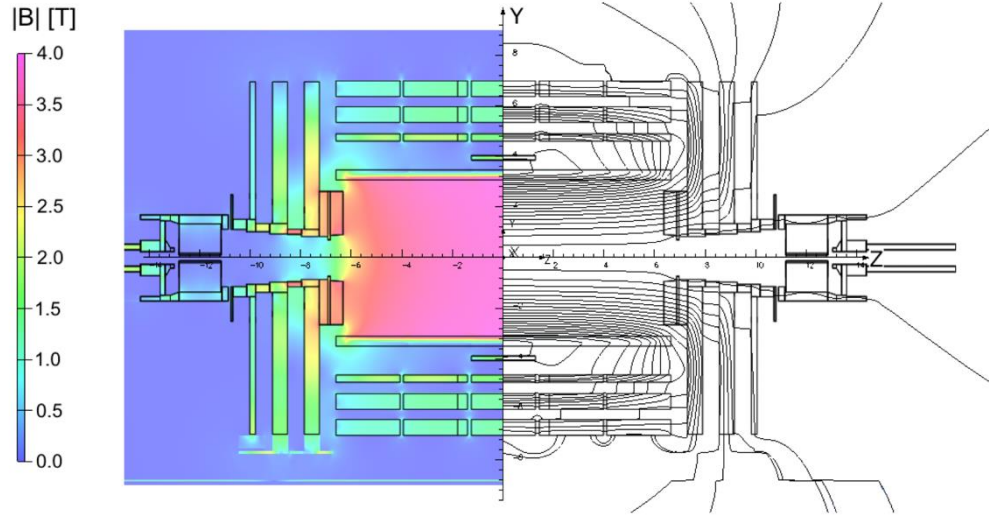
CMS, silindirik bir koordinat kuralını benimser: orijin, çarpışmaların olması beklenen CMS'nin geometrik merkezinde konumlandırılır; z eksenini, pozitif yönü Jura dağlarını gösterecek şekilde giriş borusu boyuncadır;  $\phi = 0$  yönü (veya Kartezyen koordinatların x eksenini) yatay olarak LHC halka merkezini gösterir; bu, kartezyen koordinatların y eksenini gökyüzüne doğru yukarı bakacak şekilde bırakır. Ek olarak, çoğu durumda kutup açısı  $\theta$ ,  $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$  olarak tanımlanan, sözde hızlilik  $\eta$  adlı bir değişkenle değiştirilir. Sözde hız,  $|\mathbf{p}| \gg m$ . CMS koordinatları,  $\eta - \theta$  karşılıkları ile Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 CMS dedektörünün CMS koordinatları ile ızgaralanmış uzunlamasına bir kesit görünümü (CMS Collaboration. Performance of the CMS, 2018)

### 2.2.1 Solenoid mıknatıs

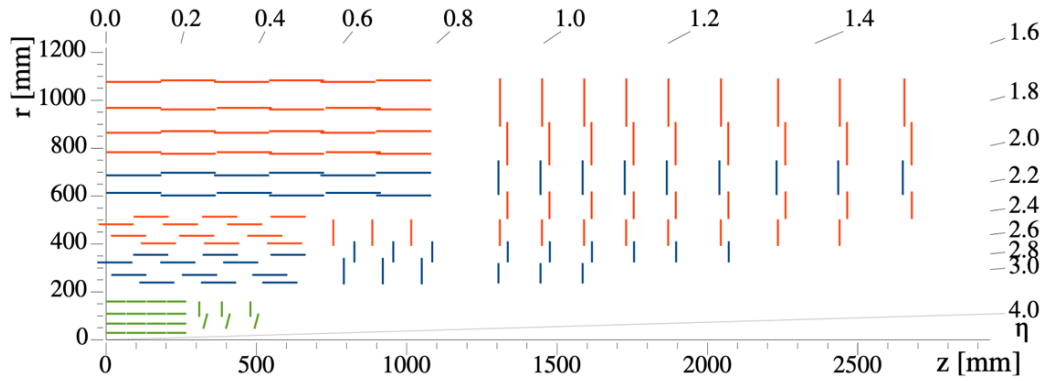
CMS'nin solenoid mıknatısı (CMS Collaboration. The CMS Experiment, 2008), yine 1,9 K'de çalışan LHC mıknatıslarıyla aynı malzemeye dayalıdır. Tam çalışması sırasında, süper iletken bobin 18500 A elektrik akımı taşır ve 2,6 GJ enerji depolar. 6 m çapında ve 12,5 m uzunluğundaki oyuğunun içinde homojen bir 3,8 T alanı oluşturarak içine monte edilen dedektör bileşenlerinin çalışma ortamını sağlar. Süper iletken bobin, yaklaşık 12000 ton, yani Eyfel Kulesi'ndekinin neredeyse iki katı olan, CMS dedektörünün en ağır parçası olan demir boyunduruğu tarafından çevrelenmiştir. Demir boyunduruk, manyetik alanı bobinin dışına yönlendirir ve bu arada diğer tüm CMS dedektör bileşenleri için destekleyici çerçeve görevi görür. Şekil 2.8, CMS'nin çalışma manyetik alanını göstermektedir.



Şekil 2.8 CMS'deki manyetik alan, 3,8 T'lik bir merkezi alan gücüyle çalışan, uzunlamasına bir kesitte görüntülenir. Alan değeri  $|B|$  solda gösterilir ve alan çizgileri sağda gösterilir (CMS Collaboration, 2010)

### 2.2.2 Silikon izleyici

CMS dahili izleyici (CMS Collaboration. The CMS Experiment, 2008), LHC çarpışmalarından çıkan yüklü parçacıkların yörüngelerinin kesin ve verimli bir ölçümünü sağlamak için tasarlanmıştır. Şekil 2-9'da gösterilen giriş borusunu çevreleyen 5,8 m uzunluğunda ve 2,5 m çapında silindirik bir hacme yerleştirilmiştir. 2,9 cm, 6,8 cm, 10,9 cm ve 16,0 cm yarıçaplarında dört varil katmanlı bir piksel dedektörü ve 1,1 m (CMS Collaboration. The CMS Experiment, 2008) yarıçapa kadar uzanan 4 + 6 varil katmanlı bir silikon şerit dedektörden oluşur. Her sistem, piksel dedektöründe üç disk ve şerit dedektöründe 3 + 9 diskten oluşan uç kapaklarla tamamlanır. CMS izleyici, toplamda yaklaşık 124 milyon piksel kanalına ve yaklaşık 9,3 milyon şerit kanalına sahiptir ve  $|\eta| < 2.5$ .



Şekil 2.9 Faz-1 CMS izleme sisteminin dörtte birinin r-z görünümünde taslağı. Piksel dedektörleri yeşil renkle gösterilirken, tek taraflı ve çift taraflı şerit modüller sırasıyla kırmızı ve mavi segmentler olarak gösterilir

Piksel algılayıcıda standart piksel boyutu 285  $\mu\text{m}$  kalınlıkta  $\phi \times z$  düzleminde  $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ 'dir. Nominal LHC parlaklığında, her demet geçişinde yaklaşık 1000 yüklü parçacık üretilir; bu, demet geçişi başına piksel başına  $10^{-4}$  mertebesinde bir isabet doluluğuna karşılık gelir.

Çalışırken, yüklü bir parçacık genellikle birkaç komşu pikselde, yük paylaşımı olarak bilinen sinyaller üretir. Piksel sistemi, komşu pikseller arasında enterpolasyon sağlayan ve 15-20  $\mu\text{m}$  aralığında bir uzamsal çözünürlüğe ulaşan analog darbe yüksekliği okuması ile okur.

Şerit dedektör, her ikisi de silikon mikro şerit dedektörlerden oluşan iç bölge ( $20 \text{ cm} < r < 55 \text{ cm}$ ) ve dış bölge ( $55 \text{ cm} < r < 110 \text{ cm}$ ) olmak üzere iki bölgede iki alt sistemden oluşur. İç bölgedeki tipik bir mikro şerit hücresinin kalınlığı 320  $\mu\text{m}$  ve boyutu  $10 \text{ cm} \times 80 \mu\text{m}$ 'dir, bu da LHC demet geçişi başına şerit başına %2-3'e varan bir doluluğa yol açar. Dış bölgedeki mikro şerit hücreler, daha büyük yarıçaplar ve azaltılmış parçacık yoğunluğu göz önüne alındığında, boyut olarak daha büyüktür: kalınlık olarak 500  $\mu\text{m}$  ve yaklaşık  $25 \text{ cm} \times 180 \mu\text{m}$  boyutunda ve yaklaşık %1 doluluğa karşılık geliyor. Yük paylaşımının enterpolasyonundan sonra şerit hücrelerin uzamsal çözünürlüğü, iç varil katmanlarında 23-35  $\mu\text{m}$  ve dış varil katmanlarında 35-53  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir.

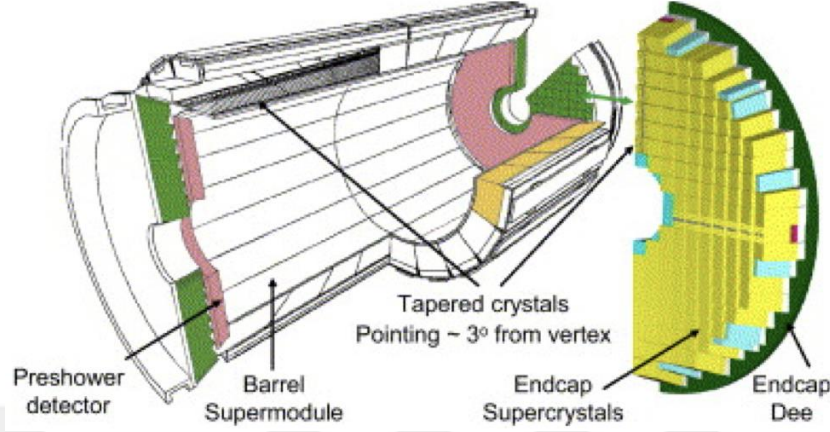
Tüm şerit hücreler, namludaki giriş borusuna paralel ve radyal boyunca yerleştirilir. Şerit uzunluğu boyunca koordinatın bir ölçümünü sağlamak için (z varilde ve r uç kapaklarda), şerit dedektörün bazı katmanları, içine ikinci bir mikro şerit dedektör modülünün arkaya monte edildiği çift şeritli bir tasarımla oluşturulur (100 mrad'lık bir stereo açıyla her orijinal şerit modülüne arka arkaya). Bu ölçüm, iç namluda 230 µm ve dış namluda 530 µm çözünürlüğe ulaşırken, uç kapaklı disklerde çözünürlük isabet konumuna bağlı olarak değişir.

Çok sayıda silikon sensörden ve bunların okuma sisteminden oluşan izleme sisteminin tamamı yaklaşık 60 kW elektrik gücü tüketir ve bu da izleyici hacminde ısı olarak dağılır. -10 °C çalışma sıcaklığını korumak için, piksel katmanlarının alüminyum iletken tüplerle soğutulduğu ve şerit katmanların sürekli C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> sıvı akışıyla soğutulduğu bir soğutma sistemi oluşturulmuştur.

### 2.2.3 Kalorimetreler

İzleyici, yüklü parçacıklar üzerinde yüksek hassasiyetli ölçümler sağlar ancak parçacık türlerini doğrudan söylemez. Fotonlar ve nötr hadronlar gibi sayısız nötr parçacık hakkında da bilgi almaz. Kalorimetreler, çoğu parçacık türünü emmek ve üzerlerinde enerji ölçümleri sağlamak için izleyicinin dışına yerleştirilmiştir. Fotonlar ve elektronlar, madde ile öncelikle fotonların elektron-pozitron çiftlerine dönüştüğü, elektronların (ve pozitronların) bremsstrahlung fotonları yaydığı elektromanyetik etkileşim yoluyla etkileşime girer. Sonuç olarak, kalın malzemeye gelen bir foton veya elektron, elektromanyetik duş adı verilen bir foton ve elektron kaskadına dönüşür. Benzer şekilde hadronlar, yoğun malzeme olması durumunda hadron yağmuru adı verilen bir hadron kaskadı oluşturan çoklu ikincil hadronların üretildiği güçlü etkileşim yoluyla madde içindeki çekirdeklerle birincil olarak etkileşime girer. Elektromanyetik duşların ve hadronik duşların uzamsal gelişmeleri, sırasıyla radyasyon uzunluğu ( $X_0$ ) ve nükleer etkileşim uzunluğu ( $\lambda_I$ ) ile karakterize edilir. CMS, bu iki duş tipini başlatmak ve karşılık gelen parçacık türlerinin enerjilerini ölçmek için bir elektromanyetik kalorimetre (ECAL) ve bir hadronik kalorimetre (HCAL) (CMS Collaboration. The

CMS Experiment, 2008 ve J Mans, 2012) içerir.  $X_0$  genel olarak  $\lambda_1$ 'dan çok daha küçüktür, bu nedenle ECAL in, HCAL'in içine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.10 CMS ECAL'in şematik görünümü (R. M. Brown, 2007)

ECAL, 61200'ü namlu kısmına monte edilmiş ve 7324'ü iki uç kapağın her birine monte edilmiş 75848 kurşun tungstat ( $PbWO_4$ ) kristalinden yapılmış hermetik homojen bir kalorimetredir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, izleyiciyi çevreleyen silindirik bir hacim içine yerleştirilmiştir. ECAL'nin (EB) namlu kısmı, yalancı hız aralığını kapsar.

$|\eta| < 1,479$ ,  $\phi$ 'de 360 kat ve  $\eta$ 'de  $2 \times 85$  kat granülerliktedir. Tam olarak çarpışma bölgesine doğru değil hem  $\phi$  hem de  $\eta$  izdüşümlerinde  $3^\circ$ 'lik küçük bir açıyla monte edilirler. Bu, potansiyel parçacık yörüngeleriyle hizalanan ve kör bölgeler oluşturan modüller arası çatlakları önler. Kristallerin ön yüzleri 1,29 m yarıçapındadır. Her bir varil kristal ön yüzde  $22 \times 22 \text{ mm}^2$ , arka yüzde  $26 \times 26 \text{ mm}^2$  kesite ve 230 mm (25.8X0) uzunluğa sahiptir.  $PbWO_4$ 'ün yoğunluğu  $8,28 \text{ g/cm}^3$ 'tür ve toplam fiçı kristalleri 67,4 ton ağırlığındadır. Uç kapak ECAL (EE),  $1,479 < |\eta| < 3,0$ , kristallerin ön yüzleri uzunlamasına yönde çarpışma bölgesinden 315,4 cm uzakta. Uç kapak kristalleri, ön yüzde  $28,62 \times 28,62 \text{ mm}^2$  ve arka yüzde  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  kesit ve 220 mm (24,7X0) uzunluk ile aynı şekle sahiptir. Kristaller, dikdörtgen bir x-y ızgarasında düzenlenmiş  $5 \times 5$  kristalden oluşan mekanik birimler halinde gruplandırılmıştır. Tüm kristaller, çarpışma bölgesinin 1300 mm ötesinde bir odağa işaret eder, böylece modüller arası çatlaklar

2° – 8° yönlerden çarpışma bölgesine doğru eğimli. Her uç kapak, her biri 138 standart 5×5 birim ve iç ve dış çevrelerde 18 kısmi birim içeren Dees adı verilen 2 yarım daireye bölünmüştür. İki kapak birlikte 24,0 ton ağırlığındadır.

PbWO<sub>4</sub>, içinden geçen elektronlar ve fotonlar tarafından uyarıldığında 420-430 nm dalga boyunda parıldayan optik olarak şeffaf bir malzemedir. Kristaller, sintilasyon dalga boyu çevresinde  $n = 2.29$ 'luk bir kırılma indeksine sahiptir ve optik olarak birbirlerinden izole edilmiştir. Fotonlar, kristalde tam bir iç yansımaya maruz kalır ve kristalin arka yüzüne yerleştirilmiş fotodedektör tarafından toplanır. Kristaller tarafından yayılan sintilasyon fotonlarının sayısı ve fotodetektörlerin amplifikasyonu sıcaklığa bağlıdır. İstikrarlı bir ECAL performansını sürdürmek için, ECAL'nin çalışma sıcaklığı, alüminyum ızgaralar aracılığıyla kristallere ve elektroniğe termal olarak bağlanan 18°C'lik sabit su akışlarıyla tam olarak  $18 \pm 0,05^\circ\text{C}$  içinde tutulur.

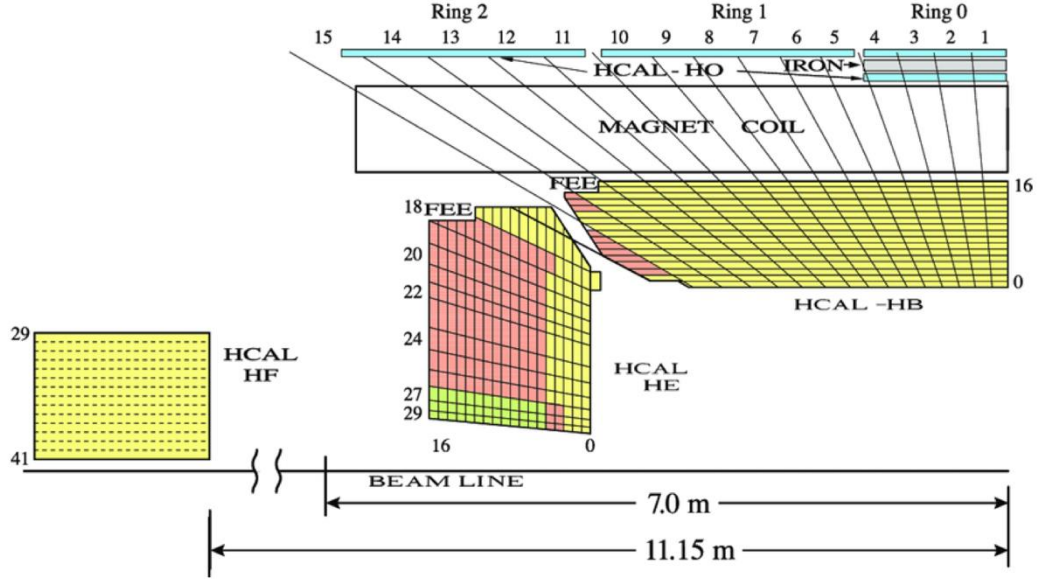
ECAL çözünürlüğü birkaç faktörden etkilenir: düş muhafazasındaki, fotoistatistikteki ve partikül yörüngesi boyunca önceki dedektör malzemesi tarafından emilen enerjideki stokastik dalgalanma; elektronikteki ve yığılma etkileşimlerinden kaynaklanan gürültüler ve kristal düzensizliğindeki ve detektör kalibrasyonundaki sabit hata. Genel olarak, çözünürlük yanıtı şu şekilde parametrize edilebilir:

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{S}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{N}{E}\right)^2 + C^2 \quad (2.2)$$

Burada  $\sigma$  çözünürlük, E depolanan enerji, S %2,8 ampirik değere sahip stokastik terim, N %12 ampirik değere sahip gürültü terimi ve C %0,3 ampirik değere sahip sabit terimdir.

Kristallere ek olarak, her bir ECAL uç kapağının önüne bir düş öncesi detektörü yerleştirilmiştir.  $1,653 < |\eta| < 2,6$ , iki kat kurşun radyatör + silikon şerit sensör kompozitinden oluşur. Kurşun radyatör, gelen fotonlardan ve elektronlardan elektromanyetik duşlar başlatır ve şerit sensörler, düş enerjisini emmeden ölçer. Her bir şerit 1,9 mm genişliğindedir ve iki katmandaki şerit yönelimi ortogonaldir. Bu, kristallerden çok daha iyi bir uzamsal çözünürlük sağlar ve nötr pionların bozunmasıyla

üretileen eşdoğrusal foton çiftlerinden tek fotonların tanımlanmasını önemli ölçüde geliştirir.



Şekil 2.11 HB, HE, HO ve HF kalorimetrelerinin konumlarını gösteren r-z görünümünde Faz-1 CMS HCAL'nin dörtte birinin şematik görünümü (J Mans, 2012)

HCAL, pp çarpışmalarında üretilen hadronları emmek ve ölçmek için tasarlanmıştır. Dört ana bölümden oluşur: EB'nin dış uzantısı ( $R = 1,77$  m'de) ile mıknatıs bobininin iç uzantısı ( $R = 2,95$  m'de) arasına yerleştirilmiş bir varil kalorimetre (HB), iki uç kapaklı kalorimetre (HE) ) EE'nin arkası ( $z = \pm 3,9$  m'de) ile birinci uç başlıklı müon istasyonunun önü ( $z = \pm 5,6$  m'de) arasına yerleştirilmiş, HB'yi tamamlayan solenoidin dışına monte edilmiş bir dış kalorimetre (HO), ve ışın borusu çevresinde  $z = \pm 11,2$  m'de son uç kapak müon istasyonunun dışında iki ileri ileri kalorimetre (HF). Bu HCAL bileşenlerinin düzeni Şekil 2-11'de gösterilmektedir. HB ve HO,  $|\eta| < 1,3$ , HE  $1,3 < |\eta| < 3,0$  ve HF  $3,0 < |\eta| < 5,2$ .

HB, her biri  $\phi$ 'de 4 sektöre ve  $\eta$ 'de 16 sektöre bölünmüş 36 özdeş azimut kamasından oluşur. Takozlar, her biri 40-75 mm kalınlığında, kiriş eksenine paralel dizilmiş 16 adet düz soğurucu plakadan yapılmıştır. Ön ve arka plakalar paslanmaz çelikten, aradaki diğer 14 plaka ise pirinçten yapılmıştır. Toplam soğurucu kalınlığı,  $\eta$ 'ye bağlı olarak 5,4 ila  $10,3 \lambda_I$  arasında değişir ve öndeki ECAL yaklaşık  $1,1 \lambda_I$  malzeme daha ekler.

Hadronik enerji birikintileri, soğurucu plakalar arasına (ön ve arka yüzeyler dahil) yerleştirilen 17 sintilatör tabakası tarafından örneklenir. Sintilatör malzemesi, ışığı yönlendirmek için gömülü optik fiberlerle Kuraray SCSN81 olarak adlandırılır. En dıştaki iki sintilatör tabakası 9 mm, diğer tabakalar ise 3,7 mm kalınlığındadır. HE, yaklaşık  $10 \lambda_I$  kalınlığa ulaşan 17 araya giren 79 mm pirinç plaka ve 3,7 mm SCSN81 sintilatör ile benzer bir tasarımla yapılmıştır. 36 azimut kamasından oluşur, her biri  $1.3 < |\eta| < 1.6$  ve  $9$  arası  $1.6 < |\eta| < 3.0$ .

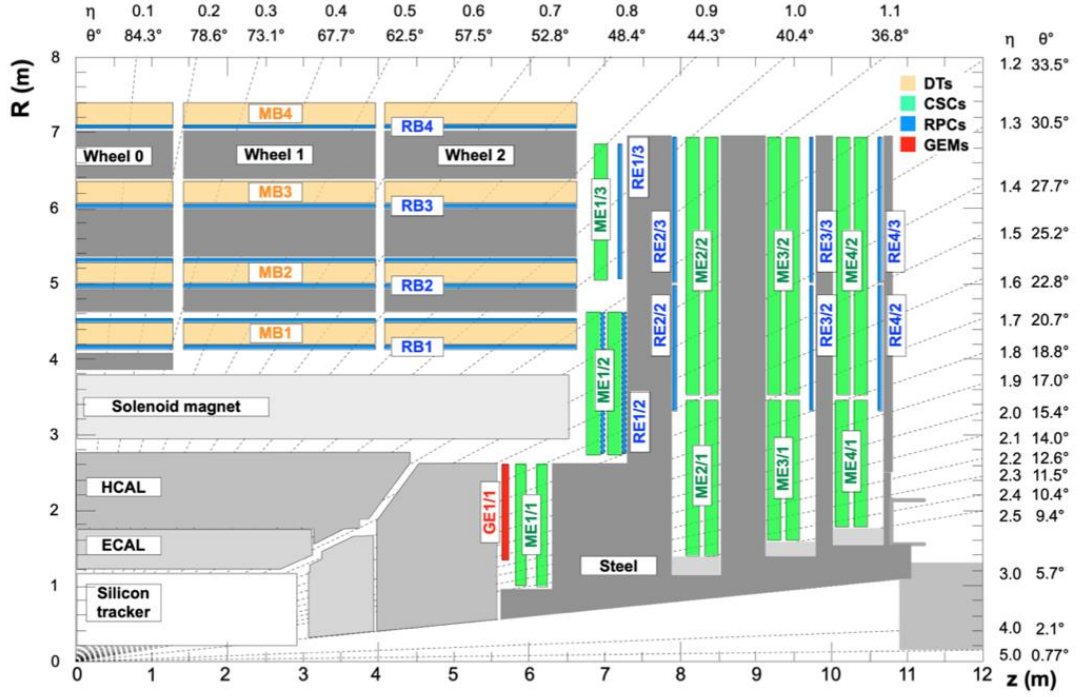
HB'nin sınırlı kalınlığına bir tamamlayıcı olarak HO, solenoid bobinin dışında yer alır ve bu da HO'dan önce yaklaşık  $1.4/\sin\theta$  etkileşim uzunluğu ekler. HO, müon sistemi ile geometrik olarak hizalanmıştır ve z eksenini boyunca 2.536 m genişliğinde beş halkaya sahiptir. Her halka,  $r = 4.07$  m'de tek katmanlı bir sintilatöre sahiptir. Özellikle, HB,  $\eta=0$  yakınında minimum soğurucu derinliğine sahiptir, bu nedenle merkezi halkada iki sintilatör tabakası vardır.

$r = 3,82$  m ve  $4,07$  m,  $19,5$  cm kalınlığında ek bir demir parçasını sıkıştırma. HO halkaları  $12$  özdeş  $\phi$  sektöre bölünmüştür ve her sektör ayrıca  $6$  dilime bölünmüştür. Her bir dilim sırayla,  $0$  halkasında  $8$  bölüm,  $\pm 1$  halkalarında  $6$  bölüm ve  $\pm 2$  halkalarında  $5$  bölüm olmak üzere,  $\eta$  boyunca döşemeler adı verilen temel birimlere bölünür. HF genel olarak, giriş borusunu yerleştirmek için  $130,0$  cm'lik bir dış yarıçapa ve  $12,5$  cm'lik bir iç delik yarıçapına sahip silindirik bir yapıdır. Tüm silindirik yapı, kompozit çelik, beton ve polietilen katmanlarından oluşan hermetik bir radyasyon kalkanına yerleştirilmiştir. Her bir HF kalorimetresi, kabaca eşit  $\eta$  aralıklarla kule olarak bilinen  $18$  eşit  $\phi$  kamaya ve  $13$  birime bölünmüştür. Her kule, giriş hattına paralel uzanan bir kuvars lifi demetinden yapılmıştır. Kuvars, ileri bölgedeki sert radyasyon ortamına karşı dayanıklılığı nedeniyle seçilmiştir: pp çarpışma başına ortalama  $760$  GeV enerji HF'ye yatırılırken, dedektörün geri kalanında  $100$  GeV dağıtılır. Sinyaller hadron yağmurları olarak değil, kuvars ortamdaki yüklü parçacıklar tarafından üretilen Cherenkov radyasyonu olarak algılanır, bu nedenle HF nötr hadronlara karşı duyarsızdır.

#### 2.2.4 Müon dedektörleri

Adından da anlaşılacağı gibi CMS'de müon tespiti, tasarımında merkezi bir öneme sahiptir. CMS, orijinal tasarımında müon tespiti için üç tip gaz parçacık dedektörü kullanır (CMS Collaboration. The CMS experiment, 2008 ve CMS Collaboration. The performance of the CMS, 2013): sürüklenme tüpleri (DT), katot şerit odaları (CSC) ve dirençli plaka odaları (RPC). CMS'nin faz-2 yükseltme planının bir parçası olarak LHC Run 2'den sonra ek gaz elektron çoğaltıcıları (GEM) (A Colaleo, 2015) kuruldu. 1 Farklı müon dedektörlerinin konumları Şekil 2-12'de gösterilmektedir.

Müon sistemi bir varil bölümünden ve her biri solenoid mıknatısın dönüş boyunduruğuyla iç içe geçmiş, istasyon adı verilen dört bileşik dedektör katmanı içeren iki uç kapaktan oluşur. Müon sisteminin namlusu  $|\eta| < 1,2$ , z yönünde 5 tekerlekle. Her tekerlek r yönünde 4 istasyondan oluşur ve her istasyon 12 sektörden oluşur. Her sektör z'ye paralel ve r'ye dik düzlemsel bir yapıdır ve bunların 12'si birlikte namluyu çevreler. Her sektörde bir CE katmanı ve bir veya iki RPC katmanı vardır: birinci ve ikinci istasyonlardaki CE katmanları iki RPC katmanı ile sandviçlenirken, üçüncü ve dördüncü istasyonlardaki CE katmanlarına yalnızca bir RPC katmanı eşlik eder onun iç tarafında. Müon uç kapakları  $0,9 < |\eta| < 2,4$ , kabul boşluğu olmadığından emin olmak için namlu ile bir örtüşme oluşturuyor.

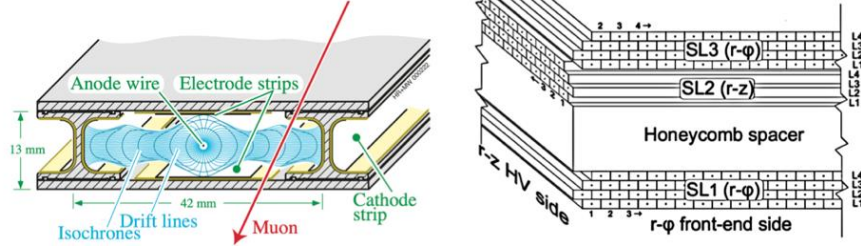


Şekil 2.12 Müon odalarının konumlarını belirten mevcut CMS detektörünün uzunlamasına bir kesit görünümü  
 Bu çizim, Şekil 2.7'den yalnızca 2019/2020'de kurulan GEM dedektörü ile farklıdır (A Colaleo, 2015)

Her uç kapak, 4 istasyon müon odasına sahip bir diskdir. Her istasyon 2 veya 3 halkaya bölünmüştür (ilk istasyon için 3 ve diğerleri için 2) ve her halka altı adet 60° sektörden oluşur. Üç adet 20 derecelik odaya sahip olan 2-4 numaralı istasyonların iç halkası dışında her sektörde altı adet 10° CSC odası bulunmaktadır. Birinci istasyonun iç halkasındaki CSC odacıklarına, sınırları CSC odacıklarıyla aynı hizada olan GEM odacıkları eşlik etmektedir. 1-4 istasyonunun dış halkalarındaki CSC bölmelerine, bunlarla hizalanmış RPC bölmeleri eşlik eder.

DT odaları (CMS Collaboration. The CMS experiment, 2008 ve CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013), tasarımı Şekil 2-13'ün sol grafiğinde gösterilen dikdörtgen sürüklenme hücresi dizileridir. Her bir hücrenin enine boyutu  $42 \times 13 \text{ mm}^2$  ve tüm uzunluğu boyunca merkeze yerleştirilmiş 50  $\mu\text{m}$  çapında altın kaplama paslanmaz çelik tel vardır. Bir DT odası 3 (veya dördüncü istasyon için 2) üst katmandan oluşur, her biri yarım hücre ile kademelendirilmiş 4 istiflenmiş sürüklenme hücresi katmanından oluşur. Üst katmanlar, Şekil 2.13'ün sağ grafiğinde gösterilen z ve

$\phi$  yönleri boyunca dönüşümlü olarak hizalanır. Hücre uzunluğu, z boyunca hizalananlar için 2,5 m'dir ve  $\phi$  boyunca hizalananlar için 1,9 m ila 4,1 m arasındadır.

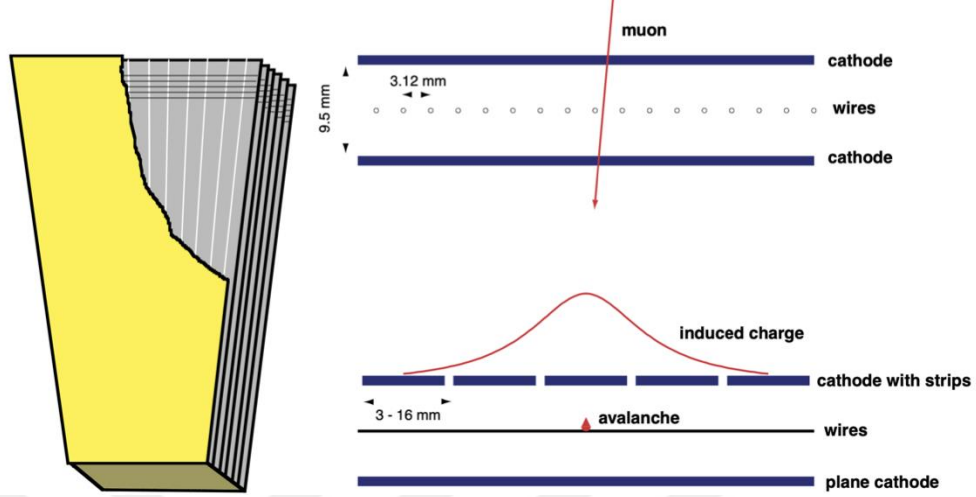


Şekil 2.13 Solda: sürüklenme tüp detektörünün sürüklenme çizgilerini ve izokronları gösteren bir hücrenin taslağı. Sağ: DT üst katmanlarının şematik görünümü (CMS Collaboration. The performance of the CMS, 2013)

DT tüpleri %85 Ar ve %15 CO<sub>2</sub> gaz karışımı ile doldurulur. Belirli bir potansiyel gradyanı oluşturmak için tüpün farklı parçalarına elektrik voltajları uygulanır: çelik teller anotlar olarak +3600 V'ta, 13 mm kenarlardaki alüminyum duvarlar katotlar olarak -1200 V'ta ve alüminyum 42 mm kenarlardaki duvarlar, anotlardan katotlara geçişin yönlendirilmesine yardımcı olmak için +1800 V'tadır.

Bir mion DT hücrelerinden geçtiğinde Ar-CO<sub>2</sub> karışımını iyonize eder. Ortaya çıkan serbest elektronlar anotlara çekilir ve alanda hızlanarak yolları boyunca daha fazla gaz molekülünü iyonlaştırır. Bu çığ, yaklaşık 10<sup>5</sup>'lik bir kazanç sağlar ve sinyal olarak algılanabilir bir akıma yol açar. Elektron çığı kabaca sabit bir hızla yaklaşık 50  $\mu\text{m}/\text{ns}$  sürüklenir, yani elektrik sinyalinin gelişmesi maksimumda 400 ns'ye yakın sürer (anot telinden 21 mm uzaktaki en uzak köşelerde gelen mionlar için). Bu sürüklenme süresi, bir üst katmandaki 4 kademeli katman arasındaki sinyal zamanlama farklarından ölçülür (CMS Collaboration. Bunched beam test, 2004). Bu sürüklenme süresinin belirlenmesi, pp demet geçişleri birbirinden sadece 25 ns ayrı olduğundan özellikle önemlidir. Genel olarak, DT, yaklaşık 2 ns'lik bir zaman çözünürlüğü elde edebilir ve bu, sabit sürüklenme hızı göz önüne alındığında 100  $\mu\text{m}$  mertebesinde bir uzamsal çözünürlüğe çevrilebilir. Bununla birlikte, bu harika zaman ve uzamsal çözünürlüğe bir uyarı eşlik ediyor: iki veya daha fazla mionun ardışık demet geçişlerinde aynı sürüklenme hücrelerinden geçtiği çok düşük bir durumda, hücre önceki çığdan

kurtulamayabilir ve sonraki çığ için verimsiz hale gelebilir. Bu, bu bölümde daha sonra açıklanan hızlı yanıt veren RPC dedektörleri tarafından hafifletilir.

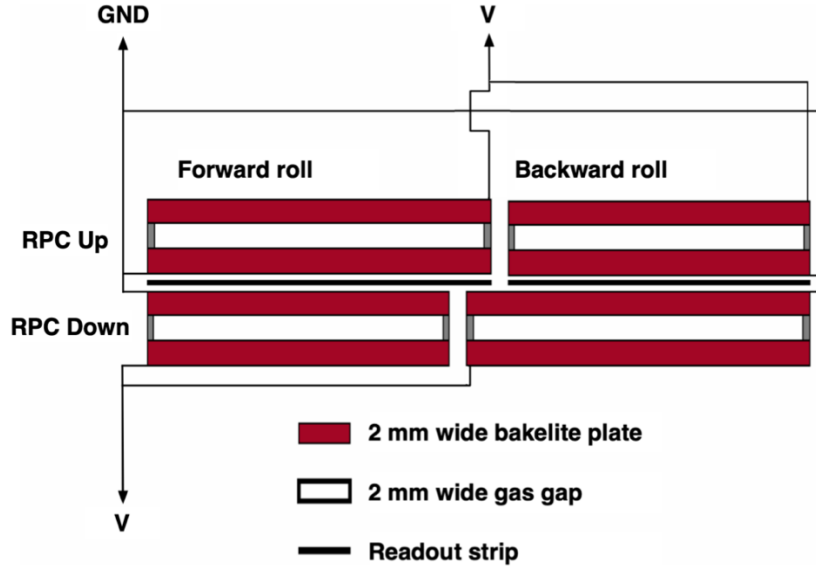


Şekil 2.14 Solda: anot tellerinin ve katot şeritlerinin düzenini gösteren bir CSC odasının düzeni. Sağda: CSC çalışma prensibinin bir gösterimi (CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013)

Şekil 2.14'ün sol grafiği olarak gösterilen CSC bölmeleri odaları (CMS Collaboration. The CMS experiment, 2008 ve CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013), 7 katot şerit paneli arasına serpiştirilmiş 6 anot tel düzleminde oluşan çok telli bölmelerdir. Teller yaklaşık 3 mm'lik eşit aralıklarla yerleştirilmiştir ve  $\phi$  yönü boyunca uzanır. Her bir katot şerit paneli, her biri sabit bir  $\phi$  aralığını kapsayan ve 3 mm ila 16 mm arasında bir genişliğe karşılık gelen,  $r$  yönü boyunca uzanan 80 şerit içerir. Bitişik katot panelleri arasındaki boşluk (aradaki teller ile) yaklaşık 1 cm'dir. CSC'lerin genel boyutu, en büyüğü yaklaşık  $3,4 \times 1,5 \text{ m}^2$  olan farklı istasyonlar ve halkalar için değişir.

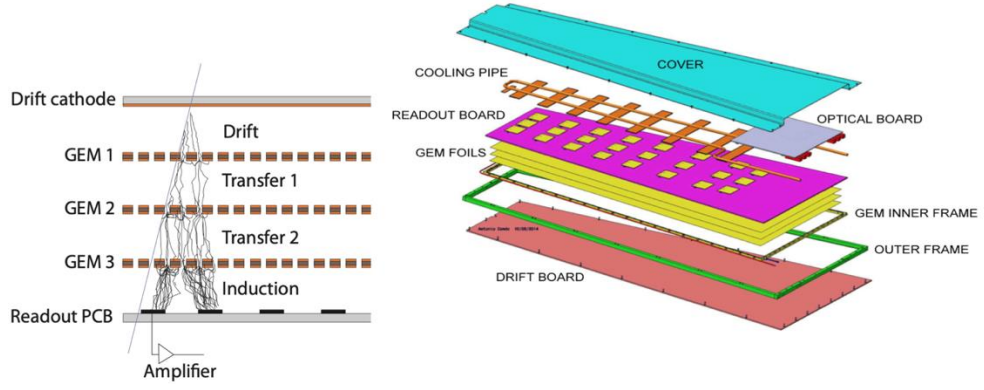
CSC haznelere  $\%40\text{Ar} + \%50\text{CO}_2 + \%10\text{CF}_4$  gaz karışımı doldurulmakta ve anotlar ile katotlar arasına 3,6 kV'luk bir voltaj farkı uygulanmaktadır. CSC çalışma prensibi CE için açıklananla aynıdır. CSC'deki sürüklenme süresi, DT'den daha kısa bir sürüklenme uzunluğuna sahip olduğu için birkaç demet geçiş içindedir. Çevrimdışı kalibrasyonlardan sonra, CSC yaklaşık 3 ns'lik bir zaman çözünürlüğü elde edebilir. Özellikle, elektronlar anot tellerine doğru hareket ettiğinde, Şekil 2.14'ün sağ grafiğinde

gösterildiği gibi, yakındaki katot şeritlerinde yükler indüklenir. Bu yüklerin dağılımını enterpolasyon yaparak, gelen parçacığın uzamsal çözünürlüğü şerit aralığından daha iyi, tetik seviyesinde yaklaşık 2 mm ve çevrim dışı rekonstrüksiyonda yaklaşık 100 µm kadar iyi elde edilebilir.



Şekil 2.15 Çift boşluklu bir RPC'nin şematik görünümü (CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013)

RPC hazneleri boyutları karşılık gelen DT veya CSC (CMS Collaboration. The CMS experiment, 2008 ve CMS Collaboration. The performance of the CMS,2013) hazneleriyle hizalanmış olarak hem namluda hem de uç kapaklarda kullanılır. Temel bir çift boşluklu RPC modülü Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Her bir gaz boşluğu, grafit kaplı 2 mm bakalit plakalardan yapılmış dirençli plakalardan oluşur ve bunlar, 2 mm ara parçalar ve bir bileşik gaz karışımı ile ayrılır. Okuma olarak çift gaz boşlukları arasında bir kat anot şeritleri yerleştirilir. Dış dirençli plakalara uygulanan nominal voltaj 9,6 kV'dir. RPC, 25 ns'den çok daha kısa bir yanıt oranına sahiptir; bu, demet geçiş ataması sağlamada ve genel muon sisteminin yüksek verimliliğini korumada çok önemlidir. Uzamsal çözünürlüğü, aksine, 0,8 cm ile 1,4 cm arasında değişen DT ve CSC'den daha kötüdür.



Şekil 2.16 Sol: GEM yapısını ve çalışma prensibini gösteren şematik görünüm. Sağda: GEM'in mekanik tasarımının parçalara ayrılmış görünümü (A Colaleo, 2015)

GEM detektörleri (A Colaleo, 2015), 2019'da CSC iç halkasının önündeki müon uç kapaklarına takılan yeni bir bileşendir. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, şu anda her uç kapak için yalnızca bir GEM istasyonu kurulmuştur. GEM'in temel birimi, Şekil 2.16'da gösterilen bir "Üçlü GEM detektörü"dür. Üçlü GEM odası, bir gaz karışımına daldırılmış birkaç milimetrelük boşluklarla yerleştirilmiş üç GEM folyosu yığını içerir. Her bir GEM folyosu, üzerinde altıgen bir desende dağılmış delik dizileri olan ince bir metal kaplı polimer folyodur. GEM folyoları, 3200 V nominal voltaj farkına bağlanan bir sürüklenme panosu ve bir okuma panosu tarafından kaplanmıştır. Sürüklenme panosu ile okuma panosu arasındaki toplam mesafe yaklaşık 7 mm'dir. GEM folyolarındaki delikler, elektrik alanını içlerinden geçirerek yüksek çıkış amplifikasyon faktörü sağlarken elektriksel arıza problemlerini önler.

Okuma panosu,  $\phi$  yönü boyunca 300  $\mu$ rad (veya 0,8 mm) hassasiyetle ince tanelidir. GEM odası kısa bir sürüklenme mesafesine ve yüksek bir sürüklenme hızına sahip olduğu için, 10 ns'den daha iyi bir zaman çözünürlüğü ile hızlı yanıt verir. İki üçlü GEM odası her zaman bir süper oda oluşturmak üzere istiflenir ve bağımsız ölçümler sağlar. İki ölçümün kombinasyonu, zaman ve uzamsal çözünürlüğü iyileştirir ve ayrıca tek bir odacık için %3 olması beklenen verimsizliği düzeltir.

### 2.2.5 Tetik sistemi

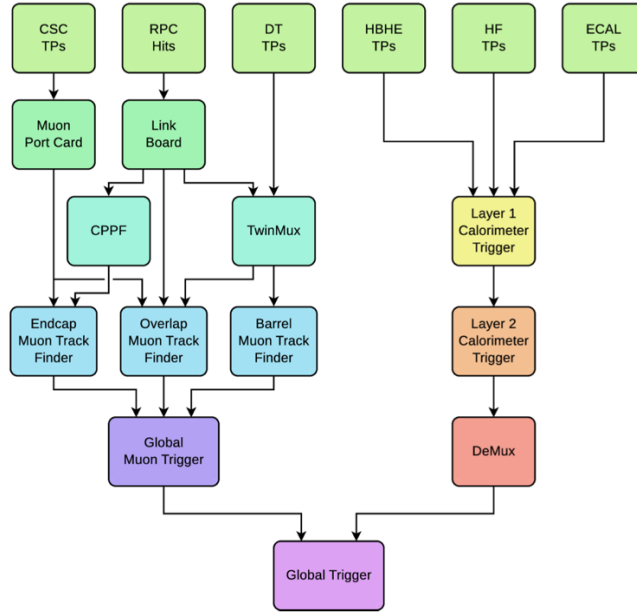
LHC, 25 ns'lik bir nominal demet aralığı ve  $1,0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  mertebesinde anlık bir düzen parlaklığı ile proton demetlerini çarpışan muazzam miktarda veri üretir. CMS dedektöründeki on milyonlarca okuma kanalıyla, yaklaşık 50 TB/sn'lik bir veri akışına karşılık gelen tüm çarpışma verilerini kaydetmek imkansızdır. Bu arada, çoğu pp çarpışması yumuşak saçılımlardır ve birincil ilgi alanlarının fizik süreçlerini içermez. Çevrimdışı depolama ve işleme üzerindeki yoğun gereksinimi azaltmak ve ilginç olmayan çarpışmaları filtrelemek için CMS'de çarpışma olaylarının yalnızca %0,0025'ini seçip kaydeden bir tetikleme sistemi uygulanır.

CMS tetik sistemi (CMS Collaboration. The CMS experiment, 2008 ve CMS Collaboration. Performance of the CMS,2020) iki seviyeye sahiptir. Birinci seviye, hızlı paralel işlemede uzmanlaşmış özel elektroniklerden yapılmış Seviye-1 Tetikleyici (L1T) olarak adlandırılır. Kalorimetrelerden ve müon odalarından gelen sinyallere dayalı kararlar verir ve olay oranını 40 MHz'lik çarpışma hızından 100 kHz'in altına düşürür. İkinci seviye, ticari bir işlemci çiftliğinde çalışan bir yazılım sistemi olan High Level Trigger'dir (HLT). Tüm dedektörlerden gelen okumaları kullanır ve olay oranını 1 kHz'in altına düşürür.

L1T, kalorimetrelerden ve müon sisteminden Tetikleyici Primitifler (TP) olarak bilinen kabaca bölümlenmiş verileri alırken, tam kesinlikli verileri 4  $\mu\text{s}$ 'lik bir gecikmeye karşılık gelen boru hatlı bellek arabelleklerinde tutar. L1T, her grup geçişini analiz etmeli ve verileri arabellekten dışarı itilmeden ve sonsuza kadar kaybolmadan önce tutup tutmamaya karar vermelidir. Elektronik sinyaller yalnızca (ışık hızında) 4  $\mu\text{s}$ 'de 1200 m yol aldığından, hızlı iletişim için L1T'nin fiziksel olarak dedektörün yakınında olması gerekir. L1T elektroniğinin bir kısmı CMS dedektörüne kuruludur ve geri kalanı deneysel mağaradan yaklaşık 90 m uzaklıktaki yer altı kontrol odasında bulunur. L1T tarafından kabul edilen olayların tam kesinlikli verileri, yer üstü bilgi işlem merkezine yaklaşık 100 GB/sn hızında iletilir ve HLT tarafından ayrıca analiz edilir. HLT bu olayları 20000'den fazla CPU çekirdeği arasında işler ve olay başına işlem süresi  $O(100 \text{ ms})$ 'ye gevşetilir. HLT, çevrimdışı yeniden yapılandırmaya benzer bir tam yeniden yapılandırma algoritması çalıştırır ve olayları fizik imzalarına göre seçer. Birkaç

GB/sn'lik bir veri akışına karşılık gelen HLT seçimini geçen olaylar, CMS deneyi tarafından kaydedilen çarpışma veri setini oluşturarak depolama ve daha fazla işlem için CERN bilgi işlem ızgarasında dağıtılır.

L1T'nin yapısı Şekil 2.17'de gösterilmiştir, bir müon tetikleyici ve bir kalorimetre tetikleyiciden oluşur. Müon tetikleyici, namlu (BMTF), örtüşme (OMTF) ve uç kapak (EMTF) bölgelerini kapsayan üç müon izi bulucu (MTF) ve son müon seçimi için küresel bir müon tetikleyici içerir. Tetik Primitifleri (TP),  $\eta$ ,  $\phi$  konumları, zamanlama (demet geçişi) ve isabet modelleri gibi bilgileri içeren her dedektör sektörü için oluşturulur. CSC TP'leri, yerel yüklü izler (LCT) olarak adlandırılan iz segmentleridir ve müon bağlantı noktası kartları (MPC) tarafından iletilir. DT TP'ler aynı zamanda iz segmentleridir. TwinMux [40] adı verilen işlemcilerde süper ilkeller oluşturmak için yakındaki RPC isabetleriyle birleştirilirler. RPC odaları daha az iç katmana sahip olduğundan, RPC TP'leri yalnızca konum ve zamanlama bilgilerini içeren isabetlerdir. Namlu bölgesindeki RPC isabetleri TwinMux tarafından işlenirken, kapaklardaki isabetler kümelenir ve konsantrasyon ön işleme ve fan-out (CPPF) panoları tarafından biçimlendirilir. BMTF, TwinMux'tan girdiler alırken, EMTF hem MPC hem de CPPF'den girdiler alırken, OMTF, TwinMux, MPC ve CPPF öncesi bağlantı panolarından kendi  $\eta$  kapsamı dahilinde girdiler alır. MTF'ler, farklı müon istasyonlarından TP'leri birleştirir, müon izi adayları oluşturur, momentumlarını değerlendirir ve iz niteliklerine göre bir sıralama atar. Her bir MTF, farklı kaynaklardan gelen kopyaları çözen, genel sıralamayı sıralayan ve son L1T kararları için küresel tetikleyiciye en yüksek dereceli 8 müonu gönderen küresel müon tetikleyicisine 36 adede kadar müon adayı gönderebilir.



Şekil 2.17 Çalıştırma 2 sırasında CMS Düzey-1 tetikleme yapısının şeması (CMS Collaboration. Performance of the CMS, 2020)

Kalorimetre tetikleyicisi iki katmandan oluşur. Katman-1, ECAL ve HCAL'den TP'leri alır ve enerji birikintilerini kalibre eder. Layer-2, kalibre edilmiş TP'leri birleştirir ve elektronlar, fotonlar, tau leptonları, jetler ve enerji toplamları gibi tetikleyici nesnelere yeniden oluşturur. (Elektronlar ve fotonlar L1T seviyesinde ayırt edilemezler ve birlikte  $E/\gamma$  adayları olarak anılırlar.) Katman-2, farklı demet geçişlerinin çoklu özdeş panolar tarafından paralel olarak analiz edildiği, zaman çoğullamalı bir tetikleyicidir [41]. Bu şekilde, her kart daha rahat bir işleme süresine sahip olur ve ECAL ile HCAL'nin tam kabulüne ve ayrıntı düzeyine erişebilir. Bir çoğullama çözücü (DeMux) kartı, çoklayıcılardan gelen çıktıyı özetler, yeniden sıralar ve biçimlendirir ve sonuçları genel tetikleyiciye iletir.

Bahsedilen tüm L1T bileşenleri, Xilinx Virtex-7 Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA) kartları üzerine kuruludur. Bu tasarım, tetikleme sisteminin yeniden kullanılabilirliğini ve esnekliğini büyük ölçüde artırır ve geliştirme ve bakım için iş yükünü azaltır. Büyük ölçüde programlanabilir panolar ayrıca karmaşık çok değişkenli algoritmaların arama tabloları biçiminde tetikleme düzeyinde uygulanmasına olanak tanır.

Küresel tetikleyici, tüm müon ve kalorimetre nesnelere inceler ve tetikleme menüsü olarak bilinen bir tetikleme gereksinimleri listesine dayalı olarak kararlar verir. Tetikleme menüsü, "veya" mantığıyla birleştirilmiş yaklaşık 400 tetik çekirdeğinden oluşur. Her bir tetikleyici tohum,  $p_T$ ,  $\eta$ , izolasyon ve belirli tetikleyici nesne (ler)in diğer miktarları ile ilgili bir dizi gereksinimdir. Örneğin, tek bir müon tetikleyici,  $p_T > 22$  GeV olan bir müonun diğer tetikleyici nesnelere izole edilmesini isteyebilir ve tek bir müon + çift jet tetikleyici, birbirine yakın olaylarda bir müon ve iki jet isteyebilir. Tetik tohumlarındaki seçim gereksinimleri, toplam tetikleme oranı makul bir seviyede tutulacak şekilde ayarlanır. Tetikleme oranını düşük tutarken gevşek seçimler yapma ihtiyacının olduğu bazı durumlarda, bir "ön ölçekleme" yöntemi uygulanır. Ön ölçeği  $N$  olan bir tetikleyici, bu tetikleyiciyi geçen her  $N$  olayda yalnızca birinin kabul edildiği ve kaydedildiği anlamına gelir. Genel olarak, önceden ölçeklendirilmemiş tetikleyiciler fizik analizleri için veri toplamak için kullanılırken, önceden ölçeklendirilen tetikleyiciler kalibrasyonlar ve tetikleyici performans çalışmaları için kullanılır. Önceden ölçeklendirilmiş tetikleyicilerin aşırı bir örneği, proton çarpışmalarından herhangi bir özel nesne gerektirmeyen sıfır önyargılı tetikleyicidir. Çok düşük bir oranda çalışır ve çeşitli tetikleme çalışmaları için temel veri seti oluşturur.

HLT menüsü, L1T menüsüne benzer, ancak çok daha iyi yeniden yapılandırılmış fizik nesnelere dayanır. Özellikle  $H \rightarrow \mu \mu$  bozunum analizi tarafından alınan tetikleme yolları, 2016/2017/2018 veri kümeleri için 24/27/24 GeV  $p_T$  eşiklerine sahip tek izole müon tetikleyicileridir. Bu tek müon tetikleyicileri, genel olarak, tetikleme eşiklerinin üzerindeki müonlar için %90'dan daha yüksek bir verimliliğe sahiptir.

## **2.3 LHC, CMS ve Pixel Dedektör Yenilikleri (Faz-2):**

### **2.3.1 HL-LHC yükseltmesi**

LS3 sırasında hızlandırıcı, nihai performans senaryosunda (G. Apollinari, 2015)  $5 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> veya hatta  $7,5 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> anlık pik parlaklıkları mümkün kılacak şekilde yükseltilecektir (burada ve aşağıda, beklenen hızlandırıcı tarafından potansiyel olarak elde edilebilecek maksimum performans sayıları değil, operasyonel performans sayıları). Bu, ATLAS ve CMS'nin yılda 300 fb<sup>-1</sup> mertebesinde ve HL-LHC'nin

öngörülen on yıllık kullanım ömrü boyunca 3000 fb-1'e kadar (nihai anlık parlaklık ise 4000 fb-1'e kadar) entegre parlaklıkları toplamasına izin verecektir. nosity elde edilebilir). HL-LHC'nin 14 TeV'lik bir kütle merkezi enerjisinde ve 25 ns'lik bir demet aralığıyla çalışması bekleniyor. HL-LHC projesi, Haziran 2016'da CERN Konseyi tarafından resmi olarak onaylandı. HL-LHC yükseltmesi ve tam kullanımı, Avrupa Parçacık Fiziği Stratejisi (ESPP) [43] ve ABD Parçacık Fiziği tarafından en öncelikli çaba olarak kabul edilir. Proje Önceliklendirme Paneli (P5) (Particle, 2014) ve Avrupa Araştırma Altyapıları Strateji Forumu'nun (ESFRI) büyük araştırma altyapılarına ilişkin “Yol Haritası 2016” strateji raporunun (CMS Collaboration. Performance of the CMS, 2018) dönüm noktası listesinde yer almaktadır.

Anlık parlaklık artışı çeşitli önlemlerle sağlanacaktır (G. Apollinari, 2015). En önemlisi, yerleştirme bölgelerindeki iç üçlü dört kutuplu mıknatıslar, Nb3Sn teknolojisine dayanan radyasyona daha dayanıklı olanlarla değiştirilecektir. Yeni dört kutuplu mıknatıslar, daha yüksek bir manyetik alan gücü sağlayacak ve daha geniş bir açıklığa sahip olacak ve çarpışma bölgesinde daha düşük bir ışın beta fonksiyonu,  $\beta^*$  aracılığıyla bir parlaklık artışına izin verecek.

Sonuç olarak, bir dizi yeni düzeltici mıknatısın ve ayırma dipolünün takılması ve TAS (İkincil Hedef Emici) soğurucuların değiştirilmesi gerekecektir. Daha düşük bir  $\beta^*$ , kirişlerin daha büyük bir geçiş açısı nedeniyle daha küçük bir geometrik parlaklık azaltma faktörü pahasına gelir. Etkileşim bölgelerine süper iletken radyofrekans yengeç oyukları kurulacak ve kirişlerin çarpışmadan önce dönmesine izin verilecek, böylece demetler kafa kafaya çarpışacak (G. Apollinari, 2015).

Tek bir demet geçişi sırasında meydana gelen eşzamanlı pp çarpışmalarının (yığın) sayısı, anlık parlaklıkla orantılıdır. Birikme olaylarının sayısını sınırlandırmak için, bir LHC dolumu sırasında parlaklığın dengelenmesi, yani ulaşılabilir maksimum değer altında sabit bir parlaklıkta çalıştırılması öngörülmektedir (G. Apollinari, 2015).

2016'da en yüksek anlık parlaklıkta ortalama olay sayısı 53'e ulaşırken, özel bir yüksek yığılma çalışmasında,  $5,0 \times 10^{34}$  cm-2s-1 anlık parlaklık için ortalama yaklaşık 140 olayın 200'e çıkması bekleniyor. Şöyle bir radyasyon seviyesi emsalsiz olacaktır: 3000

fb-1 tasarım bütünleşmiş parlaklığı için  $2,3 \times 10^{16}$  neq /cm<sup>2</sup> 1 MeV nötron eşdeğeri akıcılık ve 12 MGy (1,2 Grad) toplam iyonlaştırıcı doz beklenmektedir. En içteki silikon piksel izleme katmanlarının kurulacağı CMS'in merkezi.

HL-LHC yükseltmesine, dedektörün mükemmel performansını sürdürmek ve zorlu radyasyon seviyelerine ve çalışma koşullarına rağmen HL-LHC özelliklerinden tam olarak yararlanmamızı sağlamak için CMS deneyinin bir yükseltme programı eşlik eder.

### 2.3.2 CMS Faz-2 yükseltmesi

HL-LHC (CMS Collaboration, 2015) tarafından sağlanan parlaklık artışından yararlanmak için CMS dedektörünün (Combined, 2018) LS3 sırasında önemli ölçüde yükseltilmesi gerekir. Bu yükseltme, CMS Aşama-2 Yükseltmesi olarak adlandırılır. Radyasyon seviyelerindeki artış, gelişmiş radyasyon sertliği gerektirirken, daha büyük yığın ve buna bağlı parçacık yoğunluğundaki artış, doluluğu azaltmak için daha yüksek dedektör tanecikli yapısı, daha yüksek veri hızlarına uyum sağlamak için artırılmış bant genişliği ve tetikleme hızını kabul edilebilir bir seviyede tutmak için geliştirilmiş tetikleme yeteneği gerektirir.

CMS tetik sistemi, birinci düzey donanım tetikleyicisi (L1) ve üst düzey tetikleyici (HLT) olmak üzere iki aşamadan oluşur. Tetikleme hızları, L1'de 750 kHz ve HLT'de 7,5 kHz ile sınırlandırılacaktır. L1 tetikleme gecikmesi yaklaşık 12,5 µs olacaktır.

Müon odalarının artan parçacık oranlarıyla başa çıkması beklenirken, sürüklenme tüpü odaları (DT'ler) ve katot şerit odaları (CSC'ler) için ön uç elektroniği, radyasyon toleransını, okuma hızını ve performansı artırmak için geliştirilmiş versiyonlarla değiştirilecektir. İleri bölgede müon sistemi, hem iyileştirilmiş dirençli plaka odaları (RPC'ler) hem de gaz elektron çarpanı (GEM) tekniğine dayalı yeni odalar ile geliştirilecektir. Yeni odalar fazlalık ekler, tetikleme ve yeniden oluşturma performansını iyileştirir ve ileri dedektör bölgesindeki kabulü artırır.

Namluda elektromanyetik kalorimetre (ECAL), çığ foto diyotları (APD'ler) ile okunan kurşun-tungstat kristalleri kullanır. Kristaller, şu anda kullanılanlardan daha düşük

sıcaklıklara soğutulacak ve tetikleme gecikmesi ve bant genişliği gereksinimleriyle başa çıkmak için ön uç elektroniği geliştirilecektir. Yeni ön uç kartlar, L1 tetikleyicisindeki tek kristallerden bilgilerin kullanılmasına izin verirken, mevcut sistem aynı bilgileri yalnızca  $5 \times 5$  kristal gruplarında entegre eder. Hadronik kalorimetre (HCAL), LS3'ten önce silikon fotoçoğaltıcılarla (SiPM'ler) değiştirilecek olan hibrit fotodiyotlar (HPD'ler) tarafından okunan pirinç soğurucu plakalar ve plastik sintilatör katmanlarının namli bölgesinden oluşur. LS3 sırasında ışın hattına yakın sintilatör karoları değiştirilecektir.

Elektromanyetik ve hadronik uç kapaklı kalorimetreler, öncelikle silikon ped sensörlerine dayanan yeni bir kombine elektromanyetik ve hadronik örnekleme kalorimetresiyle değiştirilecektir. SiPM'ler tarafından okunan plastik sintilatör karolar, hadronik bölümdeki ışın hattından büyük mesafelerde kullanılacaktır. Elektromanyetik (hadronik) bölümlerde  $0,5-1 \text{ cm}^{-1}$  'lik silikon ped hücre boyutları ve örnekleme katmanı ile bu dedektör, yüksek enine ve boylamsal taneciklik sağlayarak elektronların, jetlerin, fotonların, tau leptonların, yığın reddinin ve tanımlamasının iyileştirilmesine yol açacaktır.

Şu anda piksel ve şerit dedektörlerden oluşan tüm silikon izleme sistemi değiştirilecektir. Yeni izleyici, artırılmış ileri kabul, artırılmış radyasyon sertliği, daha yüksek ayrntı düzeyi ve daha yüksek veri hızları ve daha uzun tetikleme gecikmesi ile uyumluluk özelliklerine sahip olacak. Ek olarak, izleyici L1 tetikleyicisine izleme bilgisi (yapılandırılabilir bir enine momentum eşliğinin üzerindeki izler üzerinde) sağlayacaktır, bilgi şu anda yalnızca HLT'de mevcuttur. Bu, fizik potansiyelinden ödün vermeden tetikleme oranlarının sürdürülebilir bir seviyede tutulmasını sağlayacaktır.

CMS, sağ elini kullanan bir koordinat sistemini benimser. Orijin, deney içindeki nominal çarpışma noktasında ortalanır. X eksenini LHC'nin merkezine doğru işaret eder ve y eksenini dikey olarak yukarıyı gösterir. Z eksenini ışın yönü boyunca işaret eder. Azimut açısı  $\phi$ , x-y düzleminde x ekseninden ölçülür ve bu düzlemdeki radyal koordinat  $r$  ile gösterilir. Kutup açısı  $\theta$ , z ekseninden ölçülür. Sözde hız,  $\eta$ ,  $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$  olarak tanımlanır. Sırasıyla  $p_T$  ve  $E_T$  ile gösterilen ışın yönüne çapraz olan momentum ve enerji, x ve y bileşenlerinden hesaplanır. Enine düzlemdeki momentum

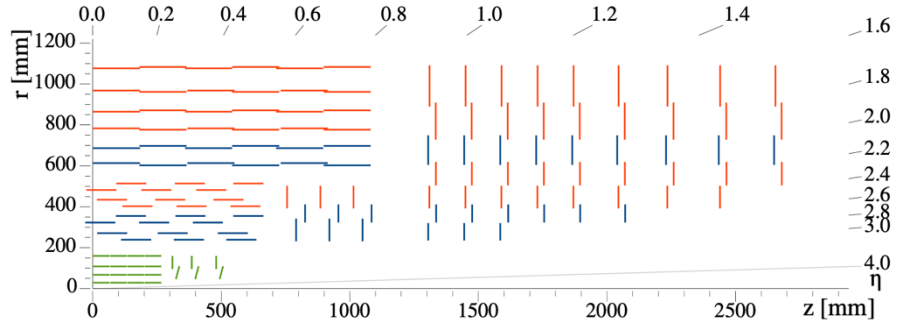
dengelesizliğine kayıp enine momentum denir ve büyüklüğü  $E_{Tmiss}$  ile gösterilir. Bu belge boyunca doğal birimler kullanılmıştır, yani ışık hızı  $c$  ve indirgenmiş Planck sabiti 1 olarak ayarlanmıştır.

### 2.3.3 Faz-2 izleyici yükseltmesine genel bakış

#### 2.3.3.1 Mevcut izleyicinin sınırlamaları

Mevcut şerit izleyici,  $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  anlık parlaklıkta, demet geçişi başına ortalama 20-30 çarpışma yığınyla ve  $500 \text{ fb}^{-1}$ 'lik entegre bir parlaklığa kadar yüksek verimlilikle çalışacak şekilde tasarlanmıştır. İzleyici, tasarım değerinin çok üzerinde olan mevcut anlık parlaklıklarda gerçekten çok iyi performans gösteriyor. Ancak  $500 \text{ fb}^{-1}$ 'in üzerindeki radyasyon hasarı nedeniyle performans düşecektir. Orijinal piksel dedektörü, uzatılmış yıl sonu teknik durdurması 2016/2017 sırasında yeni bir cihaz olan "Faz-1" piksel dedektörü (CMS Collaboration, 2012) ile değiştirildi. Anlık parlaklık orijinal tasarım değerini aştığından ve LS3'ten önce daha da artacağı tahmin edildiğinden, okuma çipindeki yüksek hızlardaki dinamik verimsizlikleri gidermek için bu yükseltmeye ihtiyaç vardı. Aşama-1 izleyicinin düzeninin dörtte biri Şekil 2.18'de gösterilmektedir. 200 mm'nin altındaki radyal bölge, pikseli dedektörlerle donatılmıştır. 200 mm'nin ötesinde, mevcut izleyici, 100 mrad stereo açılı iki arka arkaya silikon şerit dedektörden oluşan tek taraflı şerit modülleri ve çift taraflı modüller içerir. Çift taraflı modüller, sırasıyla namlu ve kapaklardaki  $z$  ve  $r$  koordinatlarının kaba ölçümlerini sağlar. İzleme sistemi,  $|\eta| \approx 2.4$ .

HL-LHC'nin başlamasından önce, hem şerit izleyicinin hem de Faz-1 piksel detektörünün, HL-LHC'de çalışırken maruz kalacakları önemli hasar ve performans düşüşü nedeniyle ve daha zorlu durumlarla başa çıkmak için değiştirilmeleri gerekecektir.



Şekil 2.18 Faz-1 CMS izleme sisteminin dörtte birinin r-z görünümünde taslağı. Piksel detektörü yeşil renkle gösterilirken, tek taraflı ve çift taraflı şerit modüller sırasıyla kırmızı ve mavi segmentler olarak gösterilir

Piksel sensörlerinde birikmiş radyasyon hasarı, yük toplama verimliliğini ve Lorentz açısını azaltır, bu da başlangıçta komşu pikseller arasında yük paylaşımının azalmasına ve dolayısıyla uzamsal çözünürlüğün bozulmasına ve sonunda isabet etkinliğinin azalmasına yol açar.

Mevcut şerit izleyici için, ışınlama ile dedektör özelliklerindeki en belirgin değişiklikler, sensör tükenme voltajının ve kaçak akımın artmasıdır. İkincisi, soğutma sisteminin çalışma sıcaklığını düşürerek belirli bir noktaya kadar hafifletilebilirken, birincisi bunu yapamaz. Temelde tüm çift taraflı şerit modüllerin artık  $1000 \text{ fb}^{-1}$  'den sonra nominal soğutma sıcaklığında çalıştırılmayacağı kanıtlanmıştır.

Mevcut izleme sisteminin bütünleşmiş parlaklığın bir fonksiyonu olarak beklenen performansına ilişkin çalışmalar, algılama da dahil olmak üzere yaklaşık  $1000 \text{ fb}^{-1}$  'in ötesinde kabul edilemez bir bozulma göstermiştir.

Izleme ve b etiketleme performansının artması ve etki parametresi çözünürlüğünün kötüleşmesi. Fizik programı, okuma bant genişliği ve tetikleme gecikmesindeki sınırlamalardan da etkilenecektir. Bu nedenle izleyici, Faz-2 fizik programı için tamamen değiştirilmelidir.

### 2.3.3.2 İzleyici yükseltmesi için gereksinimler

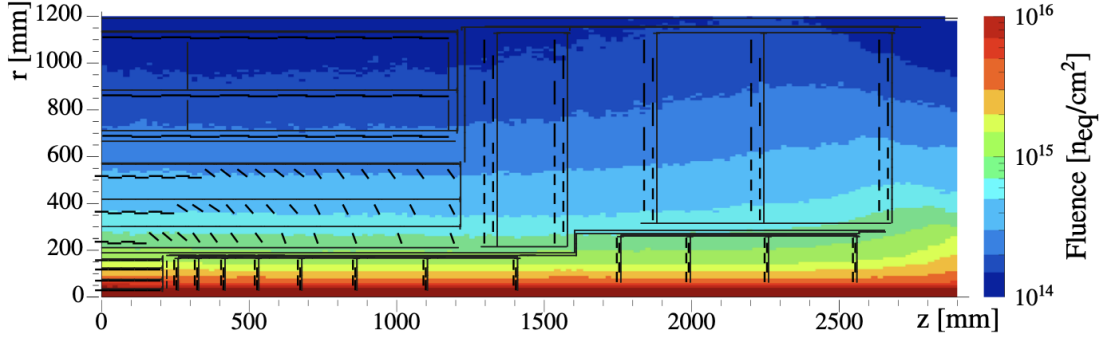
Faz-2 izleyici, silikon piksel modüllerine dayalı bir İç İzleyiciden ve şerit ve makro piksel sensörlü silikon modüllerden yapılmış bir Dış İzleyiciden oluşacaktır. İzleyici yükseltmesi için temel gereksinimler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Radyasyon toleransı: Yükseltilecek izleyici, uygun marjla  $3000 \text{ fb}^{-1}$ 'lik bir hedef bütünlüğe kadar tamamen verimli olmalıdır. Hem FLUKA (A. Ferrari, 2005 ve T. T. Bohlen, 2014) simülasyonlarındaki belirsizlikleri hem de nihai parlaklık senaryosunun gerçekleştirilmesi durumunda ek entegre parlaklığın potansiyel sunumunu karşılamak için %50 mertebesinde bir marj hedeflenmiştir. Bu gereklilik Outer Tracker için herhangi bir bakım müdahalesi olmadan yerine getirilmelidir. Piksel detektör modüllerinin konuşlandırıldığı Inner Tracker için, mevcut erişilebilirlik konseptini koruyarak, Inner Tracker'ı düzenli kapatmalar sırasında çıkarmamıza izin vererek ve önemli ölçüde radyasyon hasarı biriktirdiklerinde modülleri ve diğer öğeleri değiştirme seçeneği sunarak öngörülmüştür. Mevcut izleyicinin (CMS Collaboration, 1997 ve CMS Collaboration, 2000) tasarımı için kullanılan gerekliliklere kıyasla yaklaşık bir kat daha yüksek olan ve 1'e ulaşan farklı dedektör bölgelerinin radyasyona maruz kalmasını tahmin etmek için ayrıntılı FLUKA simülasyonları yapılmıştır. Inner Tracker'ın en iç bölgelerinde  $2,3 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}} / \text{cm}^2$ 'lik MeV nötron eşdeğeri akıcılığı. Parçacık akıcılığı öncelikle r'ye bağlıdır, z ile varyasyon ise çok orta düzeydedir (Şekil 2.19). Yeni izleyicinin çeşitli bölümleri için beklenen maksimum akıcılık düzeyleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Artırılmış ayrıntı düzeyi: Yüksek düzeyde yığılma ile verimli izleme performansı sağlamak için, yüksek kanal yoğunluğu gerektiren Outer Tracker'da (Inner Tracker) kanal doluluğunun yüzde (binde bir seviye) civarında veya altında tutulması gerekir. Demet geçişi başına 140 ve 200 çarpışma hedef değerleri, dedektörün performansını kıyaslamak için kullanılır.

İyileştirilmiş iki yol ayrımı: Mevcut izleyici, piksel detektöründeki isabet birleştirme nedeniyle yüksek enerjili jetlerde sınırlı iz bulma performansına sahiptir. Yüksek

parlaklıkta çalışma sırasında alınacak büyük miktarda çarpışma verisinden en iyi şekilde yararlanmak için, iki yol ayrımının iyileştirilmesi gerekir.



Şekil 2.19 Faz-2 izleyici için cm<sup>2</sup> başına 1MeV nötron eşdeğerinde bütünleşmiş parçacık akışı. Gösterilen tahminler,  $\sqrt{s} = 14$  TeV pp çarpışmalarının 3000 fb<sup>-1</sup> toplam bütünleşmiş parlaklığına karşılık gelir

Çizelge 2.1 İzleyicinin seçilen dedektör bölgeleri veya bileşenleri için maksimum beklenen akıcılık. Değerler  $\sqrt{s} = 14$  TeV'deki 3000 fb<sup>-1</sup> pp çarpışması içindir, 80 mb'lik toplam kesit,  $\sigma_{pp}$  varsayılır. İlgili bölge veya bileşen tipi için belirtilen maksimum akıcılık seviyelerine ulaşılan r ve z'deki konumlar da verilmiştir

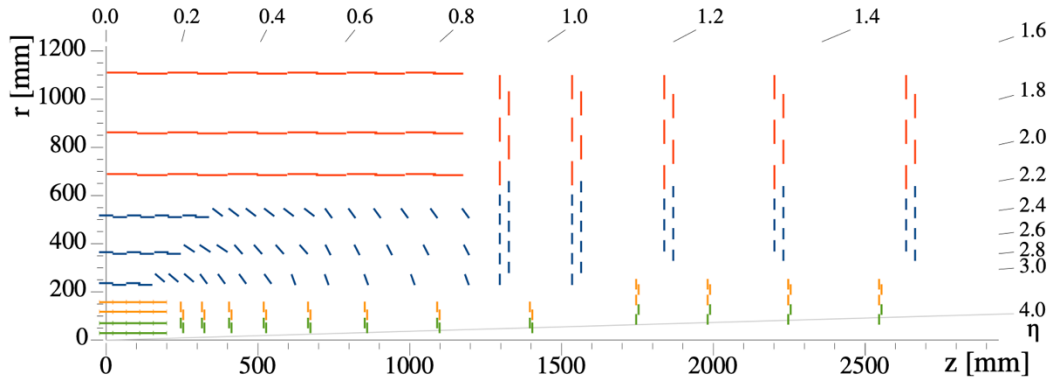
Bölge veya bileşen	Max akıcılık [ $n_{eq}/cm^2$ ]	r [mm]	z [mm]
IT barrel layer 1	$2.3 \times 10^{16}$	28	0
IT barrel layer 2	$5.0 \times 10^{15}$	69	0
IT barrel layer 4	$1.5 \times 10^{15}$	156	89
IT forward, ring 1	$1.0 \times 10^{16}$	51	252
IT service cylinder	$1.3 \times 10^{15}$	170	260
OT PS modules	$9.6 \times 10^{14}$	218	129
OT 2S modules	$3.0 \times 10^{14}$	676	2644

İzleme hacminde azaltılmış malzeme: Yüksek parlaklığın kullanılması, daha hafif bir izleyiciden büyük fayda sağlayacaktır. Mevcut izleyicinin performansı, kalorimetrelerin performansını ve CMS'deki genel olay yeniden yapılandırmasını da etkileyen malzeme miktarından etkilenir.

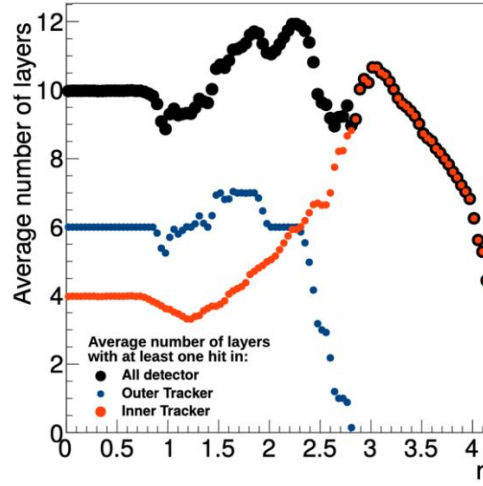
Sağlam örüntü tanıma: Yüksek yığılma koşullarında iz bulmak giderek daha zor ve zaman alıcı hale geliyor. Yükseltilmiş izleyicinin tasarımı, özellikle HLT'de hızlı ve verimli iz bulmayı sağlamalıdır.

1. seviye tetikleyiciye katkı: İlk tetikleme aşamasında ilginç fizik olaylarının seçimi, yalnızca hız artışı nedeniyle değil, aynı zamanda seçim algoritmalarının yüksek yığılma koşullarında verimsiz hale gelmesi nedeniyle yüksek parlaklıkta son derece zorlayıcı hale gelir. CMS tetikleyicisi, önemli ölçüde artırılmış gecikme süresi ve çıkış hızıyla çalışacak ve izleyicinin bunlara uyması gerekiyor. Ek olarak, geniş bir fizik kanalı yelpazesinde performansı korumak ve muhtemelen geliştirmek için CMS, şu anda HLT'de gerçekleştirilen yeniden yapılandırmanın bir kısmını öngörerek L1 olay seçiminde izleme bilgilerini kullanmayı seçmiştir.

Genişletilmiş izleme kabulü: Genel CMS fizik yetenekleri, ileri bölgedeki izleyici ve kalorimetrelerin genişletilmiş kabulünden büyük ölçüde yararlanacaktır (CMS Collaboration, 2015). Yükseltilmiş izleme sistemi yaklaşık  $|\eta| = 4$ .



Şekil 2.20 r-z görünümünde izleyici düzeninin dörtte birinin taslağı. Inner Tracker'da yeşil çizgiler, iki okuma yongasından oluşan piksel modüllerine ve sarı çizgiler, dört okuma yongasına sahip piksel modüllerine karşılık gelir. Outer Tracker'da mavi ve kırmızı çizgiler, metinde açıklanan iki tür modülü temsil eder



Şekil 2.21 Hem Inner Tracker (kırmızı) hem de Outer Tracker (mavi) modülleri ve tam izleyici (siyah) dahil olmak üzere, parçacıkların geçtiği ortalama modül katmanı sayısı. Parçacık yörüngeleri,  $|z_0| < 70$  mm ve çoklu saçılma dahil değildir

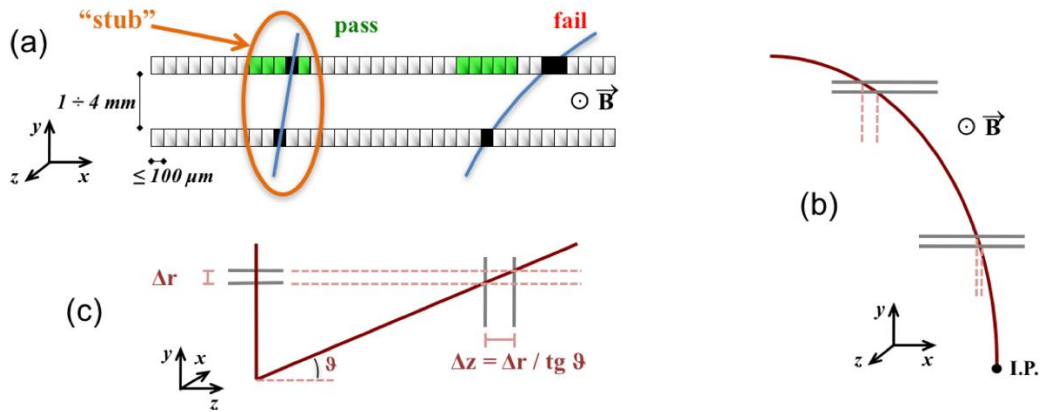
### 2.3.4 Yükseltilmiş izleyici konseptine genel bakış

#### 2.3.4.1 L1 tetikleyicisine izleyici girişi

Tetikleme performansının geliştirilmesi, hem ilginç olayların daha yüksek çıktı oranını hem de olay seçiminin gelişmiş bir ayırt etme gücünü içerir ki bu, yüksek yığılma ortamında daha zorlayıcıdır. İyileştirilmiş ayırt etme gücü, tetikleme kararında daha fazla bilgi kullanılarak ve işlenmesi için daha uzun bir gecikmeyle elde edilecektir. L1 tetikleyicisinde izleme bilgilerinin kullanılması, L1'deki çeşitli nesnelere (örneğin jetler) enine momentum çözünürlüğünü iyileştirecek, iz izolasyonu hakkındaki bilgilerin kullanılmasına izin verecek ve yığılmanın azaltılmasına katkıda bulunacaktır. CMS, birinci seviye tetikleme oranını şu anda 100 kHz'den 750 kHz'e yükseltmeyi ve gecikmeyi mevcut değer olan 3,2  $\mu$ s'den 12,5  $\mu$ s'ye çıkarmayı planlıyor. Ön uç elektroniği ve L1 tetik yolu rekonstrüksiyonunun bu yeni gereksinimlere uyması gerekir.

L1 tetikleyicisine izleme bilgisi sağlama gerekliliği, modül konsepti de dahil olmak üzere Outer Tracker'ın tasarımı için ana itici güçtür. L1 tetikleyicisinde izleme bilgilerinin kullanılması, izleyicinin her demet geçişinde kendi seçtiği bilgileri göndermesi gerektiği anlamına gelir. Bu işlevsellik, 40 MHz'de gönderilmesi gereken

veri hacmini sınırlamak için ön uç elektroniklerdeki yerel veri azaltımına dayanır. Bu, "p<sub>T</sub> modülleri" olarak adlandırılan, belirli bir p<sub>T</sub> eşliğinin altındaki parçacıklardan gelen sinyalleri reddedebilen modüller ile elde edilir. Yüklü parçacıklardan gelen izler, CMS mıknatısının 3.8 T alanı tarafından enine düzlemde bükülür ve bükülme açısı parçacığın p<sub>T</sub>'sine bağlıdır. Modüller, iki sensördeki sinyalleri ilişkilendiren ve yukarıdaki parçacıklarla uyumlu isabet çiftlerini ("saplamalar" olarak adlandırılır) seçen ortak bir ön uç ASIC seti tarafından okunan iki tek taraflı yakın aralıklı sensörden oluşur. Seçilen p<sub>T</sub> eşığı (Şekil 2.22 (a)). Yaklaşık 2 GeV'lik bir eşik, kabaca bir büyüklük mertebesinde bir veri hacmi azalmasına karşılık gelir; bu, 40 MHz'de saplamaların iletilmesini sağlamak için yeterlidir, diğer tüm sinyaller ise ön uç boru hatlarında depolanır ve bir tetikleyici olduğunda okunur. P<sub>T</sub> eşığı, okuma çipinde ilgili ayarın programlanmasıyla belirli bir seviyeye ayarlanabilen kabul penceresine bağlıdır. P<sub>T</sub> modülleri için, dedektörün farklı bölgelerinde istenen p<sub>T</sub> filtrelemeyi elde etmek için optimize edilmiş birkaç farklı sensör aralığı değeri kullanılır (Şekil 2.22 (b) ve (c)). Enine düzlemde silikon şeritler (veya aşağıda ayrıntıları verildiği gibi makro pikseller) arasında yaklaşık 100 µm'lik bir aralık için, 3,8 T CMS manyetik alanı sayesinde namlu geometrisinde yaklaşık 200 mm'lik bir yarıçapa kadar yeterli p<sub>T</sub> çözünürlüğü elde edilebilir. Bu nedenle konsept, Outer Tracker'da uygulanabilir ve açısal kabulde yaklaşık  $|\eta| < 2.4$ .



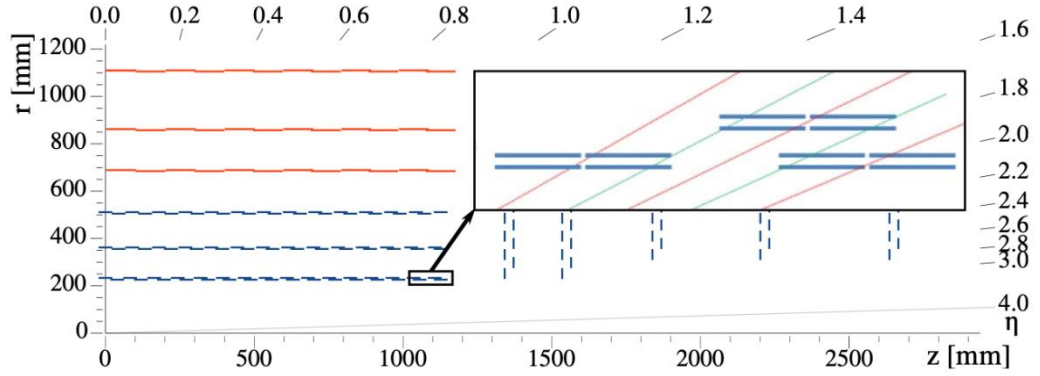
Şekil 2.22 p<sub>T</sub> modülü konseptinin gösterimi.

(a) Yakın aralıklı sensörlerdeki sinyallerin korelasyonu, düşük p<sub>T</sub> parçacıklarının reddedilmesini sağlar; yeşil renkle gösterilen kanallar, kabul edilen bir saplamayı tanımlamak için seçim penceresini temsil eder. (b) Aynı enine momentum, belirli bir sensör aralığı için büyük yarıçaplarda iki sinyal arasındaki daha büyük bir mesafeye karşılık gelir. (c) Uç kapaklı diskler için, aynı yarıçaptaki namluda olduğu gibi aynı ayırt etme gücünü elde etmek için sensörler arasında daha büyük bir boşluk gereklidir

### 2.3.5 Dış izleyici

Dış İzleyici, L1 tetikleme işlevini uygulayan  $p_T$  modülleri ile doldurulur.  $p_T$  modülü konsepti, bir modülün üst ve alt sensör şeritlerinin birbirine paralel olmasına dayanır. Şerit yönünün haznede z eksenine paralel ve uç kapaklarda neredeyse radyal olması, haznede (uç kapaklarda) z koordinatını (r koordinatı) ölçmek için kullanılacak stereo şerit kavramını engeller. Bu nedenle  $p_T$  modüllerinin iki versiyonu gerçekleştirilmiştir: iki şerit sensörlü modüller (2-şerit veya 2S modülleri) ve bir şerit ve bir makro piksel sensörlü modüller (piksel şerit veya PS modülleri). Ayrıntılar Bölüm 3'te verilmiştir. 2S modüllerindeki şeritlerin uzunluğu yaklaşık 5 cm iken, PS modüllerindeki şeritlerin uzunluğu yaklaşık 2,4 cm'dir. PS modüllerinde iki sensörden biri, yaklaşık 1,5 mm uzunluğundaki makro piksellere bölünür ve namluda (uç kapaklarda) z (r) koordinat ölçümü sağlar. PS modülleri, Outer Tracker'ın ilk üç katmanında, 200–600 mm'lik radyal bölgede, yani saplama  $p_T$  çözünürlüğünün kabul edilebilir kaldığı ve veri azaltmanın etkili olduğu yarıçaplara kadar dağıtılır. 2S modülleri, 600 mm'nin üzerindeki radyal bölgede, en dıştaki üç katmana yerleştirilmiştir. Uç kapaklarda modüller, disk benzeri yapılar üzerinde halkalar halinde düzenlenir, halkalar yaklaşık 700 mm'ye kadar düşük yarıçaplarda, PS modülleri ile donatılırken, daha büyük yarıçaplarda 2S modülleri kullanılır. Üç PS varil katmanı tarafından sağlanan z koordinatları üzerindeki kesinlik, tetik izlerinin orijinini, farklı köşelerden gelen parçacıkları kısmen ayırt etmek için yeterince kesin olan yaklaşık 1 mm'lik bir ışıklı bölge kısmıyla sınırlandırır.

$p_T$  modülü konsepti, bir modülün hem üst hem de alt silikon sensörlerinin saplama bulmayı gerçekleştiren okuma elektroniğine bağlanması gerektiğini ima eder. Üst ve alt sensörler arasındaki bağlantıyı güvenilir ve uygun fiyatlı teknolojilerle gerçekleştirmek için, parçacıklar modülü merkeze yakın bir yerden büyük bir geliş açısıyla geçtiğinde saplamaların yeniden yapılandırılması her bir modülün iki yarısı, iki uçtaki ön uç hibritleri tarafından bağımsız olarak okunur, bu da sensör yarımları ve dolayısıyla sensör yarımları arasındaki iletişimi engeller (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Düz bir varil düzeninde, iç varil katmanlarının kenarındaki PS modülleri, modül üstü saplama bulma için büyük bir geometrik verimsizliğe sahip olacaktır

Bu, her mavi kalın çizginin bir sensörün yarısını temsil ettiği yakınlıktır gösterilmektedir. r cinsinden sensörler arasındaki mesafe milimetre mertebesinde. Modüllerin kenarındaki verimsizlik, z'deki ardışık modüller arasında büyük örtüşmeler uygulanarak telafi edilebilirken, iki sensör yarısı (kırmızı çizgilerle gösterilen) arasındaki verimsizlik düzeltilemez

Düz bir varil düzeninde (CMS Collaboration, 2015) böyle bir etki, birinci varil tabakasının kenarında %30'dan daha büyük olan saplama bulmanın geometrik bir verimsizliğine dönüşür. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için CMS, PS modülleri ile doldurulmuş ilk üç namlu katmanının, tüm namlu uzunluğu boyunca gelen parçacıklara neredeyse dik olan, kademeli olarak eğimli modüller içerdiği yenilikçi bir düzen geliştirmiştir (Şekil 2.20). Namlunun dış üç katmanında saplama bulma verimsizliğinin etkisi, z boyunca 2S modüllerinin daha küçük geliş açıları (geliş açısı sensör normaline göre ölçülür), bu yarıçaplarda daha küçük sensör aralığı ve çift uzunluk nedeniyle çok daha az şiddetlidir.

### 2.3.6 Dahili izleyici (The inner tracker)

Inner tracker, piksel modülleri ile donatılacaktır. Yüksek parlaklıkta çalışma, Inner tracker'ın tasarımı için sensörlerin ve okuma elektronisinin radyasyon toleransı ve ayrıca ön uç boru hatlarında depolanacak ve yüksek tetikleme hızlarında gönderilecek veri hacmi açısından aşırı zorluklar anlamına gelir.  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$  veya  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  piksel boyutlarına bölünmüş ince silikon sensörlerin (100–150  $\mu\text{m}$  kalınlıkta), gerekli

radasyon toleransını sergilemesi ve dedektör çözünürlüğü, doluluk ve yoğunluk açısından istenen performansı vermesi beklenir. Sonuç olarak, küçük hücre boyutuna ve düşük algılama eşiğine sahip bir okuma çipi gereklidir. ATLAS ve CMS, 65 nm CMOS teknolojisinde 2500  $\mu\text{m}^2$  hücre boyutuna sahip bir piksel çip tasarlamak için RD53 (RD53, 2013) çerçevesinde ortak bir geliştirme gerçekleştirmektedir. Böyle bir konfigürasyonla, dedektör çözünürlüğü, radasyon hasarına göre, kesinliğin 300  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki bir sensörde yük birikiminin kuyruklarını yeniden oluşturma yeteneğine bağlı olduğu mevcut dedektörden çok daha sağlamdır.

Şekil 2.20'de gösterildiği gibi, İç İzleyici, dört silindirik katmana sahip bir namlu kısımdan ve her ileri yönde sekiz küçük artı dört büyük disk benzeri yapıdan oluşur. Kabul,  $|\eta| \approx 4$ . Inner Tracker'ın tasarımı, CMS ışın borusunu çıkarmadan dedektörü çıkarma ve yerleştirme olasılığını gerektiren, uzun bir yıl sonu teknik duruşunda bozulmuş parçaların değiştirilmesine izin verecektir. Bu, dedektörün eğimli raylara yerleştirilmesiyle sağlanır ve Dış İzleyici ile İç İzleyici arasındaki radyal sınırdaki bir adım gerektirir (Şekil 2.20). Sınır,  $|z| < 1600\text{mm}$  bölgesinde yaklaşık  $r = 200\text{ mm}$ 'de tutulur ve  $|z| > 1600\text{mm}$  için yaklaşık  $r = 300\text{mm}$ 'ye yükseltilir. Outer Tracker uç kapağının son üç çift diski, ilk iki çift diskten (Şekil 2.20) üç halka daha azdır ve Inner Tracker çift diskleri  $|z| > 1600\text{ mm}$ , izleme kapsamını korumak için daha yüksek bir yarıçapta başlar ve daha büyüktür.

Faz-2 Inner Tracker, giriş durumu izleme cihazı için ayrılan perdelerle yakın küçük bir alan dışında, izleyiciyi  $|z|$  boyunca çevreleyen mekanik yapılara (perdeler) kadar mevcut tüm hacmi kullanır. Parlaklık ölçümü, yüksek  $z$  uzantısını oluşturan dört büyük çift diske ek işlevsellik olarak entegre edilecektir.

## **2.4. Radyasyon Hasarları**

### **2.4.1 Okuma elektronikindeki radyasyon etkileri**

Işınlama nedeniyle okuma çipleri üzerinde hem geçici hem de uzun vadeli etkiler gözlemlenir. Kısa vadeli etkiler her zaman yüksek anlık parlaklığa bağlıdır. Bu miktar, iyonlaştırıcı parçacıkların oranını azaltan bir dolgu üzerinde bozulmaya devam eder.

Parçacık hızındaki dalgalanma, tutarlı ölçümleri ve detektör çalışmalarını zorlaştırır. Uzun vadeli etkiler, aksine, bütünleşmiş parlaklık ile parametrelendirilir.

#### 2.4.2 Geçici etkiler

Tek olay bozulmaları (SEU), okuma çiplerinde veya belirteç bit yöneticilerinde bir kontrol kaydının durumunu ters çeviren iyonlaştırıcı parçacıkların neden olduğu geçici etkilerin tipik bir örneğidir. Bir SEU, veri alımını bozabilir veya kesintiye uğratabilir, bu da genellikle eksik kümeler nedeniyle küme verimliliğinin düşmesine neden olur. Ölçülen kümelerin özellikleri değişmeden kalır. Okuma ön ucu tarafından otomatik olarak veya veri kalitesi izlemeden gelen geri bildirim dayalı olarak manuel olarak tetiklenen tüm kayıtların yeniden programlanması bu soruna çözüm sağlar.

Piksel isabetleri, global CMS tetikleme sisteminden bir çarpışma olayının okunup okunmayacağına dair bir karar gelene kadar her bir çift sütunla ilişkili arabelleklerde saklanır. Yüksek parçacık hızlarında, arabellekler dolabilir ve tüm sütunlarda piksel isabetlerinin kaybolmasına neden olabilir. Merkez bölgede, daha küçük küme boyutundan dolayı kümenin tamamını kaybetme olasılığı daha yüksektir. Daha büyük sözde hızlılıkta, kümeler çoklu çift sütunlar boyunca yayılır. Bu kümeler kaydedilir, ancak genellikle küçültülmüş boyut ve yük ile. Tam yol rekonstrüksiyonundan sonra, küme isabet etkinliği, beklenen kesişme noktasının 500 µm yarıçapı içinde karşılık gelen kümelerin bulunduğu sensörlerin referans bölgelerinden geçmesi beklenen parçacıkların kesri olarak ölçülür. Altta yatan mekanizmanın doğrudan incelenmesi mümkün değildir, simülasyondan yaklaşık kayıp oranları çıkarılabilir.

Bir çift sütunda birden çok piksel isabetinin varlığı, piksellerdeki okuma eşliğini kaydırır. Oluşumlarının parçacık hızıyla korelasyonunun ötesinde, kolonlar boyunca Lorentz sürüklenmesinin neden olduğu yük paylaşımı tarafından çoklu piksel isabetleri de üretilir. Yükü eşik değerlerine yakın olan eksik piksel isabetleri, küme boyutunun ve yükün azalmasına da yol açar.

Yüksek parçacık oranı, okuma çiplerinin güç tüketimini artırır ve dolayısıyla çalışma sıcaklığını yükseltir. Şarj kazancı kalibrasyonunun sıcaklığa bağlı olduğu gözlenir.

Yukarıdaki etkilerin bir kombinasyonu hem küme büyüklüğünü hem de yükü etkiler, dolayısıyla bu niceliklerin varyasyonundan tekil etkiler hakkında kesin sonuçlar çıkarmak zor olur.

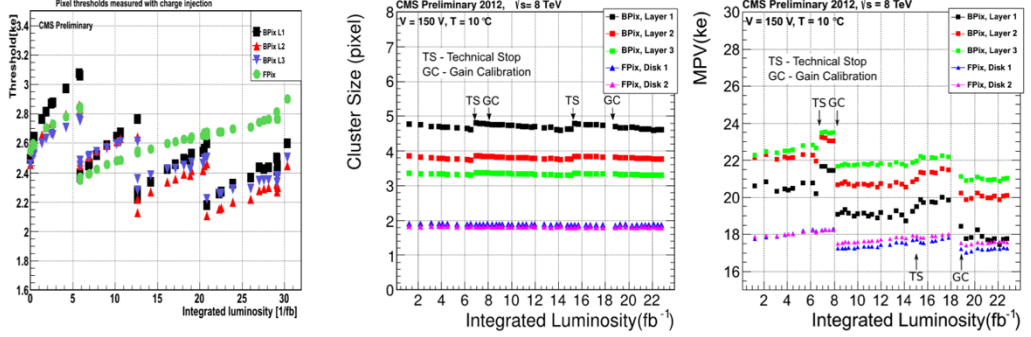
### 2.4.3 Kümülatif etkiler

LHC tarafından sağlanan bütünleşmiş parlaklık, okuma çiplerindeki uzun vadeli, kümülatif radyasyon etkilerini parametreleştirmek için kullanılır. 2010 ve 2012 yılları arasında elde edilen radyasyon dozunun, piksel detektörünün en içteki katmanında yaklaşık 26 kGy olduğu tahmin ediliyor.

Şekil 2.24'teki sol grafik, piksel okuma eşiğinin gelişimini göstermektedir. Her katmandaki eşikler, piksel hücrelerine artan miktarlarda test yükleri enjekte edilerek ve piksellerin yarısı için etkinlik açma noktasına karşılık gelen miktar belirlenerek ölçülür. Grafikteki süreksizlikler, eşik yeniden düzenlenmesinin ne zaman yapıldığını ortaya koyuyor: her veri toplama yılının başında ve teknik duraklamalar sırasında. Daha düşük bir eşik, artan küme boyutuna yol açar, bu da ikinci çizimdeki (Şekil 2.24) sıçramaları açıklar, ancak büyüklükleri daha sonraki kalibrasyonların daha düşük eşiklere ulaştığı gözlemlendiği gerçeğiyle tutarsızdır. Böyle bir etki, enjekte edilen test yükünün birimi değişirse mümkün olabilir. Buna karşılık, kalibrasyonlar arasında gözlemlenen eşikte kademeli artış küme boyutunun azalmasına neden olmalıdır. Böyle bir eğilim namli katmanlarında biraz görünürken, 2012'de eşiklerin yeniden ayarlanmadığı uç kapak disklerinde (FPix) hiç görünmüyor. Aksi takdirde, eşiklerin yavaş artışı, güç kaynağında ölçülen artan analog akımla ilişkilendirilebilir.

Küme yükünde de uzun vadeli değişimler gözlenir. Şekil 2.24'teki üçüncü grafik, ortalama küme yüküne bir Landau uyumunun en olası değerini göstermektedir. Her ani artış, her eşik yeniden ayarlamasından sonra artan küme boyutundan kaynaklanmaktadır. Her ani düşüş, yeni bir kazanç kalibrasyonu uygulandıktan sonra görünür. Her eşik kalibrasyonunun küme boyutunu eski haline getirdiği gösterildiğinden, ortalama kazanç otomatik olarak yeniden ayarlanmalıdır. Bunun yerine gözlemlenen genel negatif eğilim, kazanç kalibrasyonunda bir değişiklik

anlamına gelebilir. Kazanç kalibrasyonu, bir ADC değerini enjekte edilen bir test yüküyle ilişkilendirir.



Şekil 2.24 Çalışma 1'in bütünleşmiş parlaklığını kapsayan piksel okuma eşiğinin (solda) grafiği, 2012'de alınan veriler 6,1 fb<sup>-1</sup>'de başlar. Diğer iki çizim, 2012'de küme boyutunun gelişimini (ortada) ve küme yükünün Landau uyumunun en olası değerini (sağda) 2012'de bütünleşmiş parlaklığın fonksiyonu olarak göstermektedir

#### 2.4.4 Dedektör performansı

Vuruş etkinliğinin yanı sıra küme konumu çözünürlüğü, piksel dedektörünün en önemli performans parametresidir. 1. katman en yüksek radyasyonu deneyimlese de iz etki parametresi çözünürlüğünü belirlemede en önemli rolü oynar ve bu daha sonra birincil etkileşim tepe noktası ve ikincil bozunma tepe noktası çözünürlüklerine dönüşür. İkincisi, CMS'nin ağır çehni etiketleme yeteneklerini belirler.

Namlu pikselinin çözünürlüğü, izlerin enine momentumunu korurken ve incelenmekte olan katmandaki isabeti uyumdan çıkarırken isabet üçlülerini yeniden oluşturulmuş izleriyle yeniden yerleştirerek ölçülür. Vuruşlar radyal olarak geçmede kullanıldığından, katman 2'deki ölçüm, katman 1'dekinden daha kesindir. Çözünürlük, diğer iki vuruşun uyumundan yayılan hataları çıkardıktan sonra artık dağılımın genişliğidir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışma, piksel yeniden yapılandırma çalışma grubunun aktif yardımı ile CMS iş birliğinin C++ simülasyonu ve yeniden yapılandırma çerçevesi içinde gerçekleştirilecektir. Dedektör simülasyon verileri, çeşitli radyasyon hasarı seviyelerinde üretilecektir. Performansı, en içteki katmanın değiştirilmesinden hemen önce 2018'de piksel dedektörü tarafından kaydedilen çarpışma verileriyle karşılaştırılacak. Dahili belgelerde kümeleme adımından önce isabetli piksel dizisinde bir düzeltme yöntemi önerilmiş ve CPU ve GPU yeniden yapılandırma iş akışlarında uygulanmıştır. Düzeltmenin hem radyasyondan zarar görmüş hem de etkilenmemiş kümeler üzerindeki etkisi ve son olarak yüklü parçacık yörüngelerinin yeniden yapılandırılması üzerindeki etkisi incelenecektir.

Bu çalışmada, Wigner Araştırma Merkezi'ne ait ui3\_sshfs arayüzü kullanılmıştır. Bu sisteme bireysel ID ve şifre ile giriş yapılır. Bu sistem, Linux işletim sistemi özelliğindedir ve kişisel bir bilgisayar gibi çalışır.

Bilgisayarın terminalinden sisteme erişildiğinde, başlangıçta CMSSW yazılımı ile ilgili belirli alt programlar indirildi. Bunu takiben, vektör uzantısı kodlama dosyası olarak bilinen bir veri yapısı dosyası oluşturuldu. Bu aşamada geliştirilen kodlardan yola çıkarak Plotter.cc ve Drawer.cc olmak üzere iki ek kod dosyası yazılmıştır. Plotter.cc, istenen grafiklerin belleğe atanmasında, Drawer.cc ise atanan grafiklerin çizilmesine yardımcı olur. Ayrıca elde edilen bütün grafikler nesne yönelimli programlama temelli bir istatistik grafik paketi olan ROOT ile yapılmıştır. Çalışmanın adım adım metodolojisi Ek-1'de verilmiştir.

Tez çalışmasının sonuçları çalışma grubunda sunulacak ve CERN belge sunucusunda halka açık bir notta belgelenecektir. Sonuçların, referans verilen bir dergide daha büyük bir çalışmanın parçası olarak CMS Tracker iş birliği tarafından yayınlanması bekleniyor.

#### 4. BULGULAR

CMS Phase-1 piksel dedektörünün düzeni,  $|\eta| < 2.5$ , örüntü tanımayı ve iz yeniden yapılandırmayı iyileştirdi ve isabet kayıplarıyla başa çıkmak için fazlalık ekledi. LS1 sırasında, orijinal giriş borusunun 30 mm yarıçapına kıyasla 23 mm daha küçük yarıçapa sahip yeni bir giriş borusu CMS'ye yerleştirildi. Bu, CMS Phase-1 piksel dedektörünün en içteki katmanının, orijinal piksel dedektörüne kıyasla etkileşim noktasına daha yakın yerleştirilmesine izin verdi. CMS Faz-1 piksel dedektörü, 29, 68, 109 ve 160 mm yarıçaplarında dört eş merkezli varil katmanından (L1-L4) ve her iki uçta 291, 396 ve dedektörün merkezinden 516 mm. CMS Phase-1 piksel dedektörünün düzeni, Şekil 4.1'deki orijinal piksel dedektörünün düzeniyle karşılaştırılmıştır. CMS Phase-1 piksel dedektörünün toplam silikon alanı  $1,9 \text{ m}^2$  iken, orijinal piksel dedektörünün toplam silikon alanı  $1.1 \text{ m}^2$  idi.

CMS Faz-1 piksel dedektörü, 1856 parçalı silikon sensör modülünden yapılmıştır, burada 1184 modül, namlu piksel dedektöründe (BPIX) ve 672 modül, ileri diskler (FPIX) için kullanılır. Her modül, 16 okuma çipine (ROC) bağlı  $160 \times 416$  pikseli bir sensörden oluşur. Toplamda 124 milyon okuma kanalı vardır.

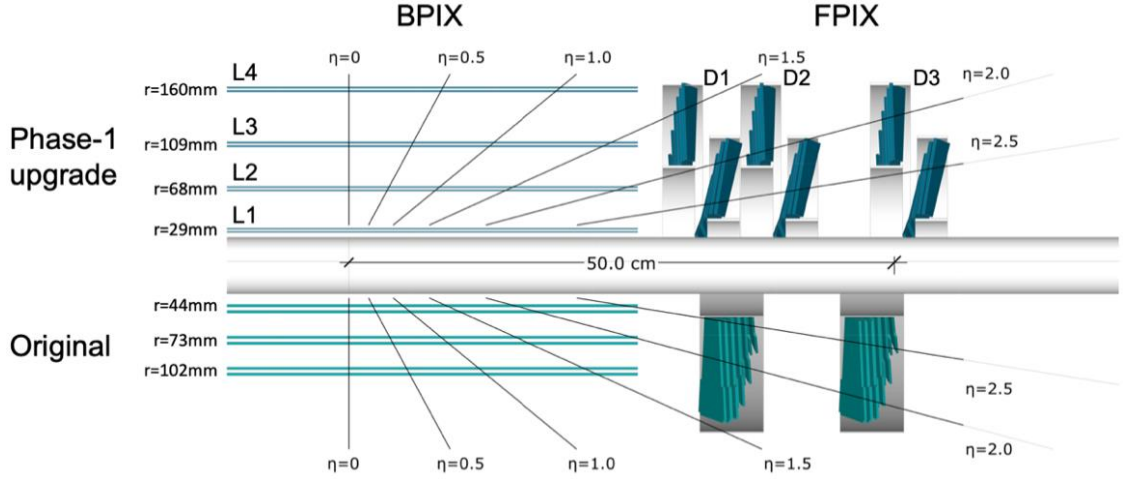
CMS Faz-1 piksel dedektörünün ana boyutsal parametreleri Çizelge 4.1'de gözden geçirilmiştir. BPIX ve FPIX dedektörleri, hem mekanik hem de elektriksel olarak bağımsız bileşenlerdir. BPIX dedektörü, her biri dört katmana bölünmüş (yarım kabuk olarak adlandırılır) toplam uzunluğu 540 mm olan iki yarım namludan (Şekil 4.2) oluşur. Benzer şekilde, FPIX dedektörü, 45 ila 161 mm radyal kapsama sahip on iki yarım diskten (her bir tarafta altı yarım disk) monte edilir. Yarım diskler, sırasıyla 22 ve 34 modülü destekleyen iç ve dış yarım halkalara bölünmüştür. Dedektörün mekanik olarak bağımsız yarıllara bölünmesi, ışın borusu yerindeyken piksel dedektörünün CMS dedektörünün içine kurulmasını mümkün kılar.

Çizelge 4.1 Dört BPIX katmanı ve altı FPIX halkası için ortalama r, z konumlarının ve modül sayısının özeti

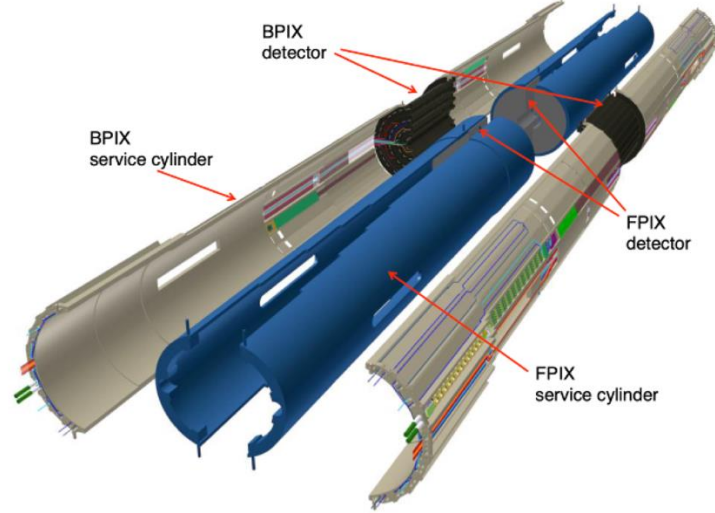
BPIX			
Layer (Katman)	Yarıçap (mm)	z pozisyonu (mm)	Modül Sayısı
L1	29	-270 ile +270 arası	96
L2	68	-270 ile +270 arası	224
L3	109	-270 ile +270 arası	352
L4	160	-270 ile +270 arası	512
FPIX			
Disk	Yarıçap (mm)	z pozisyonu (mm)	Modül Sayısı
D1 iç halka	45-110	+/- 338	88
D1 dış halka	96-161	+/- 309	136
D2 iç halka	45-110	+/- 413	88
D2 dış halka	96-161	+/- 384	136
D3 iç halka	45-110	+/- 508	88
D3 dış halka	96-161	+/- 479	136

BPIX ve FPIX dedektörlerinin her biri, şekil 4.2'de gösterildiği gibi, okuma ve kontrol devrelerini tutan ve dedektörün güç hatlarını ve soğutma tüplerini yönlendiren dört adet servis yarım silindiri tarafından sağlanır. BPIX dedektörü, mekanik olarak bağımsız iki yarıya bölünmüştür, her ikisi de bir yarım dedektör ve iki servis yarım silindirinden oluşur. FPIX dedektörü, her biri bir servis yarım silindirine yerleştirilmiş üç yarım diskten oluşan, mekanik olarak bağımsız dört çeyreğe bölünmüştür.

CMS Faz-1 piksel dedektörünün, orijinal sistemle aynı mekanik zarfa sığması ve mevcut hizmetleri kısmen yeniden kullanması gerekir. Bu, yeni sistemin tasarımına güçlü kısıtlamalar getirdi. Özellikle, artan veri hacmini CMS Faz-1 piksel dedektöründen mevcut optik fiberler yoluyla veri toplama (DAQ) sistemine iletmek için daha yüksek bant genişliğine sahip elektroniklere ihtiyaç vardır. CMS Faz-1 piksel dedektörü, orijinal piksel dedektöründen 1,9 kat daha fazla kanala sahip olduğundan, güç tüketimi buna bağlı olarak artar. CMS Faz-1 piksel dedektörü, güç kaynağı raflarından CMS miknatıs deliği içindeki izleyici dedektör yama paneline giden mevcut kabloları yeniden kullanırken modüllere gerekli akımı sağlamak için DC-DC güç dönüştürücüleri kullanır.



Şekil 4.1 Boyuna görünümde orijinal dedektör düzenine kıyasla CMS Faz-1 piksel dedektörünün yerleşimi



Şekil 4.2 Faz-1 BPIX ve FPIX dedektörlerinin, okuma ve kontrol devreleri ile güç ve soğutma hatlarını tutan servis yarım silindirleri ile birlikte bir çizimi.

Küme iyileştirme algoritmasını yapmadan önce CMS Dedektör iyileştirme ile ilgili basit kodlar ve alt yazılımlar indirildi. Bu kodlar ve yapılan bütün ilgili çalışmalar C++ dilindedir. Bu kodlar ROOT aracılığı ile çalıştırıldıktan sonra kümeler ve dedektör ile ilgili özellikler edinildi.



mod.det terimi alt-dedektörün kimliğini temsil eder

mod.det==0 → BPIX

mod.det==1 → FPIX

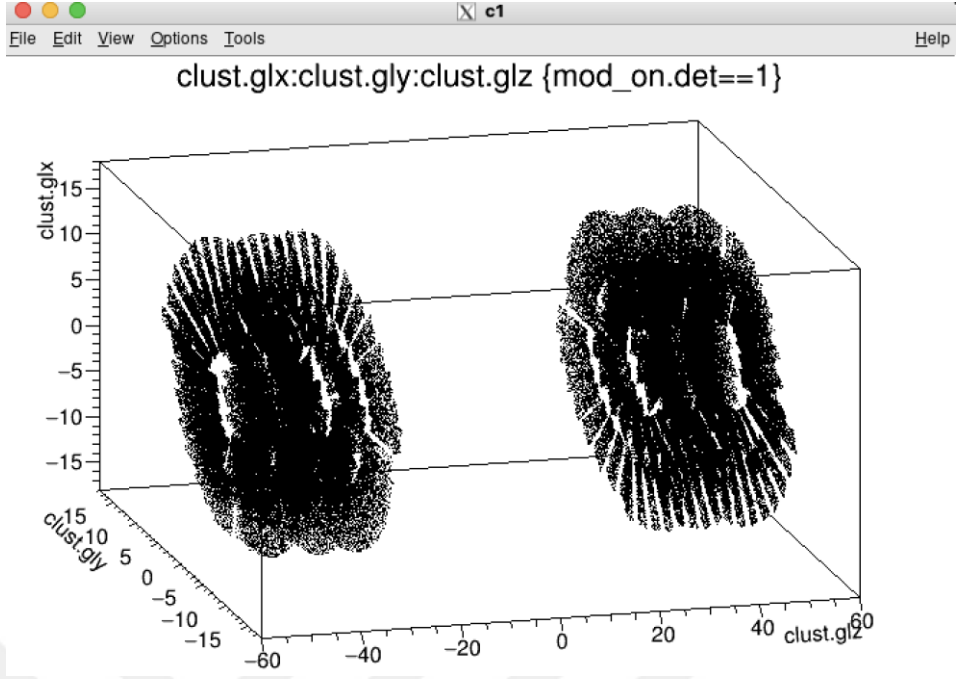
mod\_on.side dedektörün bir yarısı (FPIX ve BPIX için)

mod\_on.shl dedektörün bir çeyregi (FPIX ve BPIX için)

Çizelge 4.2 Pksel alt dedektörlerinin parametre grubu

FPIX Parametreleri	BPIX Parametreleri
Mod.ring	Mod_on.half
Mod.panel	Mod_on.flipped
Mod.module	Mod_on.layer
Mod.disk	Mod_on.ladder
Mod.blade	Mod_on.module
	Mod_on.sec

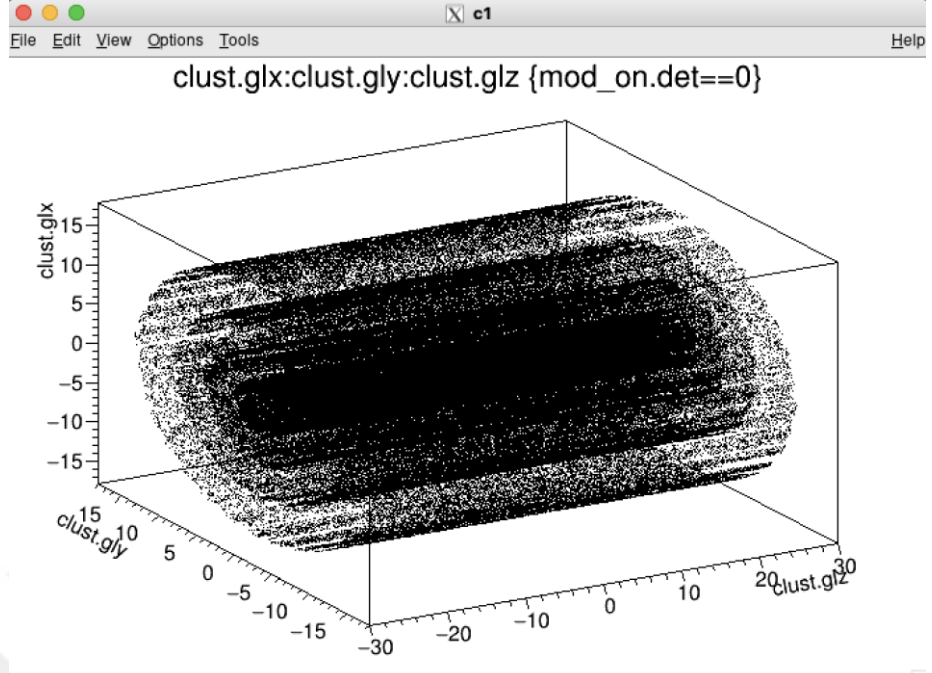
- x, y, kümenin merkezinin piksel koordinatlarındaki konumlarıdır. Sadece bir x, y grafiği yaparsak, dedektöre ışın hattı (global z) boyunca bakıyormuş gibi bakarız.
- lx, ly, her dedektör modülünün yerel referans çerçevesi içindeki kümelerin konumlarıdır.
- glx, gly, glz, CMS detektörünün koordinat sistemindeki kümelerin genel 3B koordinatlarıdır.
- sizeX ve sizeY, modülün içindeki kümelerin piksel cinsinden uzunluğudur ve boyut, kümedeki toplam piksel sayısını gösterir
- Yük, bir kümede ölçülen toplam yüküdür. Geçiş yapan parçacığın sensörden geçerken sensör hacmi içinde biriktirdiği toplam yük miktarıdır. Yüklü bir parçacık, dedektörden geçtiğinde, nerede bir sensör varsa, bir küme ölçecektir ve bu dosyada (analizlerde) bu tür çok-çok parçacıklardan oluşan kümelerimiz bulunmaktadır.



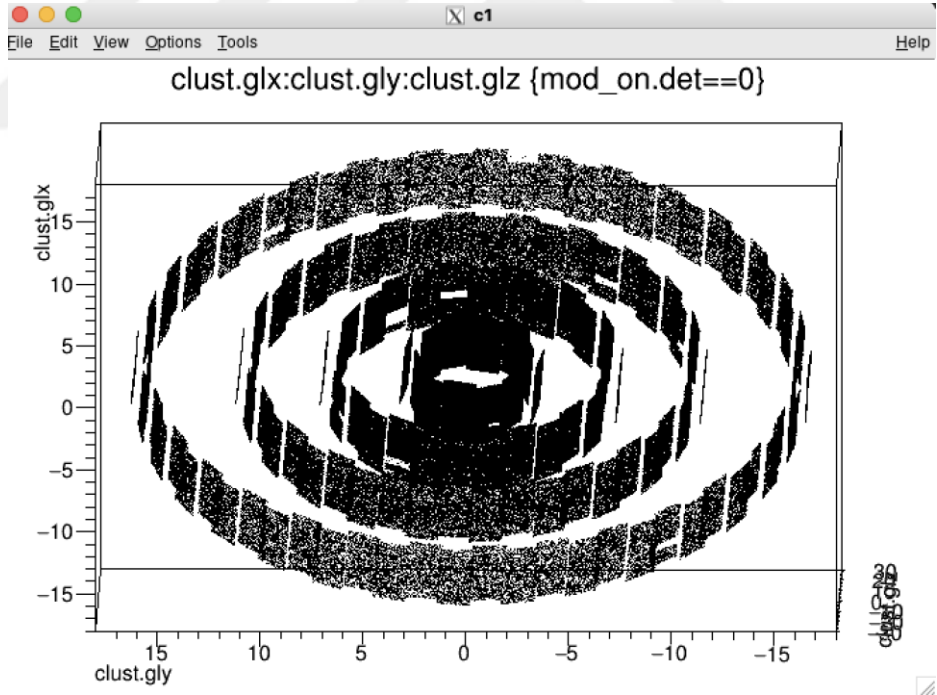
Şekil 4.4 FPIX dedektörünün şematik bir görünümü



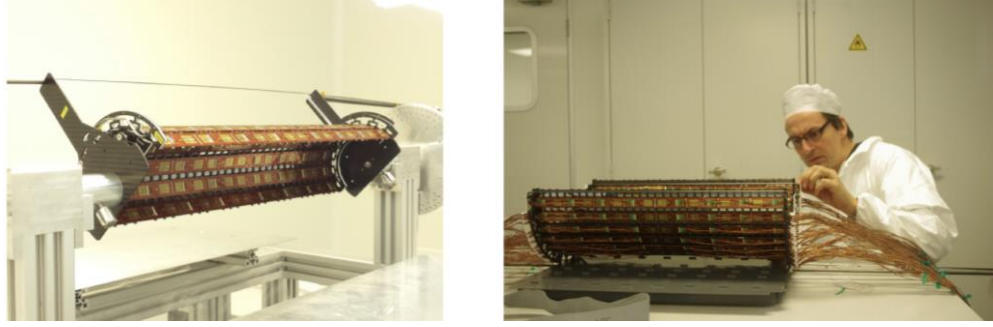
Şekil 4.5 FPIX dedektörünün gerçek bir görünümü



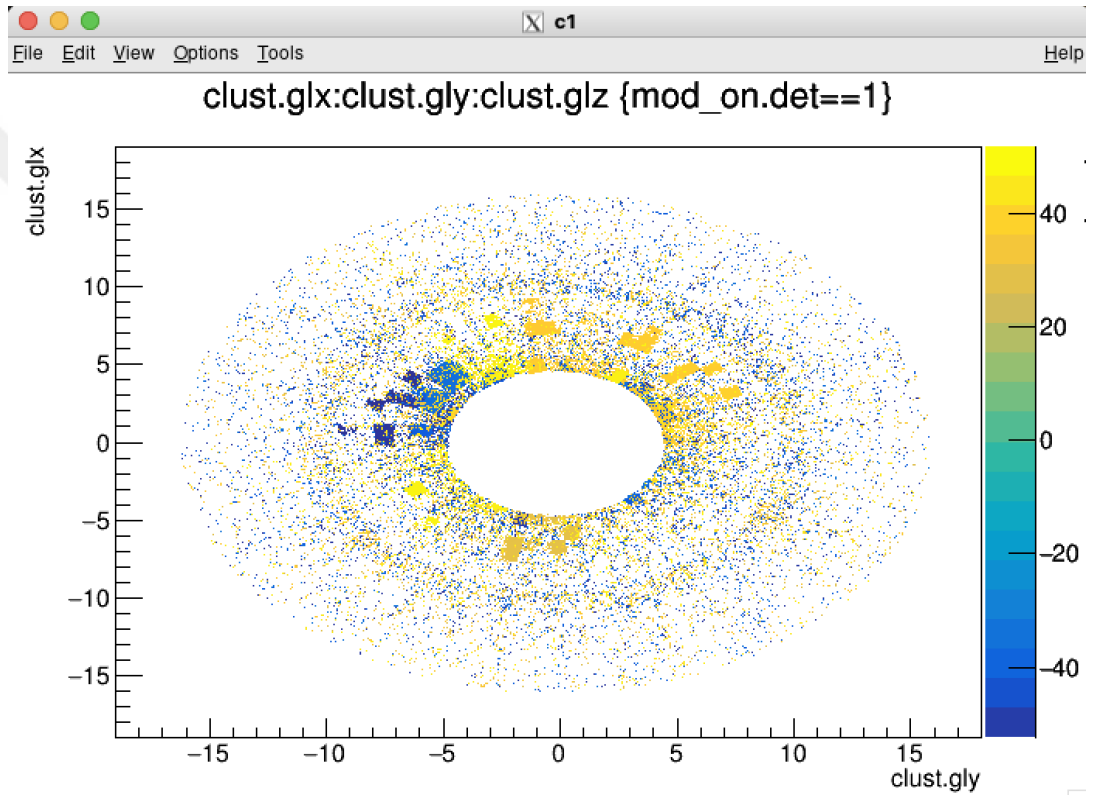
Şekil 4.6 FPIX dedektörünün kenarından şematik bir görünümü



Şekil 4.7 FPIX dedektörünün tepesinden şematik bir görünümü



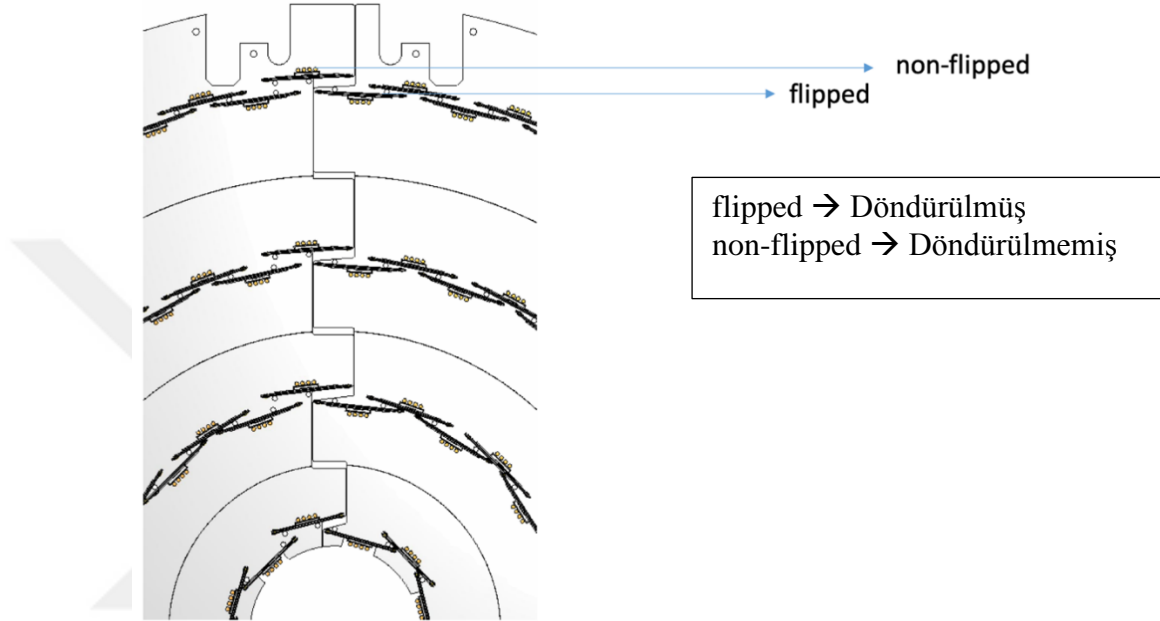
Şekil 4.8 BPIX dedektörünün gerçek bir görünümü



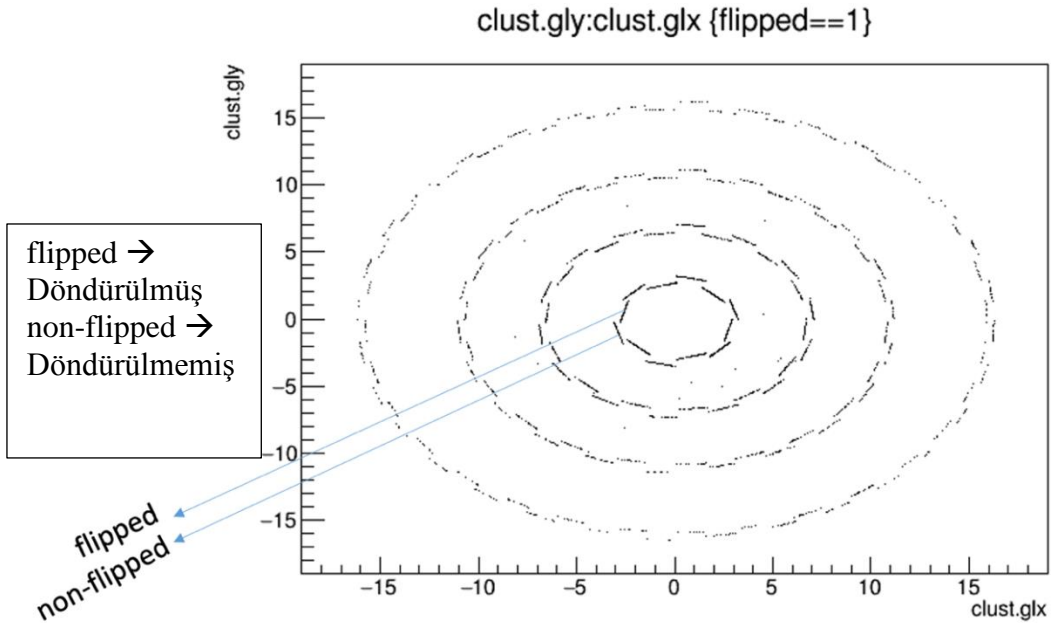
Şekil 4.9 BPIX dedektörünün renkli bir görüntüsü. Görüntüde bulunan noktalar kümeleri temsil etmektedir. Kümelerden daha büyük şekiller ise ROC'ları temsil etmektedir

BPIX alt-dedektörü 4 katmandan oluşmaktadır. İlk katmanda (en içte bulunan çember) diğer katmanlara oranla daha yoğun kümelenme bulunmaktadır. Bunun en temel sebebi en içteki katman olması ve etkileşim noktasını doğrudan görmesidir. Geride bulunan katmanlara ilerledikçe, küme yoğunluğu azalmaktadır. Yapılan çalışmalar ise ilk katman ile son katman (Modül-1 ve Modül-4) arasında karşılaştırma yaparak ilerlemektedir.

Dedektör geometrisi ile ilgili daha fazla detay vermek gerekirse, flipped ve non-flipped durumları mevcuttur. Dedektördeki katmanlarda bulunan sensörlerin bir ileri ve bir geri konulmasından ötürü aralarında bir açı farkı olmaktadır. Kümelerin algılanması ise bu küçük açı farkından dolayı değişmektedir. Küçük bir değişim olmasına karşın analizde ihmal edilmemektedir.



Şekil 4.10 Flipped ve non-flipped durumları



Şekil 4.11 Flipped ve non-flipped durumları

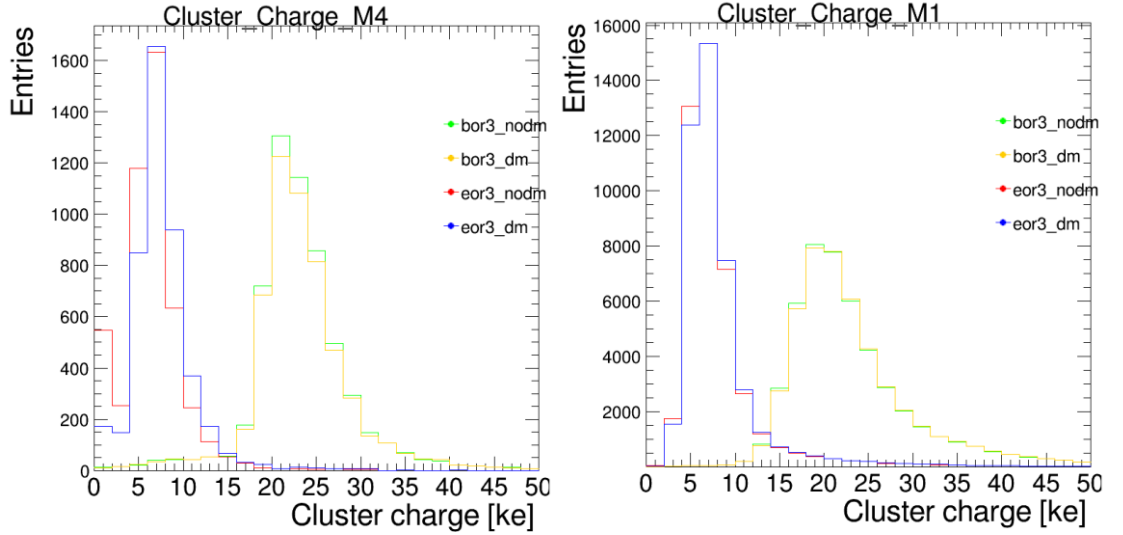
Flipped durumunun non-flipped durumundan daha küçük yarıçapı vardır.

Bunun haricinde dikkat edilmesi gereken koşullardan birisi de analizlerin müonlar ve antimüonlar üzerinden yapıldığıdır. Bu çalışmada müon ve antimüon ayrımı yapılmıştır. Müonlar ve antimüonlar birbirlerinin antiparçacıklarıdır. Bütün kimlik bilgileri aynı olmasına karşın yük durumları farklıdır. Müonlar pozitif yüke sahipken antimüonlar negatif yüke sahiptir. Bu yük farklılığı ise az da olsa bir sonuç farklılığına yol açmaktadır.

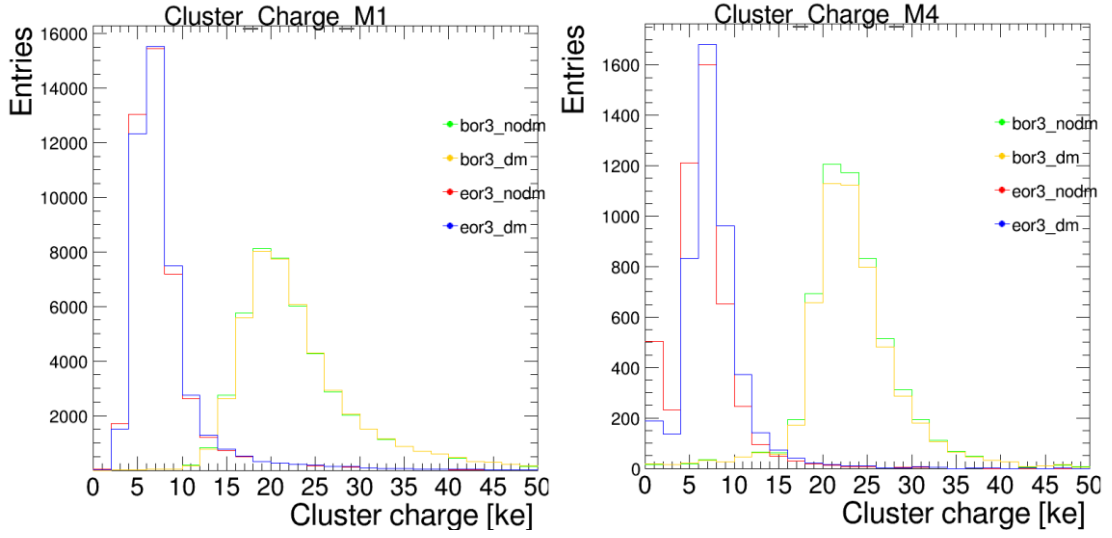
#### 4.2 Müonlar ve Antimüonlar İçin Küme Yüğü ve Küme Boyutu

Grafikleri okumada yardımcı olacak bilgiler:

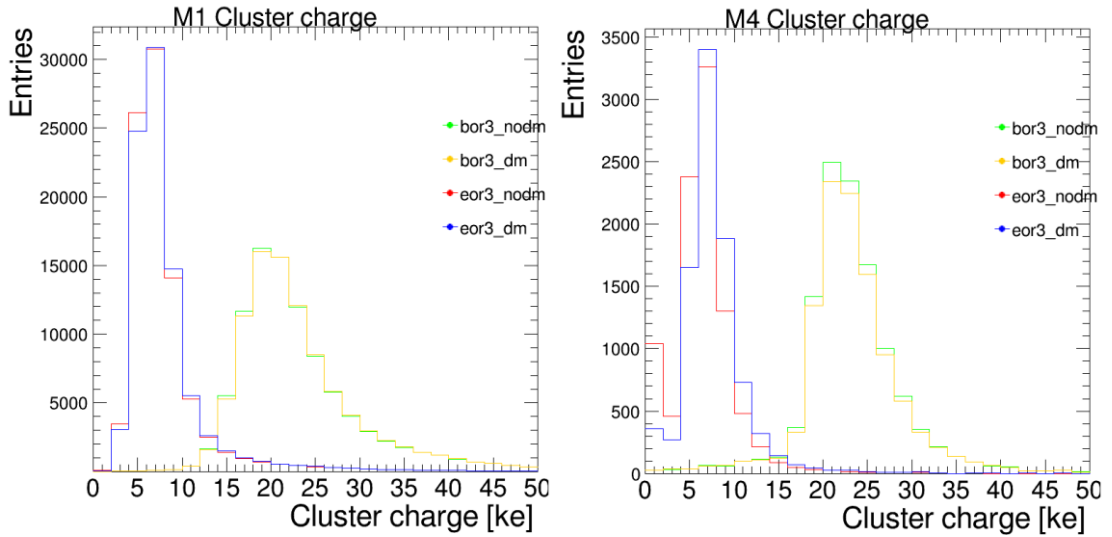
- Bor3\_nodm → Radyasyondan önce Digi Morphing uygulaması olmadan
- Bor3\_dm → Radyasyondan önce Digi Morphing uygulaması varken
- Eor3\_nodm → Radyasyondan sonra Digi Morphing uygulaması olmadan
- Eor3\_dm → Radyasyondan sonra Digi Morphing uygulaması varken
- M1 → Modül 1
- M4 → Modül 4



Şekil 4.12 trajTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) müonlar için küme yüğü



Şekil 4.13 trajTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimüonlar için küme yükü



Şekil 4.14 clustTree'de Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) küme yükü

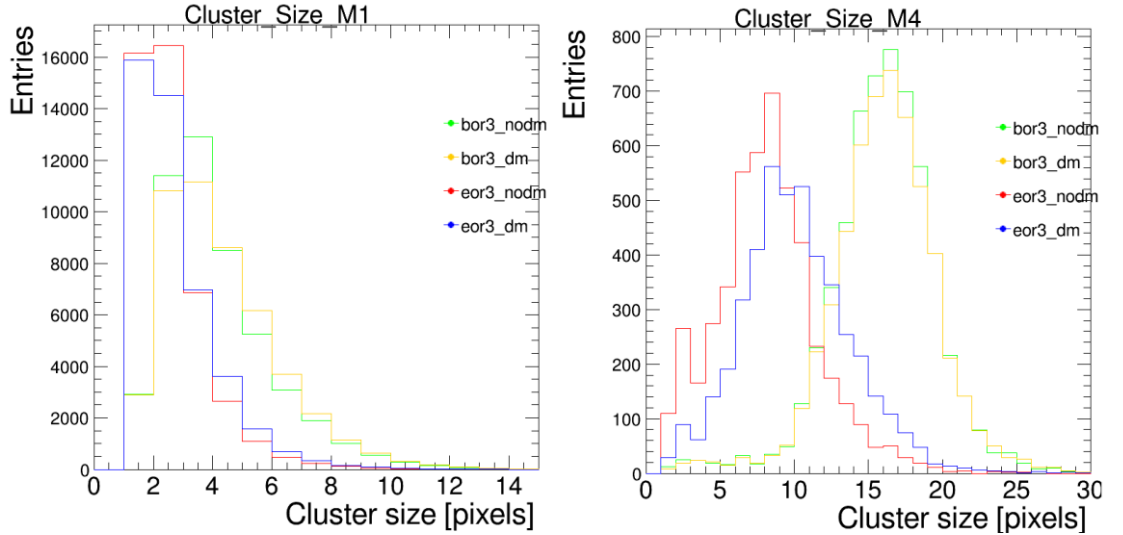
Modül-1 ve Modül-4: Modül-1 ile Modül-4 arasındaki fark 10 kat farklıdır. Grafiklerden de görüleceği üzere Modül-4 için olay sayısı (y-ekseni) Modül-1'e kıyasla 10 kat daha azdır. Olay başlangıcı ile bitişi arasındaki farka bakılırsa Modül 4 için bu iki etkinlik arasındaki fark daha azdır. Ancak Modül-1'de, radyasyon öncesi ve radyasyon sonrası girdi farkı çok daha fazladır. Bu büyük fark, piksel detektörünün geometrisinden kaynaklanmaktadır. Modül-1, etkileşim noktasına daha yakındır. Yani

Modül-1 radyasyonu Modül-4'e göre daha fazla hissediyor. Ayrıca bu durum müonlar ve antimüonlar için de aynı.

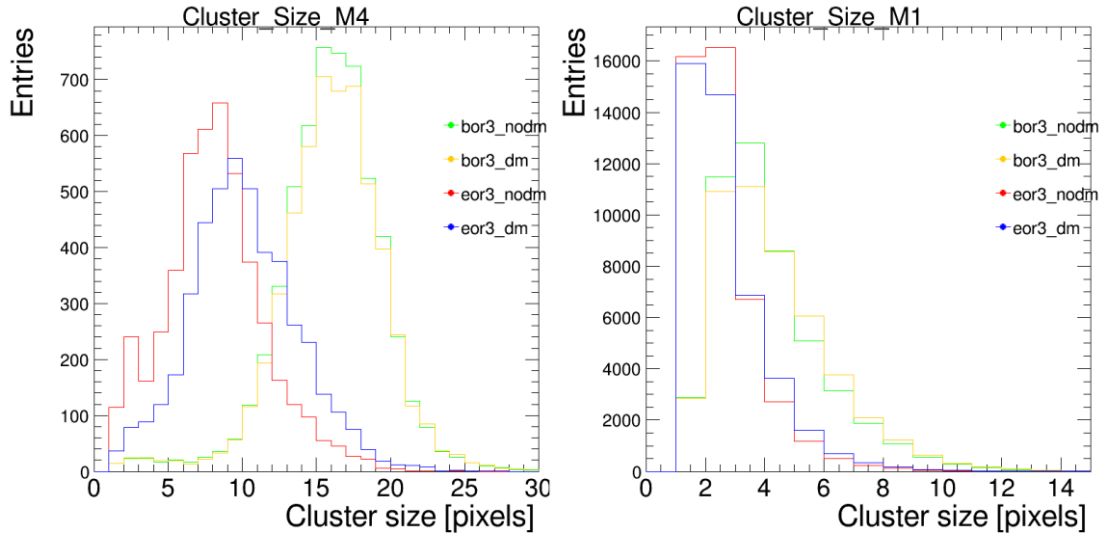
Modül-1: Olay başlangıcı ile olay sonu arasındaki bariz farkı görebiliriz. Radyasyondan sonra küme yükü azaltılmış, ancak giriş sayısı artırılmıştır. Çalışmanın başlangıcı ile bitişi arasındaki temel grafik farkı, kaybolan piksellerin daha sonra değiştirilmemesidir. Digi Morphing, bir kısmını onarmaya yardımcı olur. Ancak tam olarak yerini tutmaz.

Modül-4: Modül-1 ile aynı şeyi Modül-4 için de söyleyebiliriz. Dedektörün geometrisi nedeniyle daha az giriş vardır. Ancak grafikler benzer görünüyor. Ayrıca radyasyonun neden olduğu olay başlangıcı ile bitişi arasındaki farkı da hissedebiliriz. Eksik pikseller de bulunmaktadır. Bunu grafiklerin şekline anlayabiliriz. Digi Morphing uygulanmış olsa bile, hala eksik kümeler var.

Müonlar ve Antimüonlar: Müonlar ve antimüonlar arasında çok az fark vardır. Bunun nedeni müonun pozitif ve antimüonun negatif yükünün olmasıdır. Yani etkileşim sırasında zıt yönlerde hareket ederler ve sonunda farklı Lorentz açılarına sahip olurlar. Bu terimler aralarındaki küçük farklara neden olur.



Şekil 4.15 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) müonlar için küme boyutu



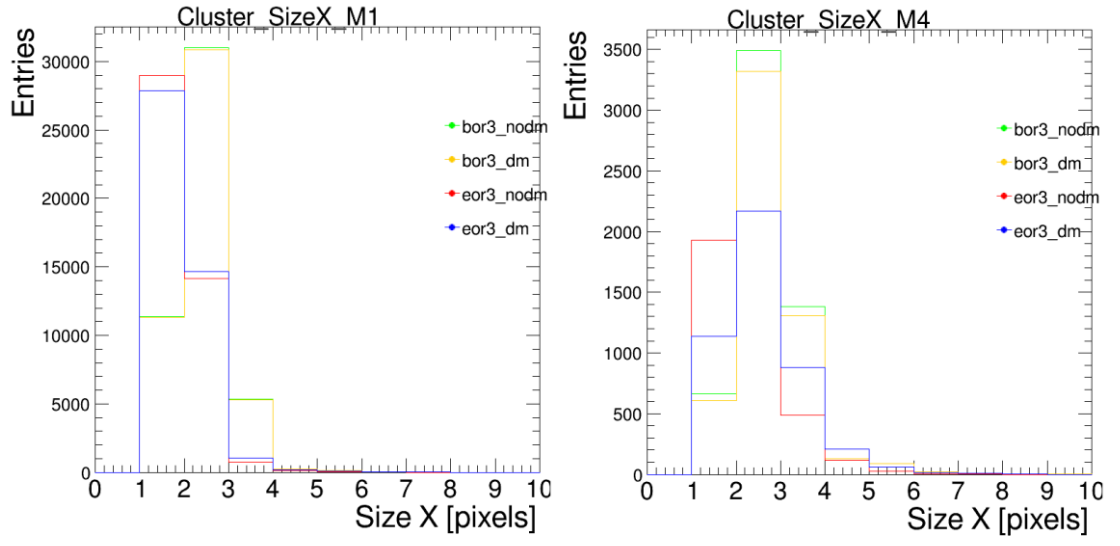
Şekil 4.16 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimüonlar için küme boyutu

Kümelere kaybolabilir, ancak var olmayanlar değiştirilemez. Görünmez kümeler, Digi Morphing kullanılarak görünür hale gelebilir.

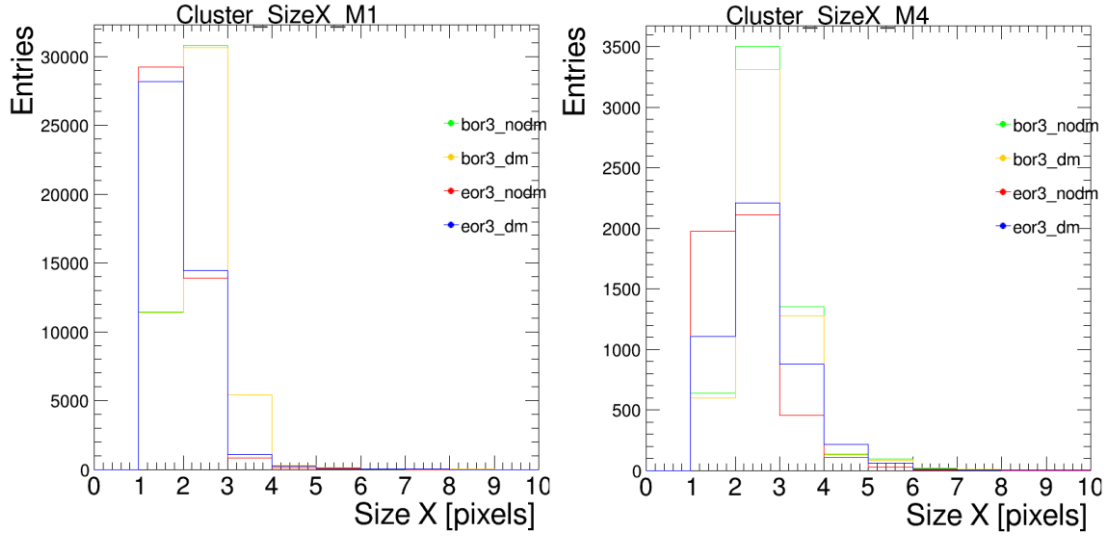
Küme yükü bölümünde bahsedildiği gibi, olaydan sonra kümelerin bir kısmı kaybolur. Bu radyasyonun bir etkisidir. Yüksek radyasyon bazı kümelere zarar verir. Bu nedenle, radyasyondan sonra küme boyutlarının küçüldüğünü görmek sürpriz değil.

Yine Modül-1 ile Modül-4 arasında çok büyük bir fark var. Bunun nedeni yine dedektörün geometrisidir. Ayrıca Modül-1'deki küme boyutu, çalışmanın hem başlangıcı hem de bitişi için Modül-4'ten daha küçüktür. Modül-4'ün konumu nedeniyle Modül-4'te daha fazla modül (yani daha fazla küme ve piksel) vardır. Farkın ana parametresi dedektörün geometrisidir.

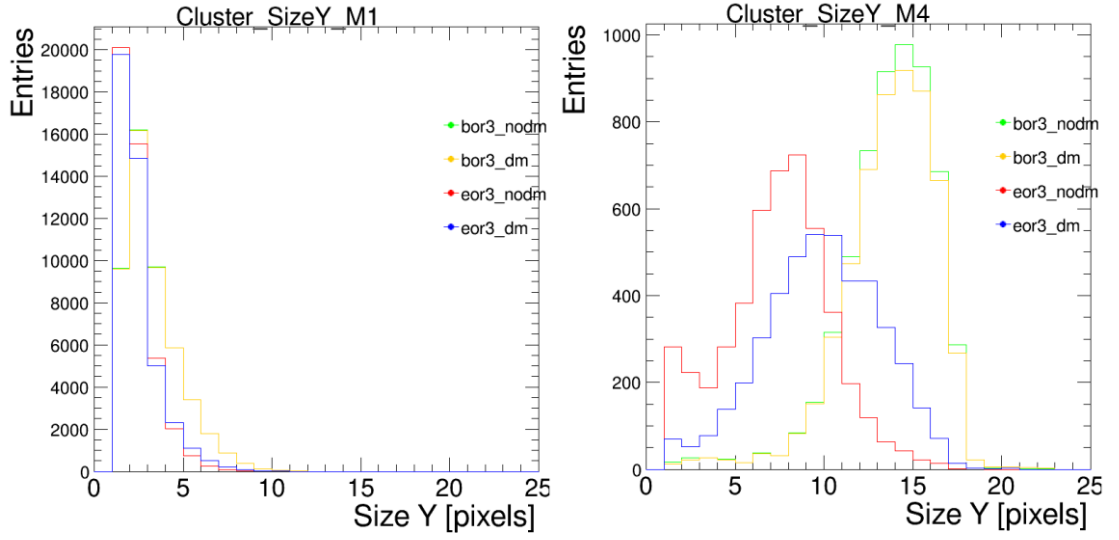
Bu grafiklerde boyut ve kazanç açısından bazı farklılıklar vardır. Radyasyondan sonra yük için daha büyük grafikler elde edilirken, boyut için daha küçük grafikler elde edilir. Her şeyden önce, yük ve boyut farklı şeylerdir. Radyasyondan sonra küme sayısı azalsa da kalan kümelere düşen yük miktarı artar. Bu durumda, büyük bir grafik elde ederiz. Ancak radyasyon kümeleri de yok ettiği için kümeler küçülür ve doğal olarak kümelerin boyutları da küçülür. Bu durumda, radyasyondan sonra, küme boyutu küçültülmüş grafiği elde ederiz. Eksik kümeleri Digi morphing ile değiştirmek istiyoruz. Ancak hepsini geri getiremeyiz. Ancak burada gözle görülür bir rekonstrüksiyon var.



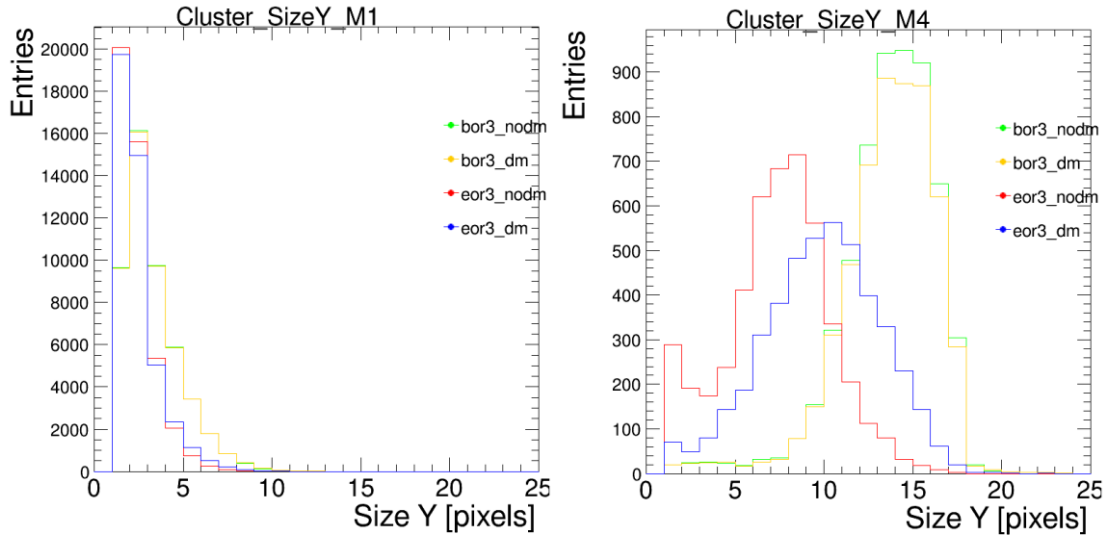
Şekil 4.17 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) müonlar için X-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.18 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimüonlar için X-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.19 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) müonlar için Y-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.20 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1) antimüonlar için Y-yönündeki küme boyutu

Grafiklere baktığımızda ışıınımdan sonra küme boyutlarının küçüldüğünü anlayabiliriz. Bu, bazı kümelerin kaybolduğu/kırıldığı anlamına gelir. Böylece radyasyon kümelerine zarar verdi. Modül-4 için küme boyutu Modül-1'den daha büyük. Ayrıca Modül-4'teki giriş sayısı Modül-1'den yaklaşık 20 kat daha az. Müonlar ve antimüonlar arasındaki karşılaştırma, küme yükü ile neredeyse aynı. Grafikler birbirine benzemektedir, ancak küçük farklılıklar da vardır. Bunun nedeni, müon ve antimüon'un farklı yüklerle sahip olmasıdır.

Ayrıca küme boyutX ve küme boyutY farklı grafiklere sahiptir. Çünkü farklı yerlere bakıyoruz. X boyutu x yönünde ve Y boyutu y yönündedir. Bakış açısı değişince kurgu da değişir.

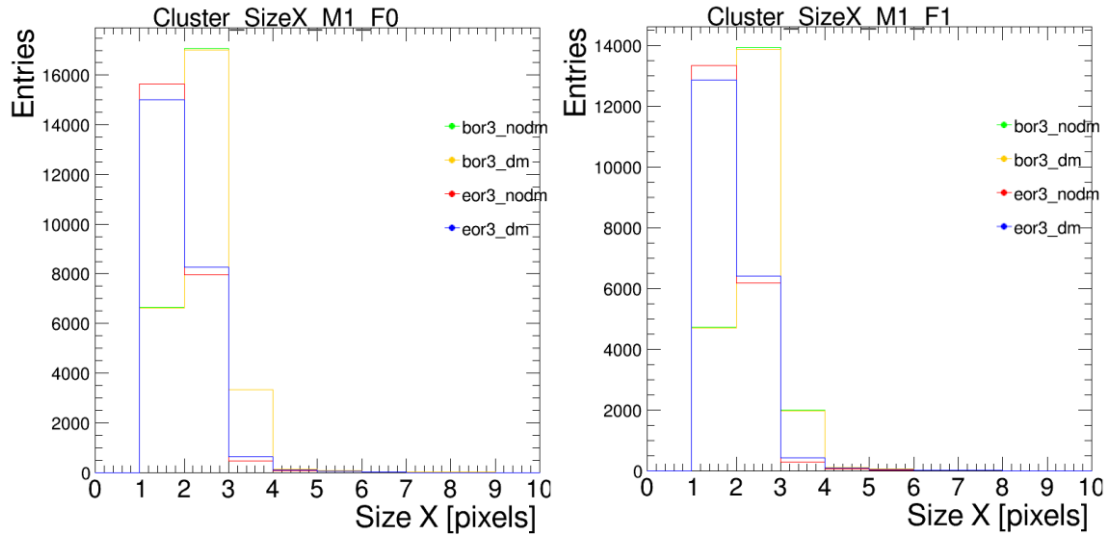
Olayın başında herhangi bir fark olmaması gerekiyordu. Müonlara baktığımızda, diji morphing uygulanmış ve diji morphing uygulanmamış durumlar arasında çok az fark görebiliriz. Bunlar bugs olarak adlandırılır.

Öte yandan, antimüonlar için, diji morphing uygulanmış ve diji morphing uygulanmamış durumlar arasında pek çok fark vardır. Diji morphing uyguladığımızda bazı kümeler kaybolduğunu grafiklerin x-ksenine bakarsak anlayabiliriz. Grafiklerin x-ksenlerinde meydana gelen küçülmeler bunun bir kanıtıdır.

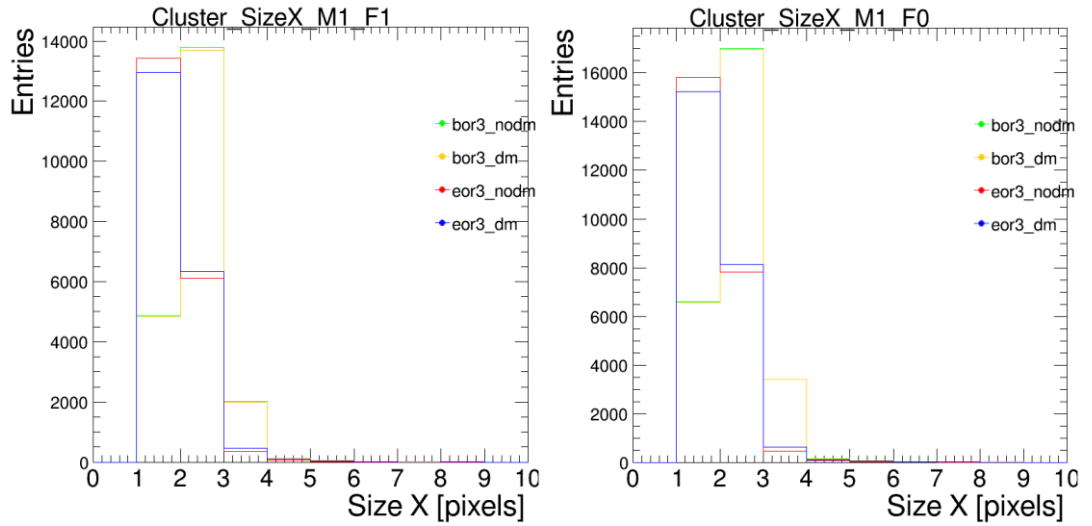
Ayrıca M1 ve M4 arasındaki fark küme özellikleridir. M4, M1'den daha fazla kümeye ve daha büyük kümeye sahiptir. 1D grafikler bu farkı destekler. Etkileşim noktasına en yakın modülün radyasyona diğerlerinden daha fazla etki ettiğini anlayabiliriz.

Yükün, müonlar ve antimüonlar arasındaki farkların ana nedeni olduğunu biliyoruz. Ayrıca, diji morphing uygulanmış durumda kümelerin kaybolamayacağını da bilmemiz gerekir. Ancak, diji morphing uygulamasından sonra bazı kümelerin kaybolduğunu görebiliriz. Kümelerden bazıları diji morphing uygulanmış çizimde daha büyüktür. Bunun nedeni, diji morphing uygulamasının hasarlı kümeleri doldurmaya yardımcı olmasıdır.

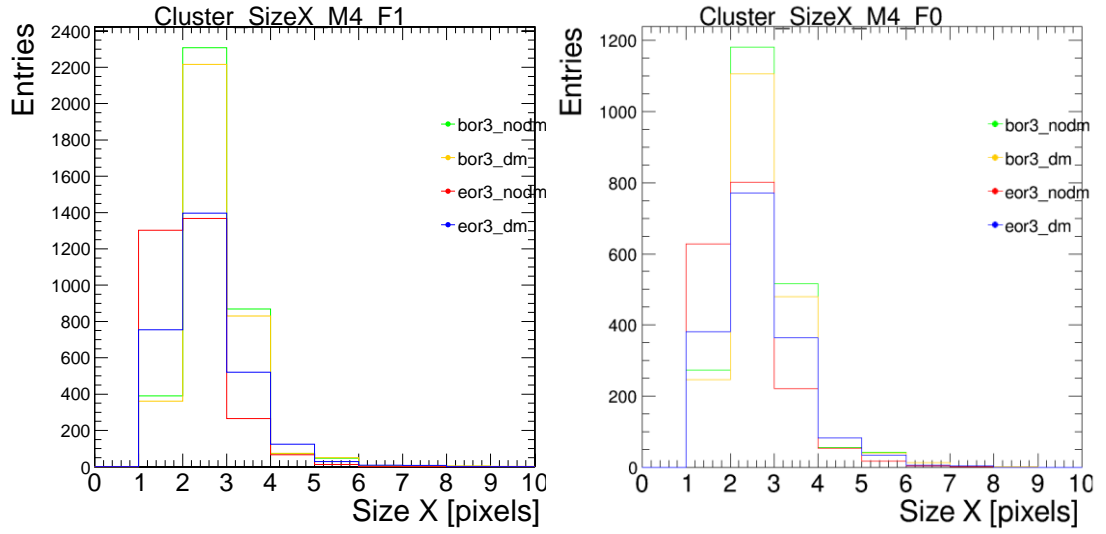
Radyasyondan önce daha fazla küme vardı, ancak diji morphing uygulaması olmayan radyasyondan sonra durumdaki halden daha kötü. Yani ideal olay örgüsü, diji morphing çalışmanın sonudur. Ayrıca müonlar ve antimüonlar arasındaki fark aynıdır.



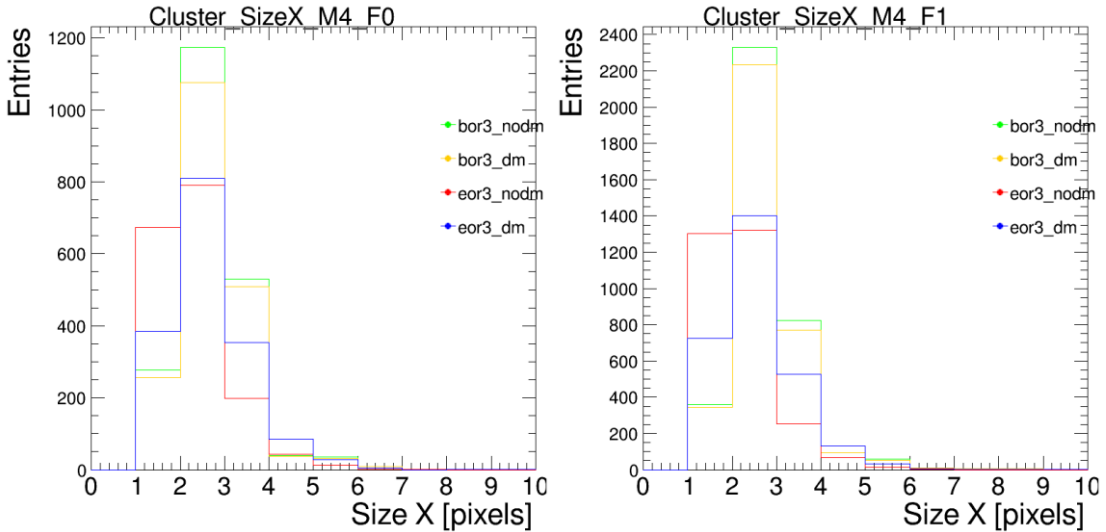
Şekil 4.21 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) müonlar için X-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.22 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) antimüonlar için X-yönündeki küme boyutu

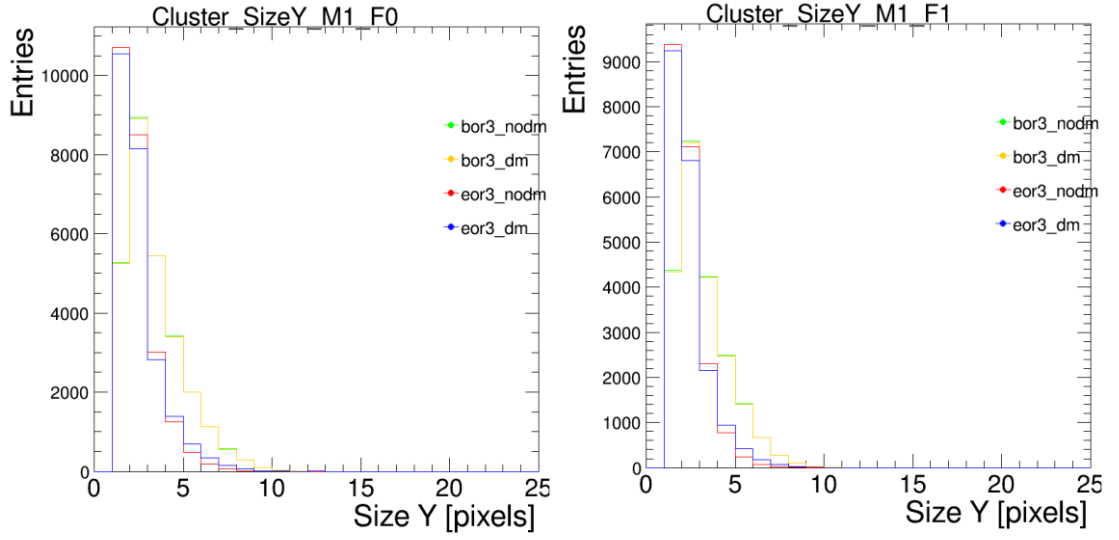


Şekil 4.23 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) müonlar için X-yönündeki küme boyutu

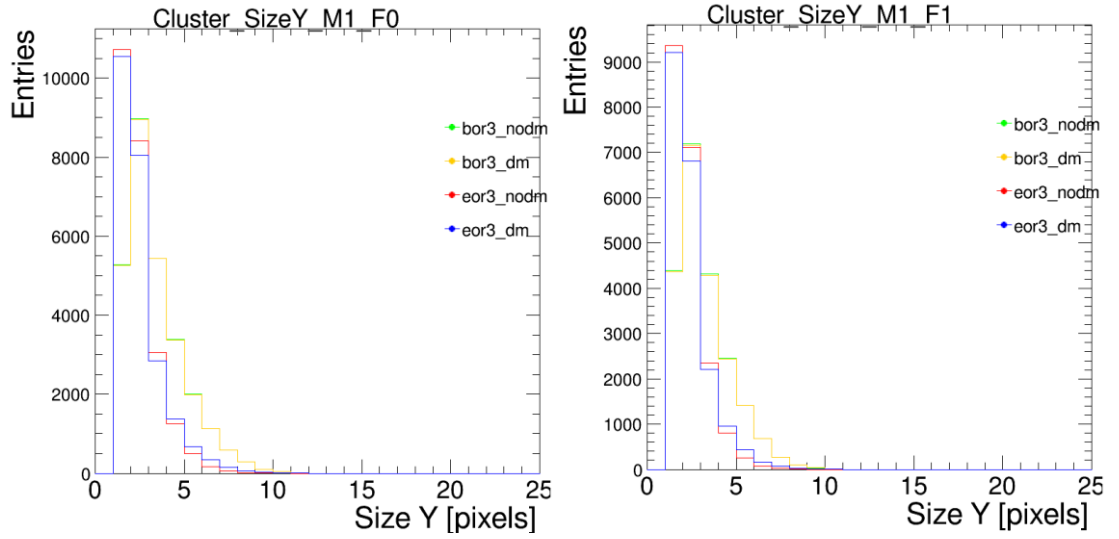


Şekil 4.24 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) antimüonlar için X-yönündeki küme boyutu

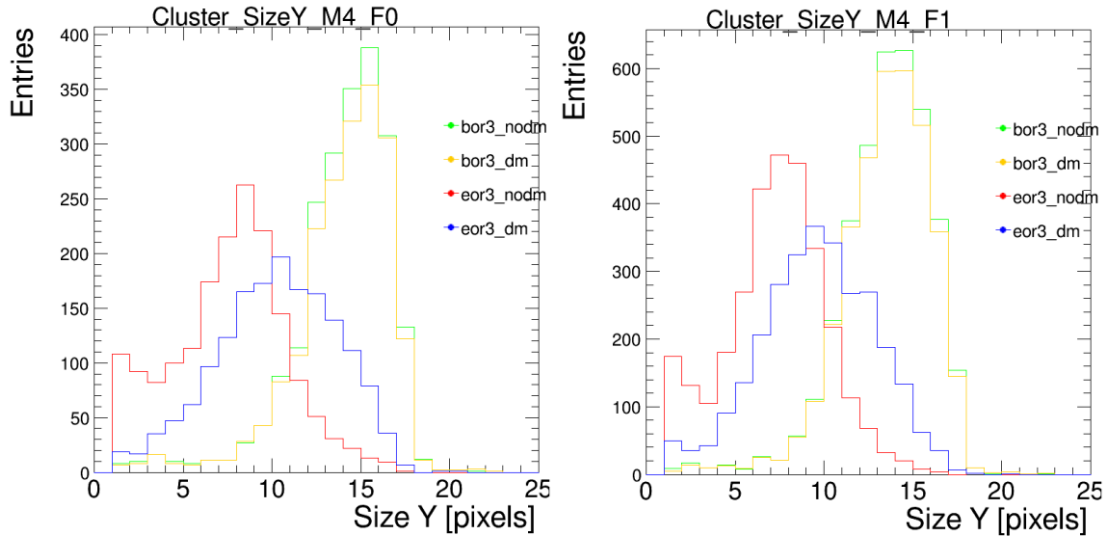
Müonlar ve antimüonlar arasında bir karşılaştırma yaparsak, müonlar ile antimüonlar arasındaki fark, flipped ve non-flipped durumlar için çok büyük değildir. Yine beklendiği gibi, Modül-4 ile Modül-1 arasındaki giriş sayısı da Modül-4'te önemli ölçüde azaltılmıştır. Manyetik alan, z yönünde, Elektrik alan ise y yönünde yani Lorentz kuvveti x yönündedir. Tüm modüller aynı Manyetik alan ve Elektrik alana sahiptir. Bu nedenle, Lorentz kuvveti piksel dedektörünün her parçası için aynı olmalıdır. Bu açıdan, küme boyut-X aynı görünmelidir.



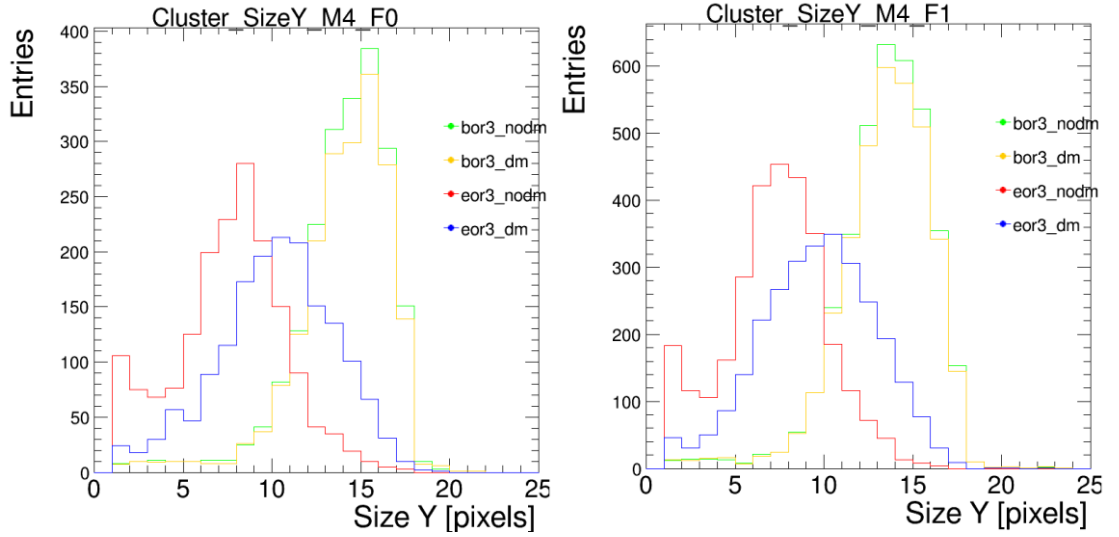
Şekil 4.25 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) müonlar için Y-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.26 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-1'deki (katman-1) antimüonlar için Y-yönündeki küme boyutu



Şekil 4.27 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) müonlar için Y-yönündeki küme boyutu

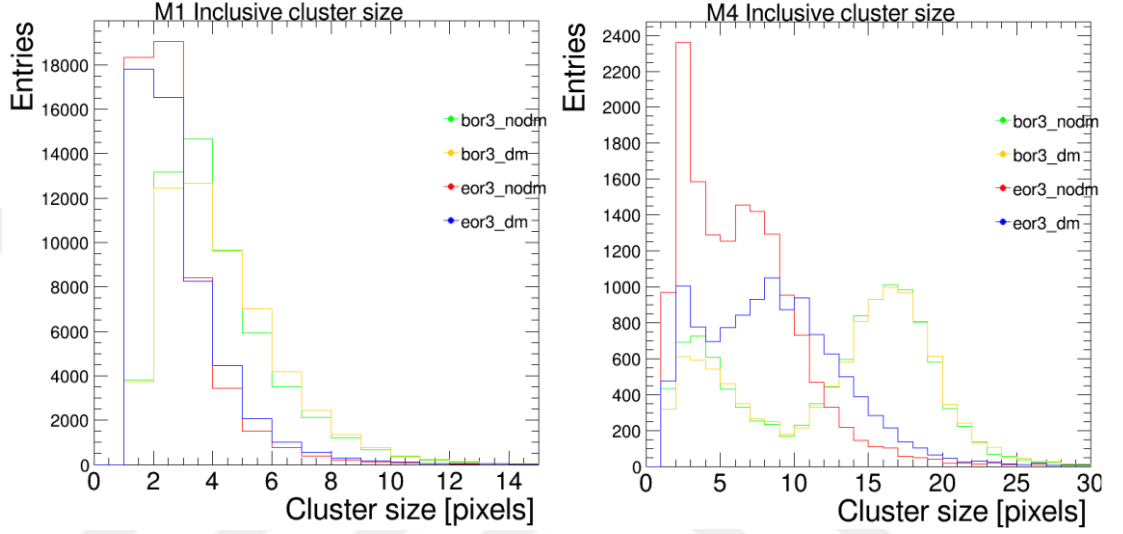


Şekil 4.28 Döndürülmemiş (F0) ve Döndürülmüş (F1) için Modül-4'deki (katman-4) antimüonlar için Y-yönündeki küme boyutu

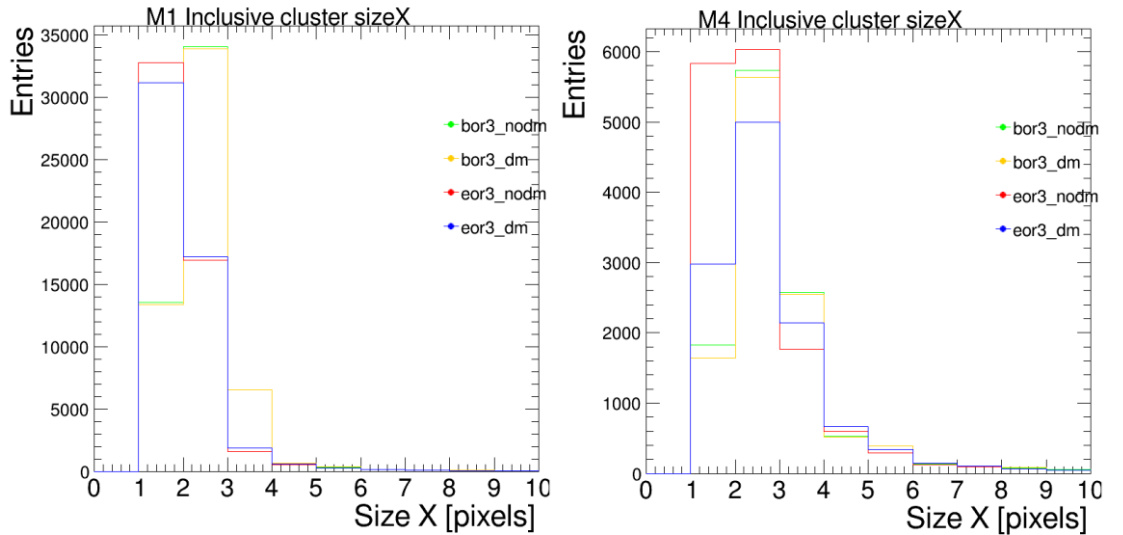
Modül-1'de hem müonlar hem de antimüonlar için pek bir değişiklik yoktur. Görünür değişiklik Modül-4'tedir. Müonlar için, değerler non-flipped durumunda düşükken, flipped durumdayken değerler daha yüksektir. Kendi aralarında karşılaştırıldığında, non-flipped durumunda müonlar için küme boyutu artmış ve giriş sayısı artmıştır. Bu terimler ayrıca Modül-4'teki antimüonlar için de aynıdır.

#### 4.2.1 Inclusive küme yükü ve küme boyutu

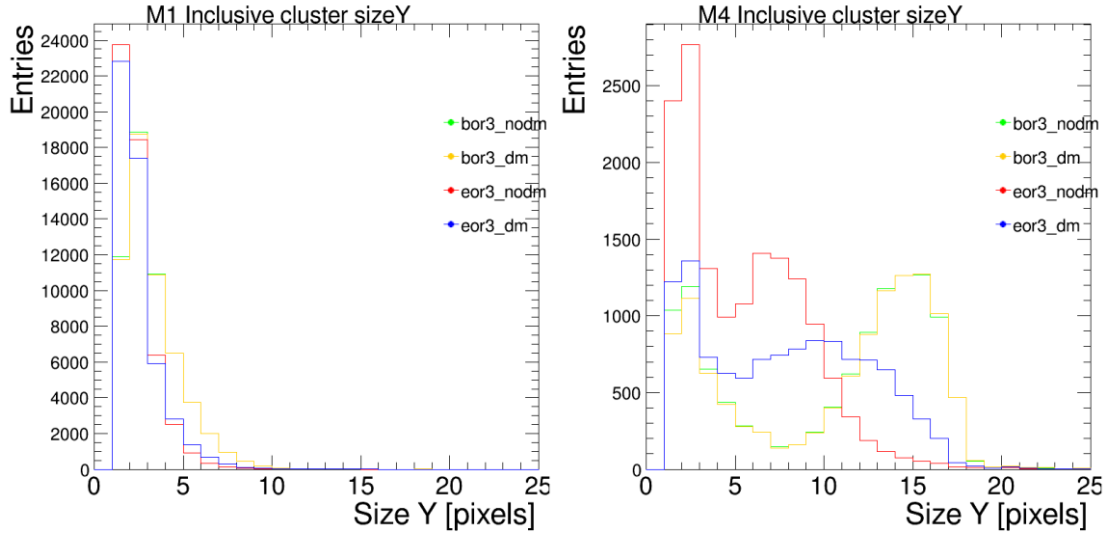
Bu kısımda olay öncesi ve sonrası dahil olmak üzere ortamdaki tüm kümeler dikkate alınmıştır. Radyasyondan etkilenen ve etkilenmeyen, dahil olan ve olmayan tüm kümeler analizin bir parçasıdır. Buradaki amaç, analiz sonuçlarında meydana gelecek olan değişimleri gözlemlemektir.



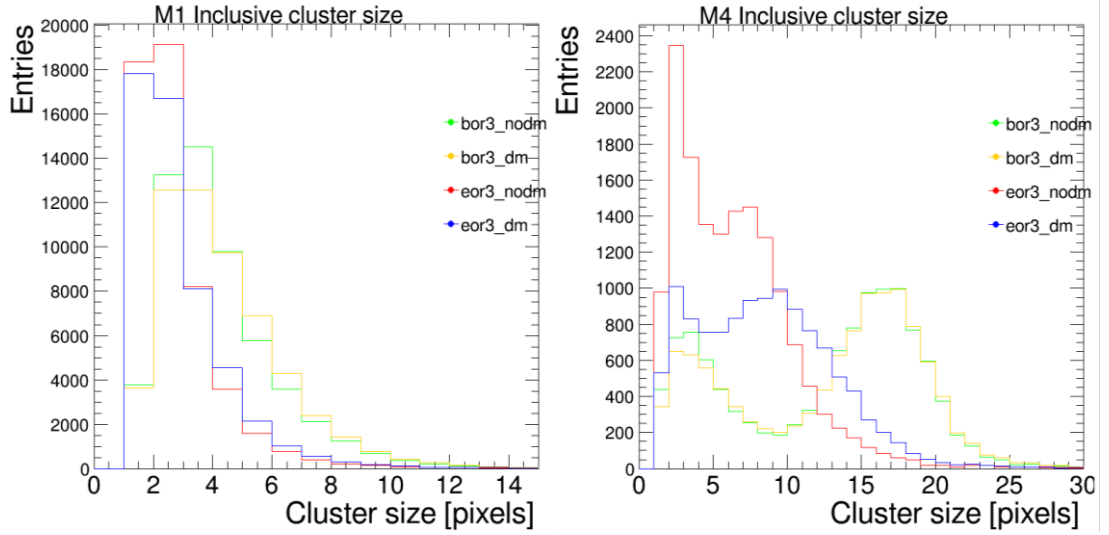
Şekil 4.29 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) müonlar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



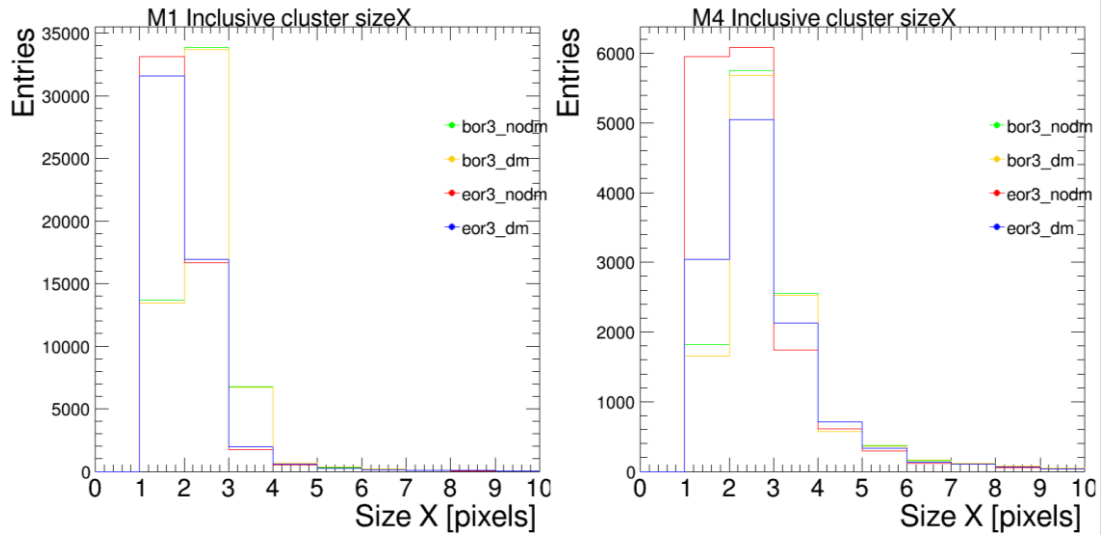
Şekil 4.30 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) müonlar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



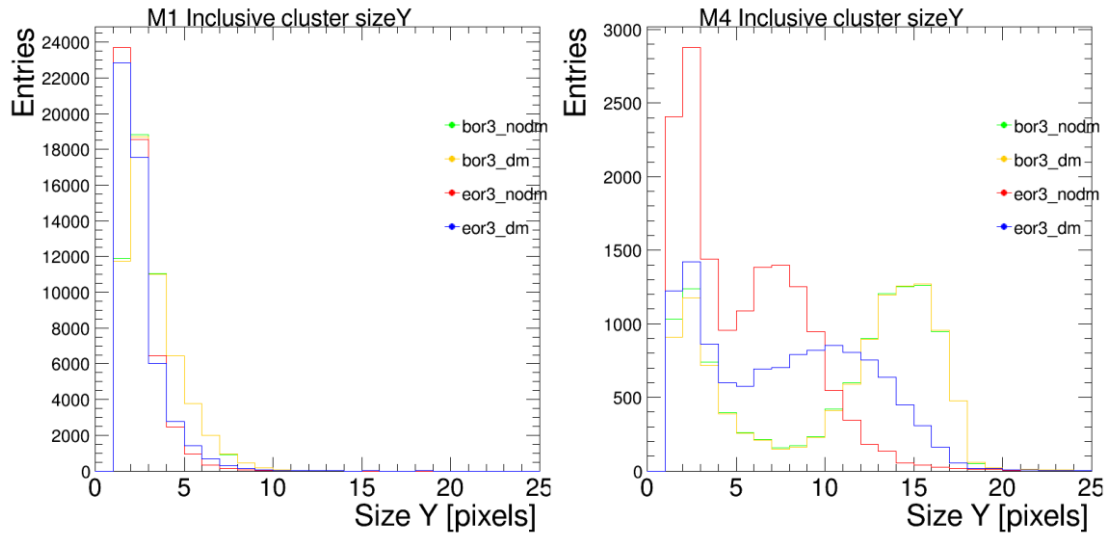
Şekil 4.31 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) müonlar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



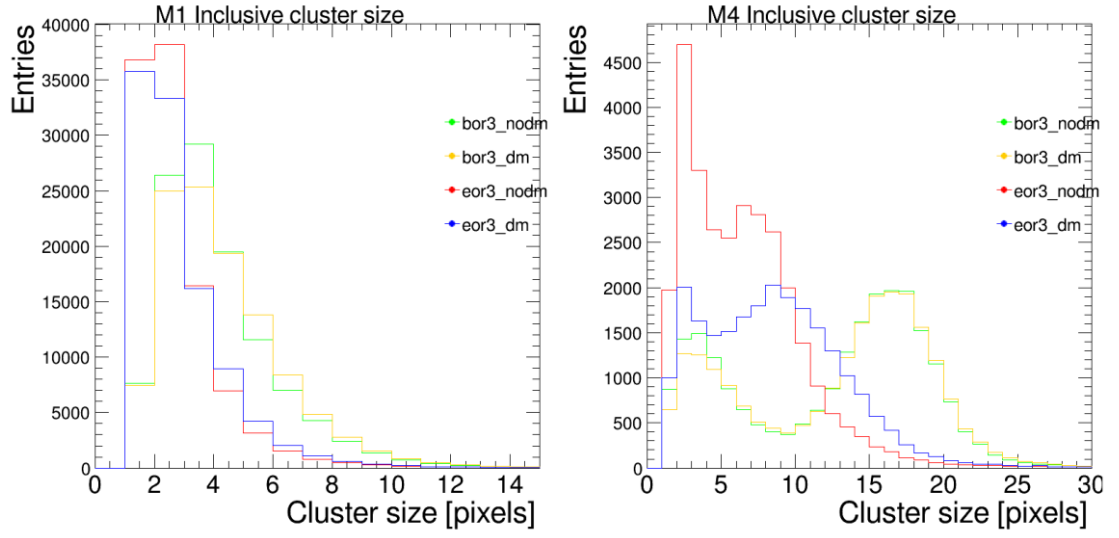
Şekil 4.32 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) müonlar için kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



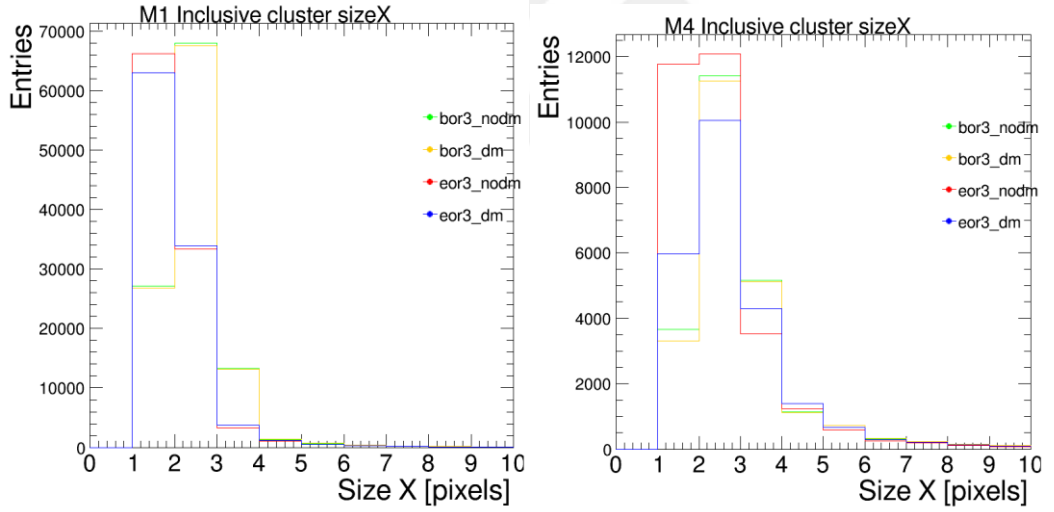
Şekil 4.33 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimüonlar için X-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



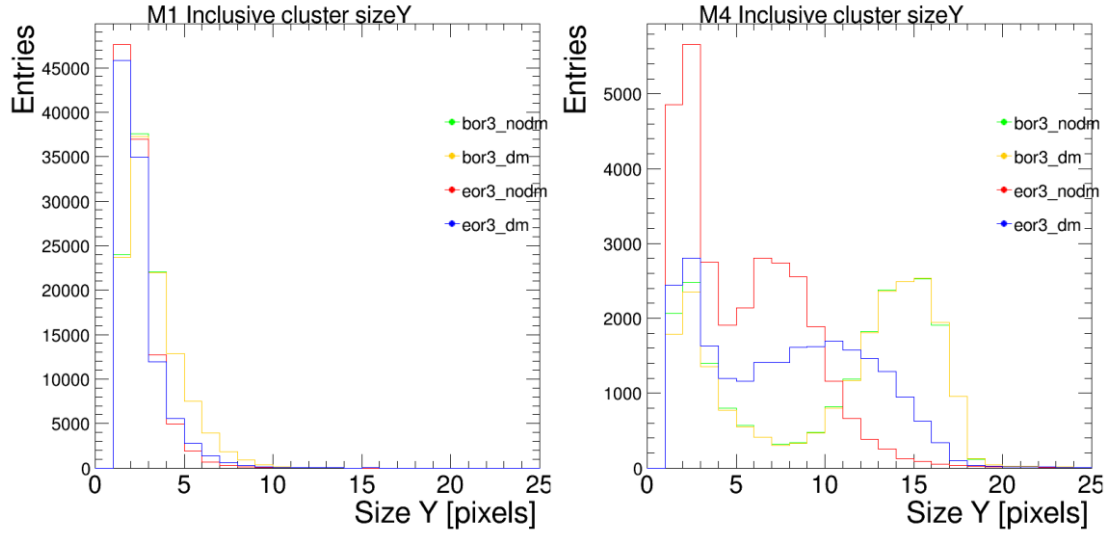
Şekil 4.34 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimüonlar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



Şekil 4.35 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) antimüonlar için kapsayıcı (Inclusive) küme boyutu



Şekil 4.36 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) hem müonlar hem de antimüonlar için X-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu



Şekil 4.37 Modül-1 ve Modül-4'teki (katman-1 ve katman-4) hem müonlar hem de antimüonlar için Y-yönündeki kapsayıcı (inclusive) küme boyutu

Bu bölümde, müonlar ve antimüonlar için Size (SizeX ve SizeY'nin ortalaması), SizeX ve SizeY analizleri raporlanmıştır. Ayrıca müonlar ve antimüonlar için hem ayrı hem de ortak analizler gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra antimüon ve müon ayrımı yapılmayacaktır. Bunun sebebi yük değişiminin etkisinin analizler üzerinde dikkat çekecek büyüklükte farkının olmamasıdır. Bu analizlere göre, aynı geçmiş bölümlerdeki analizler gibi, Modül-1, Modül-4'e göre radyasyondan daha fazla etkilenmiştir. Radyasyondan önce ve sonra gözlemlenen küme değişimi açıkça ortadadır. Digi Morphing uygulandıktan sonra ise her bir analizde radyasyon hasarının iyileştirildiği gözlemlenmiştir ve bunun sonucunda da küme iyileştirilmesi olumlu sonuçlanmıştır.

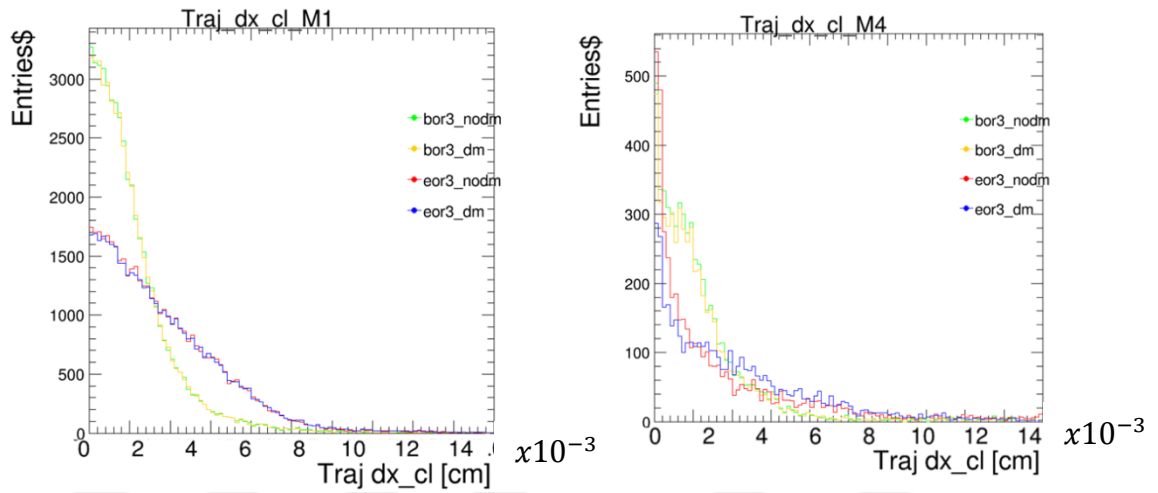
#### 4.2.2. Küme pozisyonları ve traj içerisindeki izler

Aşağıdaki değişkenler, simüle edilen ve ölçülen küme konumları ile izler arasındaki cm cinsinden mesafelerdir.

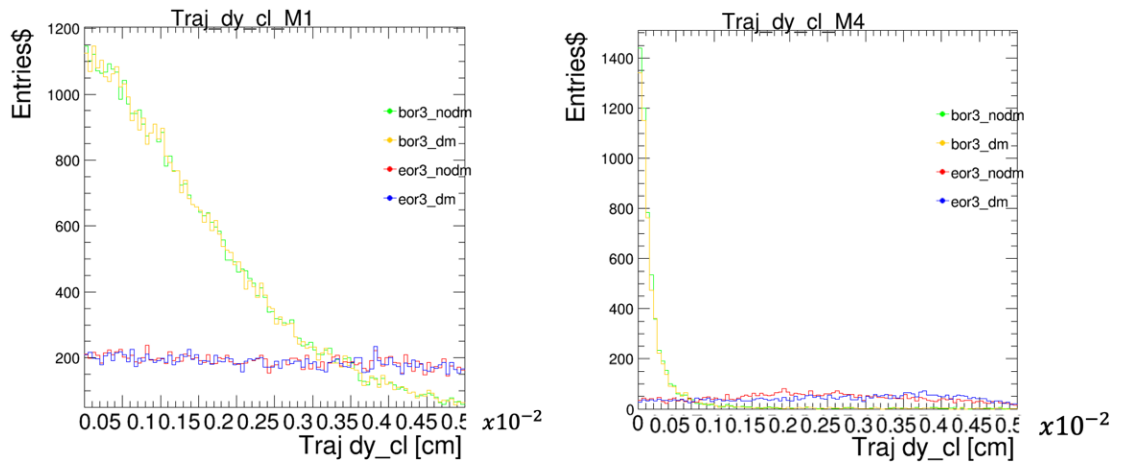
$d_{simhit}$  : Küme ile simüle edilmiş parçacığın, simüle geçişi arasındaki mesafe  $dx_{simhit}$  ve  $dy_{simhit}$  x'tir ve buradaki x ile y, x ve y yönlerini temsil eder.

$d_{cl}$  : Parçacık izinin geçişinin konumunu tahmin edildiği yer ile kümenin fiilen bulunduğu yer arasındaki mesafedir. Buradaki  $dx_{cl}$  ve  $dy_{cl}$  parametrelerinde bulunan  $x$  ile  $y$ ,  $x$  ve  $y$  yönlerini temsil eder.

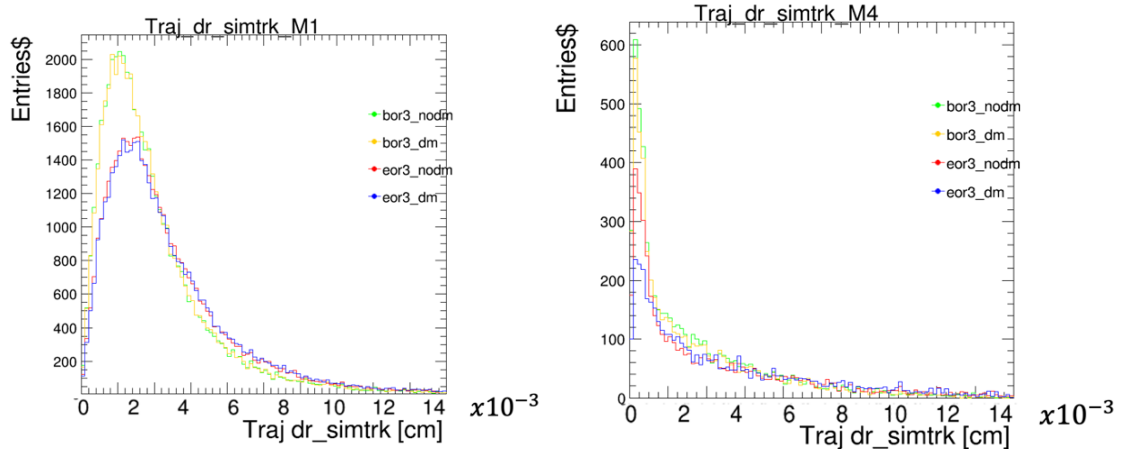
$d_{cl2}$  : Kümenin yol üzerindeki uzaklığı ve en yakın ikinci kümenin yol üzerindeki uzaklığıdır. Buradaki  $dx_{cl2}$  ve  $dy_{cl2}$  parametrelerinde bulunan  $x$  ile  $y$ ,  $x$  ve  $y$  yönlerini temsil eder.



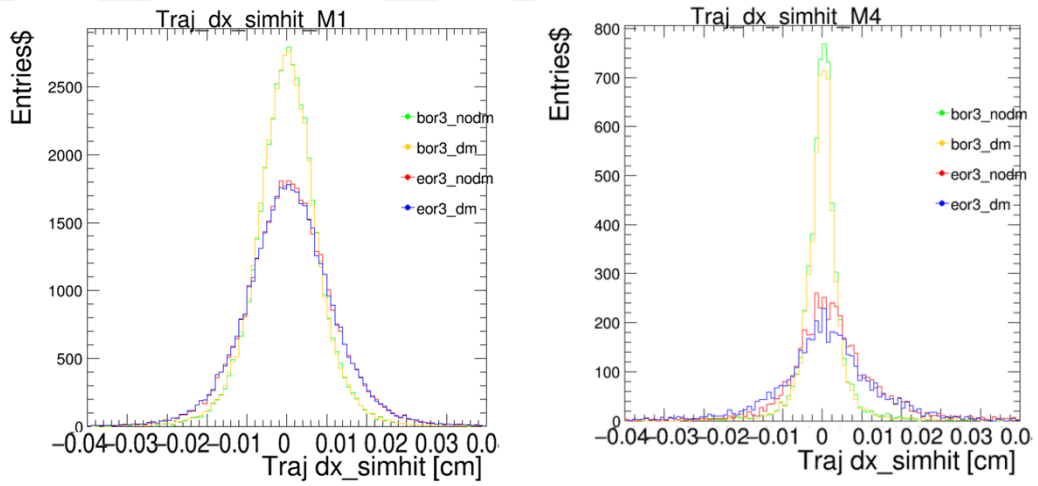
Şekil 4.38 Traj  $dx_{cl}$  Modül-1 ve Modül-4



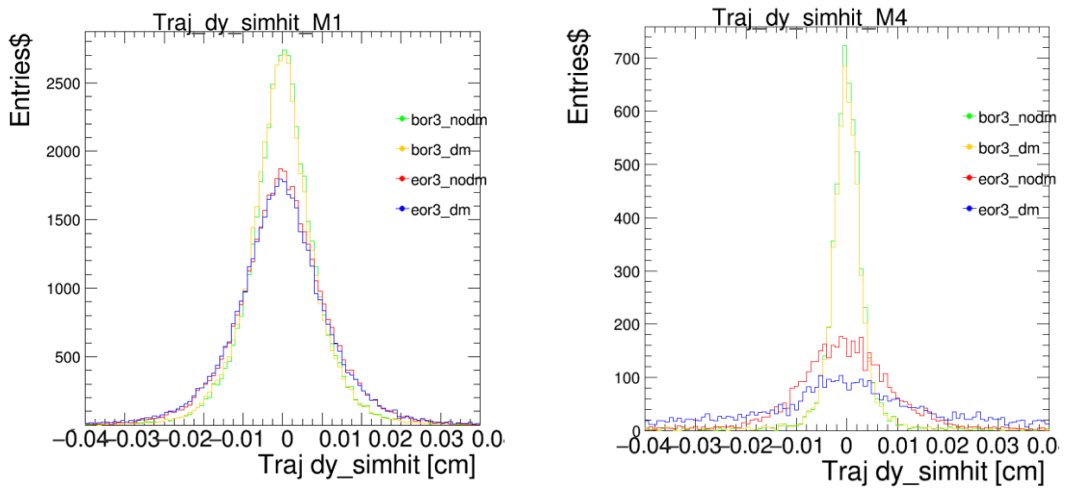
Şekil 4.39 Traj  $dy_{cl}$  Modül-1 ve Modül-4



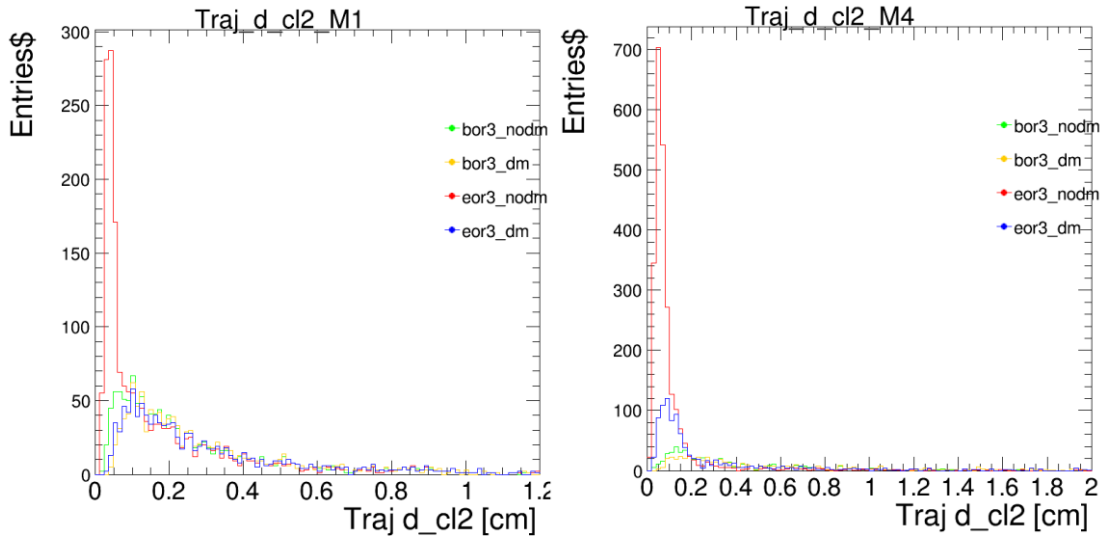
Şekil 4.40 Traj dr\_cl Modül-1 ve Modül-4



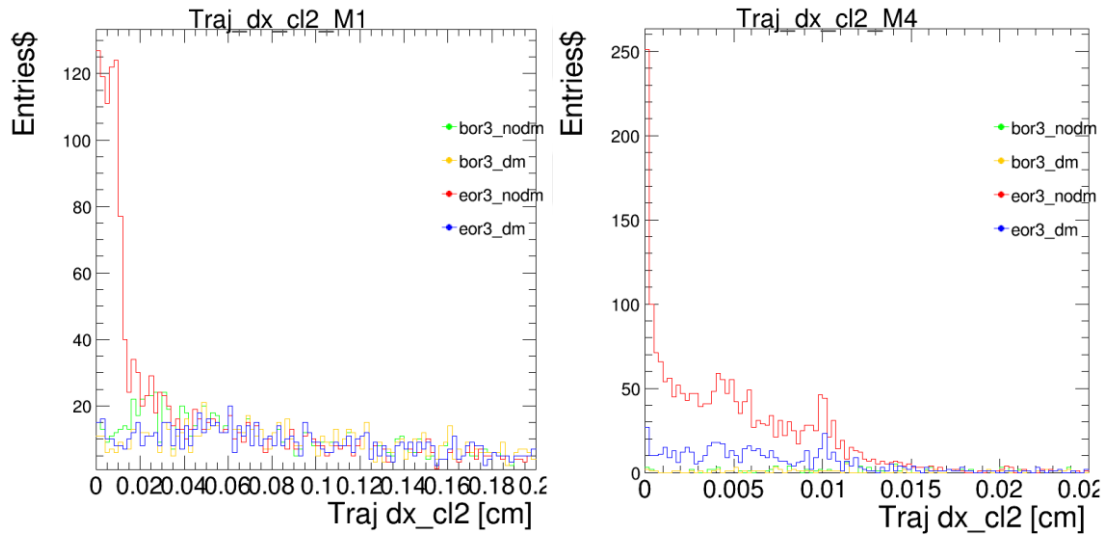
Şekil 4.41 Traj dx\_simhit Modül-1 ve Modül-4



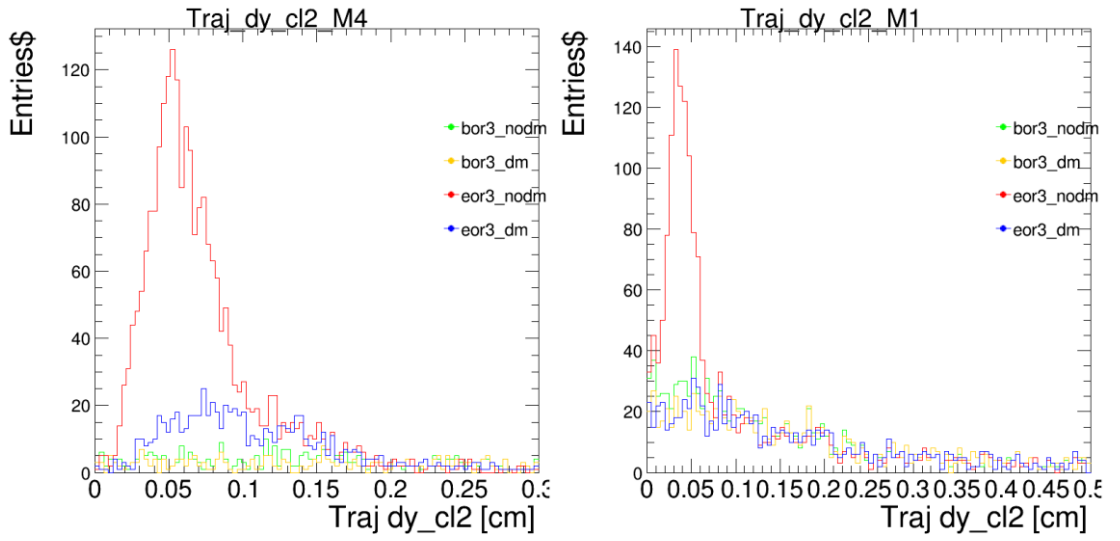
Şekil 4.42 Traj dy\_simhit Modül-1 ve Modül-4



Şekil 4.43 Traj d\_cl2 Modül-1 ve Modül-4



Şekil 4.44 Traj dx\_cl2 Modül-1 ve Modül-4



Şekil 4.45 Traj dy\_cl2 Modül-1 ve Modül-4

ClustTree ve TrajTree ile çizilen grafikler birbirinden farklıdır. ClustTree tüm kümeleri kapsar. TrajTree ise yalnızca etkileşimden giren kümeleri kapsar. Birbiriyle karşılaştırsak, beklendiği gibi, ClustTree'ye ait plotların daha fazla girişi vardır. Modül-1 için çizimler çok benzer görünüyor. Ancak Modül-4 için durum farklıdır. Inclusive Küme grafiklerinde Modül-4 için tüm değerler birbirine yakınken, Digi Morphing uygulanan grafikler çalışma sonunda farklı görünüyor. Ancak, Digi Morphing uygulamasından sonra normal değere döner. Burada Digi Morphing'in etkisini görebiliriz. Ayrıca Inclusive Küme Grafiklerinin diğer grafiklerden farkı, tüm kümelerin dahil edilmesidir. Grafiklerdeki piklerin az olmasının sebebi, olay sayısının az seçilmesidir.

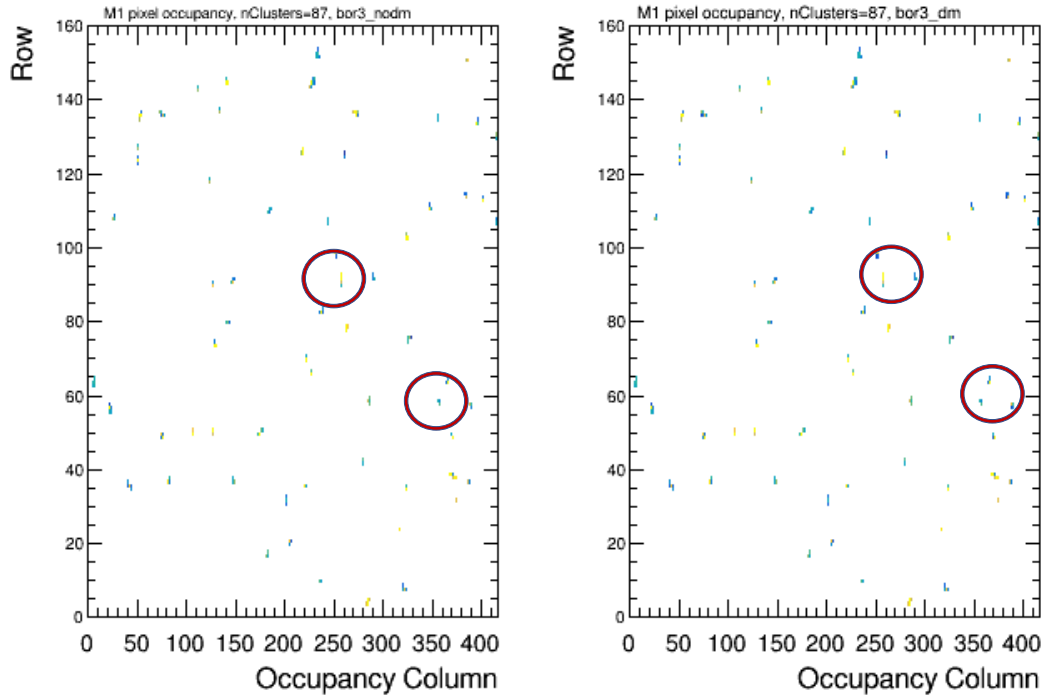
Radyasyondan sonra kümelerin bir kısmı ikiye ayrılarak iki ayrı küme haline gelebilir. Burada kümelerin merkez noktaları değişir. Bu noktada 4.3.3 bölümü boyunca paylaşılan grafiklerde birden fazla tepe noktası görüyoruz. Ancak, digi dönüşümünden sonra, kümeler iki ayrı küme gibi görünseler de aslında tek bir küme haline gelirler. Bu nedenle eor3\_nodm grafikte daha yüksek bir değere sahiptir. Ne kadar çok küme ayrılırsa, grafikte o kadar çok tepe noktası görürüz.

Parçacıkların konumunu tahmin ederek içlerinden bir yol çiziyoruz. Bu yörüngedir. Bu yol üzerinde bulunan veya tahmin edilen yola en yakın olan kümelerin uzaklıkları  $d_{cl}$

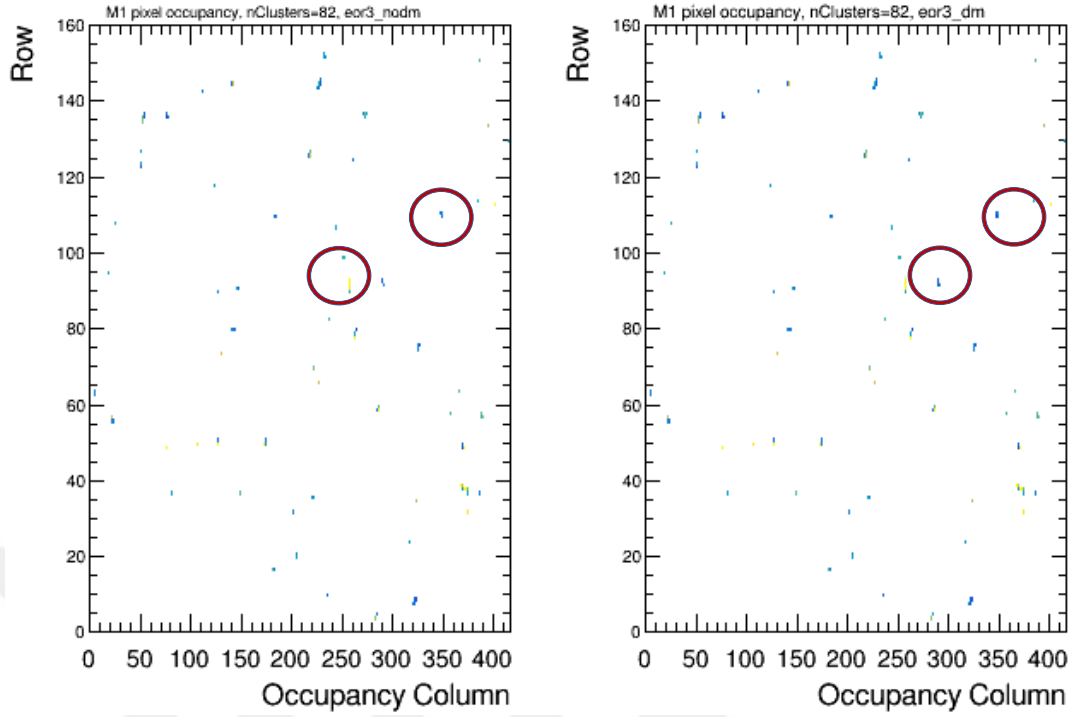
ve onlara en yakın olan ikinci kümelerin gerçek konumları ile tahmin edilen yola olan uzaklıkları  $d_{cl2}$ 'dir. Birimi cm'dir. Simülasyon ile bu yolu en fazla küme üzerinden geçerek çizebiliriz. Bunun nedeni daha fazla bilgi edinmektir. Küme ile simüle edilmiş parçacığın simüle edilmiş geçişi arasındaki mesafe  $dx_{simhit}$  ve  $dy_{simhit}$ 'tir. Grafiklere baktığımızda ilk başta her şeyin normal olduğunu varsayarak radyasyondan sonra grafik değişmiştir. Yani mesafe artmıştır. Digi Morphing ile bu durum büyük ölçüde düzeltildi. Yine, buradaki fazla pikler, kümelerin bölünmesinden kaynaklanmaktadır. Bir küme, iki farklı kümeye dönüşür ve artık iki farklı merkez noktasına sahiptir. Ancak Digi Morphing bunu düzeltir. Yine tek bir kümemiz ve tek bir merkez noktamız var olur. Bu durumda grafikteki piklerin azalması ile sonuç gözlemlenebilir.

#### 4.2.3 Doluluk grafikleri ve kırılan kümeler

Doluluk grafikleri, kümelerin bulunma yoğunluğunu göstermektedir. Bu grafikler ile hem radyasyon hasarını hem de Digi Morphing uygulamasının olumlu etkileri rahatlıkla gözlemlenebilir.



Şekil 4.46 Radyasyondan önce durumda Modül-1 (katman-1) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri ( $nC_{M4} \leq 400$ )

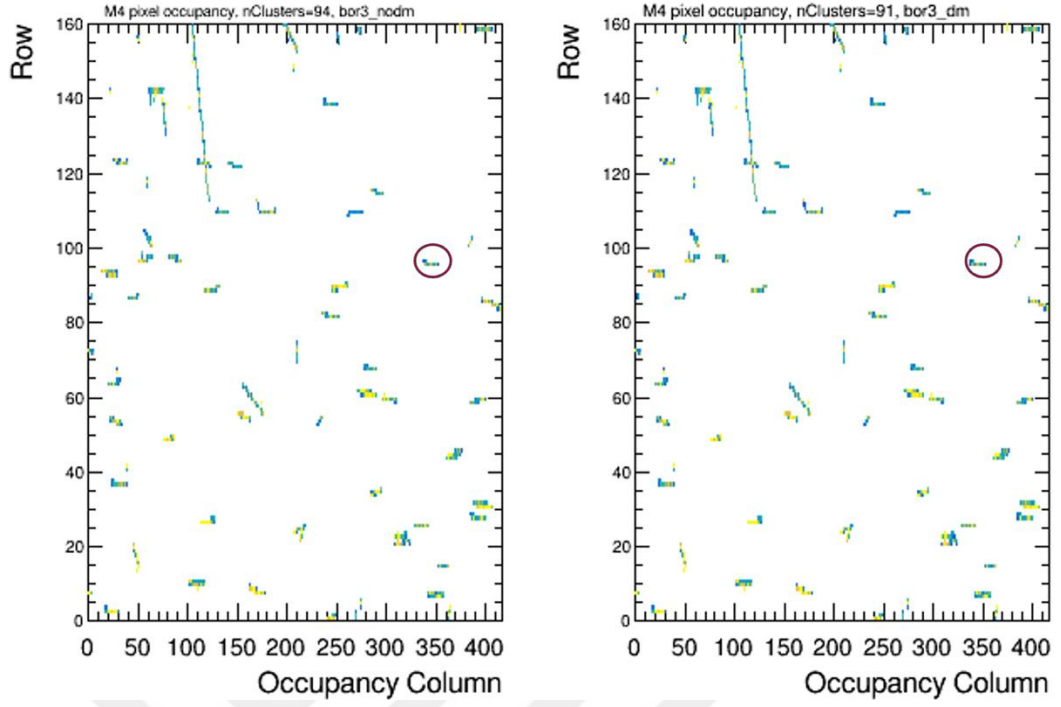


Şekil 4.47 Radyasyondan sonra durumda Modül-1 (katman-1) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri ( $nC_{M4} \leq 400$ )

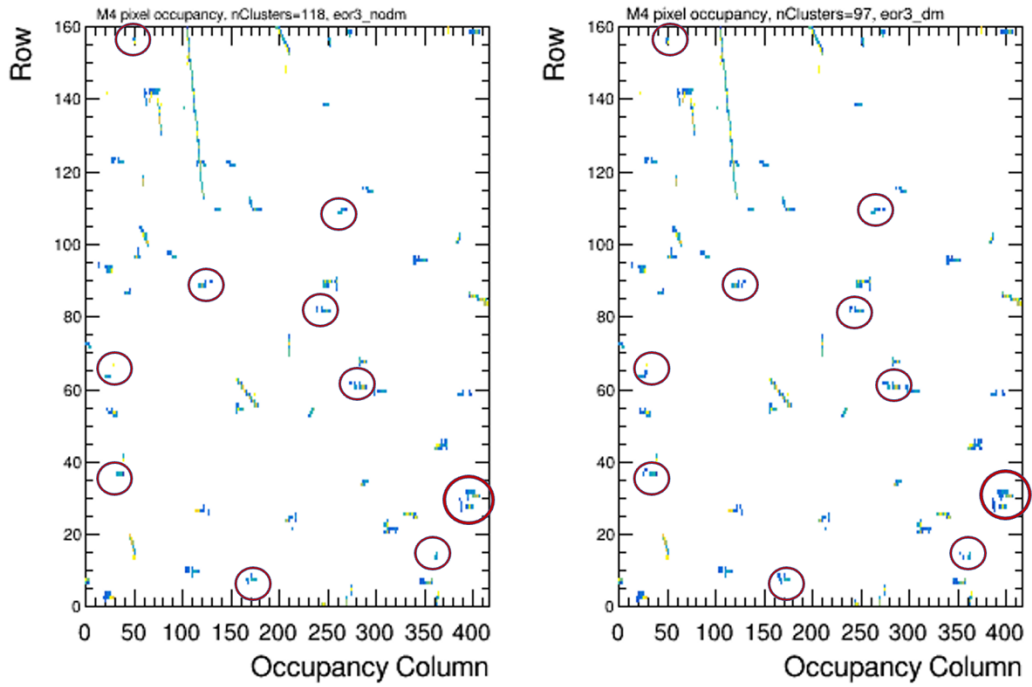


Şekil 4.48 Soldan sağa doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing olmadan Run3'ün sonu, Digi Morphing ile Run3'ün sonu için küme durumları

Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50'de değişim gösteren kümeler daire içine alınmıştır. Bu daireler yakınlştırılarak Şekil 4.48 ve Şekil 4.51 elde edilmiştir. Şekil 4.48'e ve Şekil 4.51'e bakarsak, ilk küme radyasyondan önce ve Digi Morphing uygulanmadan öncesine aittir. Bir sonraki küme ise aynı durumun Digi Morphing uygulandıktan sonraki halidir. Görselde açıkça görüldüğü üzere Digi Morphing uygulandıktan sonra eksik olan kümenin bir kısmı tamamlanmıştır.



Şekil 4.49 Radyasyondan önce durumda Modül-4 (katman-4) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri ( $nC_{M4} \leq 400$ )



Şekil 4.50 Radyasyondan sonra durumda Modül-4 (katman-4) Digi Morphing'siz ve Digi Morphing'li doluluk grafikleri ( $nC_{M4} \leq 400$ )



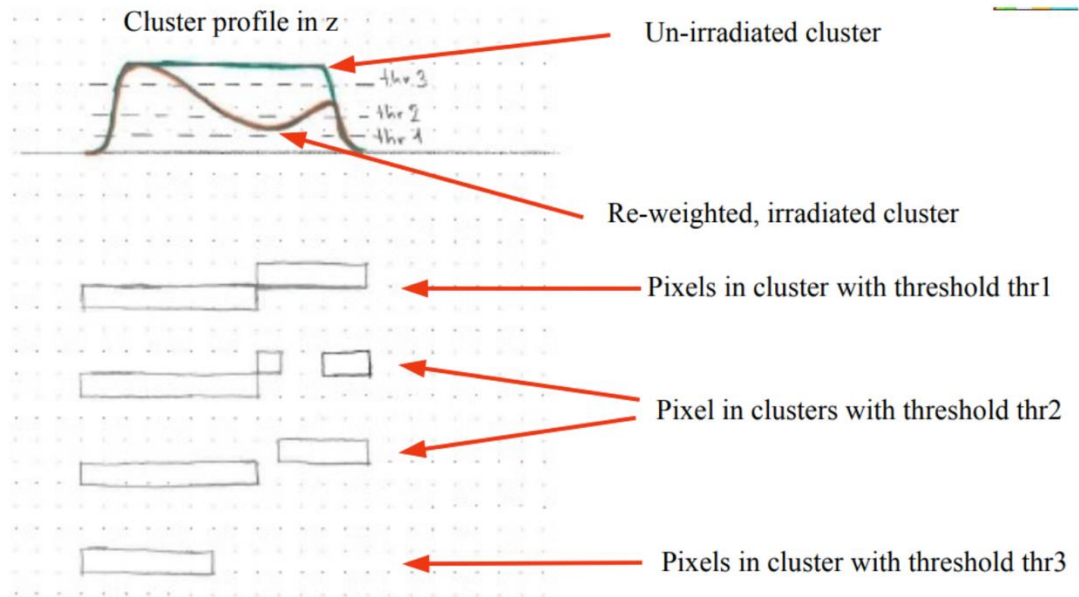
Şekil 4.51 Soldan sağa doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün Başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün Başlangıcı, Digi Morphing Olmadan Run3'ün Sonu, Digi Morphing ile Run3'ün Sonu için küme durumları

Radyasyondan sonra kümelerin bir kısmı ikiye ayrılarak iki ayrı küme haline gelebilir. Burada kümelerin merkez noktaları değişir. Bu noktada grafikte birden fazla tepe noktası görüyoruz. Ancak, digi dönüşümünden sonra, kümeler iki ayrı küme gibi görünseler de aslında tek bir küme haline gelirler. Bu nedenle eor3\_nodm grafikte daha yüksek bir değere sahiptir. Ne kadar çok küme ayrılırsa, grafikte o kadar çok tepe noktası görürüz.

Dahil kümesi ile yapılan tüm grafikler tüm kümeleri kapsar. Yani, clustTree radyasyondan önce ve sonra bulunan tüm kümeleri içerir. Ancak trajTree yalnızca etkileşimli kümeleri içerir. Bu nedenle clustTree ile yapılan tüm grafiklerde daha yoğun grafikler görüyoruz.

Genel olarak küme boyutlarından bahsedecek olursak, ışıınımdan önce normal genişlikte olan kümeler ışıınımdan sonra küçüldü. Burada radyasyonun etkisini açıkça görebiliriz. Radyasyon kümelere zarar verdiği için kümeler küçülür ve bu da grafiklere yansır. Ancak Digi Morphing radyasyondan zarar görmüş kümeleri onarmaya çalıştığı için Digi Morphing uygulanan kümelerin grafiklerinde küme boyutları genişliyor. Ayrıca her kayıp kümeden anladığımız, orada bilgi kaybettiğimizdir.

Doluluk grafikleri için radyasyondan önce uygulanan digi morphing ile bor3\_nodm ve bor3\_dm grafikleri arasında hafif farklılıklar olmalıdır. Digi Morphing her zaman bir şeyleri düzeltmek üzerine kurulmuş bir sistem olduğu için bu değişim kaçınılmazdır. Radyasyondan sonra kümeler zarar görür ve bazı pikseller kaybolur. Bu noktada Digi Morphing, Piksellerin her iki yanına birer yeni piksel ekler ve bu piksellerin her iki yanında komşu pikseller varsa orada kalırlar. Komşusu olmayan bir piksel varsa, yok edilecektir. Digi Morphing bu şekilde radyasyondan zarar görmüş kümeleri tamamlar. Bunun teknik bir görseli Şekil 4.52'de görülmektedir.



Şekil 4.52 Küme rekonstrüksiyonunun teknik bir görseli

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

CERN, Dünyanın en büyük deneysel parçacık fiziği ve hızlandırıcı merkezidir. CERN’de inşa edilerek 2010 yılında çalışmaya başlayan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider, LHC) ise dünyadaki en yüksek enerjili proton-proton çarpıştırıcısıdır. LHC üzerinde proton-proton çarpışmalarından çıkacak sonuçları incelemek amacıyla kurulan detektörlerden birisi de CMS (Compact Muon Solenoid)’tir. CMS dedektörünün kalbinde Pixel dedektörü bulunmaktadır. Bu dedektör, olay örgüsü yaratan parçacıkları görüntülemek için kullanılmaktadır.

Pixel dedektörünün, CMS’in en iç katmanında bulunmasından ötürü, yüksek enerji ile yani radyasyonla ilk temas eden ve aynı zamanda en çok maruz kalan parçadır. Burada alınan veriler radyasyondan ötürü hasar aldığından dolayı, hasar alan kümeleri yani verileri düzeltmek ancak algoritma ile mümkündür. Donanımsal düzeltmeler ise ancak LHC’nin uzun dönemli kapatmalarında gerçekleşmektedir. LHC çalışır halde olduğu sürece donanımsal müdahaleler mümkün değildir. Bu durumdan dolayı alınan verileri iyileştirmek amacı ile algoritmalar kullanılabilir.

Bu çalışmada CERN, CMS ve Pixel dedektörü anlatılmıştır ve radyasyondan hasar alan kümelerin iyileştirilmesi için yapılan algoritma anlatılıp tanıtılmıştır. Yapılan çalışmalarda müonlar ve antimüonlar parçacık çeşidi olarak kullanılmıştır ve yükü dışındaki tüm özelliklerinin aynı olmasına karşın çıkan sonuçların farklılığı incelenmiştir. Bu farklılık temel olarak müonların ve antimüonların yüklerinin farklı olmasından kaynaklıdır. Ayrıca Pixel dedektörünün geometrisi de bu incelemelerin bir parçasıdır. Modül-1 ve Modül-4 arasındaki fark incelenmiştir. Sonuç olarak ise Modül-1’de meydana gelen değişimlerin Modül-4’ten daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi Modül-1’in etkileşim noktasına yakınlığıdır. Bütün bu koşullar altında çalışma kümelerin yükleri ve boyutları üzerinden ve ek olarak da küme yoğunlukları üzerinden incelenmiştir. Küme yoğunluk grafiklerine bakıldığı zaman küme kırılmaları ve kaybolmaları açıkça bellidir ve grafikler üzerinde daire içine alınmıştır. Bu kümelere daha yakından bakıldığında ise radyasyona uğrayan kümelerin zarar gördüğünü açık bir şekilde görebiliriz. Digi Morphing uygulandıktan sonra ise

kümelerin %80'den fazla iyileştiğini tespit edebiliriz. Bu durumda yazılan C++ kodları başarı ile çalışmaktadır. Yani Digi Morphing uygulaması sorunsuz çalışmaktadır.

Detaylandırılacak olunursa, çalışmada öncelikle müon ve antimüon ayrımı yapılmıştır ve aralarındaki yük farkından kaynaklanan analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Parçacıkların yük farkları, küme yükünü de devasa olmayan ancak önemsenmeyecek bir şekilde etkilemiştir. Ardından değerlendirme Piksel dedektörünün geometrisine yönelmiştir. Dedektörün Modül-1 ve Modül-4 bölümleri ele alınmıştır. Modül-1, dedektörün merkez noktasına yani radyasyonun en fazla hissedilen noktasına en yakınken, Modül-4 ise en uzak kısmında kalmaktadır. Bu iki kısımda bulunan kümelerin yüklerinin, boyutlarının ve küme yoğunluklarının radyasyondan öncesi, sonrası ve Digi Morphing uygulanmadan öncesi ve sonrası durumları incelenmiştir. Buna göre, Modül-1, Modül-4'e kıyasla her bir inceleme durumlarında, radyasyondan en fazla etkilenen kısım olmasından dolayı, radyasyondan sonra küme özelliklerinde büyük değişimler yaşamış olup, Digi Morphing uygulamasının en bariz etkileri de burada gözlemlenmiştir. Aşağıdaki şekillerde sırayla kümelerin radyasyondan önce Digi Morphing uygulaması olmadan, radyasyondan önce Digi Morphing uygulaması varken, radyasyondan sonra Digi Morphing uygulaması olmadan ve radyasyondan sonra Digi Morphing uygulaması varken yakalanmış kümeler gösterilmektedir. Hem radyasyondan önce hem de radyasyondan sonra Digi Morphing uygulanmış kümelere bakılırsa, uygulamadan alınan verim bariz olarak görülebilir. Yüzlerce kümenin bu şekilde düzeltilmesinin toplam sonucu %80 ve bu rakamın üstünde bir oranda bulunmaktadır. Bu sonuç Dedektör Performans Grubu'nun yapmış olduğu Monte Carlo simülasyonları sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Soldan sağa doğru Digi Morphing olmadan Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing ile Run3'ün başlangıcı, Digi Morphing olmadan Run3'ün sonu, Digi Morphing ile Run3'ün sonu için küme durumları

Parçacık fiziğinde olay örgüsü doğrudan gözlemlenemediği için olay örgüsü veri analizi ile simüle edilmektedir. Ancak kalitesi düşük analiz görüntülerinde yapılan incelemeler de beklenildiği gibi olmayabilmektedir. Bu çalışma ile analiz görüntülerinin kalitesi yükselmektedir ve yapılan incelemeler daha anlamlı hale gelmektedir. Yeni keşiflerde ve parçacık tanımlamalarında bu işlem oldukça önemlidir.



## KAYNAKLAR

- A Colaleo, A Safonov, A Sharma, and M Tytgat. CMS Technical Design Report for the Muon Endcap GEM Upgrade. Technical Report CERN-LHCC-2015-012. CMS-TDR-013, Jun 2015. URL <https://cds.cern.ch/record/2021453>.
- A Tapper and Darin Acosta. CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade. Technical Report CERN-LHCC-2013-011. CMS-TDR-12, Jun 2013. URL <https://cds.cern.ch/record/1556311>.
- A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso` and J. Ranft, “Fluka: a multi-particle transport code”, CERN-2005-10, INFN/TC 05/11, SLAC-R-773 (2005).
- A. M. Sirunyan and et al. Evidence for Higgs boson decay to a pair of muons. *Journal of High Energy Physics*, 2021(1), Jan 2021. ISSN 1029-8479. doi: 10.1007/jhep01(2021)148. URL [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2021\)148](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2021)148).
- A. M. Sirunyan et al. Observation of Higgs Boson Decay to Bottom Quarks. *Phys. Rev. Lett.*, 121:121801, Sep 2018. doi: 10.1103/PhysRevLett.121.121801. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.121801>.
- A. M. Sirunyan et al. Observation of  $t\bar{t}H$  Production. *Phys. Rev. Lett.*, 120:231801, Jun 2018. doi: 10.1103/PhysRevLett.120.231801. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.231801>.
- A.M. Sirunyan et al. A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel. *Physics Letters B*, 805:135425, 2020. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135425>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026932030229X>.
- A.M. Sirunyan et al. Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV. *JHEP*, 11 (CMS-HIG-16-040. CMS-HIG-16-040-003):185. 56 p, Apr 2018. doi: 10.1007/JHEP11(2018)185. URL <https://cds.cern.ch/record/2312121>. Submitted to JHEP. All figures and tables can be found at <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIG-16-040> (CMS Public Pages).
- A.M. Sirunyan et al. Measurements of properties of the Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$ TeV. *Physics Letters B*, 791:96–129, 2019. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.12.073>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269319301169>.
- A.M. Sirunyan et al. Observation of the Higgs boson decay to a pair of  $\tau$  leptons with the CMS detector. *Physics Letters B*, 779:283–316, 2018. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.02.004>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269318301035>.
- Aerial view of the lhc. URL <https://spectrum.ieee.org/computing/software/analyzing-the-lhc-magnet-quenches>.

- Albert M Sirunyan et al. Measurements of properties of the Higgs boson decaying into the four-lepton final state in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ . *JHEP*, 11:047, 2017. doi: 10.1007/JHEP11(2017)047. URL [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2017\)047](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2017)047).
- CERN Council, "The European Strategy for Particle Physics, Update 2013", CERN-Council-S/106. <https://cds.cern.ch/record/1567258/files/esc-e-106.pdf>.
- CMS Collaboration, "CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade", CMS Technical Design Report CERN-LHCC-2012-016, CMS-TDR-11, 2012.
- CMS Collaboration, "Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector", CERN-LHCC-2015-010, LHCC-P-008, CMS-TDR-15-02 (2015).
- CMS Collaboration, "The CMS tracker system project: Technical Design Report", Technical Report CERN-LHCC-98-006, CMS-TDR-5, CERN, Geneva, 1997.
- CMS Collaboration, "The CMS tracker: addendum to the Technical Design Report", Technical Report CERN-LHCC-2000-016, CMS-TDR-5-add-1, Geneva, 2000.
- CMS Collaboration. Bunched beam test of the cms drift tubes local muon trigger. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 534(3):441–485, 2004. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.06.169>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900204016559>.
- CMS Collaboration. Performance of the CMS level-1 trigger in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ . *Journal of Instrumentation*, 15(10):P10017–P10017, oct 2020. doi: 10.1088/1748-0221/15/10/p10017. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/p10017>.
- CMS Collaboration. Performance of the CMS muon detector and muon reconstruction with proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ . *Journal of Instrumentation*, 13(06):P06015–P06015, jun 2018. doi: 10.1088/1748-0221/13/06/p06015. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/06/p06015>.
- CMS Collaboration. Precise mapping of the magnetic field in the CMS barrel yoke using cosmic rays. *Journal of Instrumentation*, 5(03):T03021–T03021, mar 2010. doi: 10.1088/1748-0221/5/03/t03021. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/t03021>.
- CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08004–S08004, aug 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/s08004. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08004>.
- CMS Collaboration. The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$  at the LHC. *Journal of Instrumentation*, 8(11): P11002–P11002, nov 2013. doi: 10.1088/1748-0221/8/11/p11002. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/11/p11002>.

- Cms luminosity - public results. URL <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>.
- Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. *Eur. Phys. J. C*, 79(arXiv:1809.10733. CMS-HIG-17-031-005):421. 67 p, Sep 2018. doi: 10.1140/epjc/s10052-019-6909-y. URL <https://cds.cern.ch/record/2640611>. Submitted to Eur.Phys.J.
- European Strategy Forum on Research Infrastructures, ESFRI Roadmap 2016, "Strategy Report on Research Infrastructures", 2016. <http://www.esfri.eu/roadmap-2016>.
- G. Apollinari et al., "High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Preliminary Design Report", CERN-2015-005, doi:10.5170/CERN-2015-005.
- Georges Aad et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B*, 716:1, 2012. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. URL <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>.
- Go on a particle quest at the first cern webfest. URL <https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2012/35/News%20Articles/1473657>.
- J Mans, J Anderson, B Dahmes, P de Barbaro, J Freeman, T Grassi, E Hazen, J Mans, R Ruchti, I Schimdt, T Shaw, C Tully, J Whitmore, and T Yetkin. CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter. Technical Report CERN-LHCC-2012-015. CMS-TDR-10, Sep 2012. URL <https://cds.cern.ch/record/1481837>.
- J R Andersen et al. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 3. Higgs Properties. 7 2013. doi: 10.5170/CERN-2013-004. URL <https://cds.cern.ch/record/1559921>.
- Lyndon Evans and Philip Bryant. LHC machine. *Journal of Instrumentation*, 3(08): S08001–S08001, aug 2008. doi: 10.1088/1748-0221/3/08/s08001. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08001>.
- M. Aaboud and et al. Measurement of the Higgs boson coupling properties in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. *Journal of High Energy Physics*, 2018(3), Mar 2018. ISSN 1029-8479. doi: 10.1007/jhep03(2018)095. URL [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03\(2018\)095](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03(2018)095).
- M. Aaboud et al. Cross-section measurements of the Higgs boson decaying into a pair of  $\tau$ -leptons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector. *Phys. Rev. D*, 99:072001, Apr 2019. doi: 10.1103/PhysRevD.99.072001. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.99.072001>.
- M. Aaboud et al. Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-sections in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu \mu \nu$  decay channel in pp

- collisions at  $s=13$  TeV with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 789:508–529, 2019. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.11.064>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269318309936>.
- M. Aaboud et al. Observation of  $H \rightarrow bb$  decays and VH production with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 786:59–86, 2018. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.09.013>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269318307056>.
- M. Aaboud et al. Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 784:173–191, 2018. ISSN 0370-2693. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.07.035>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269318305732>.
- Magnetic field of an idealized quadrupole. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Magnetic\\_field\\_of\\_an\\_idealized\\_quadrupole\\_with\\_forces.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Magnetic_field_of_an_idealized_quadrupole_with_forces.svg).
- Oliver Rieger. *Evidence for Higgs boson decays to muons with the CMS experiment at the LHC*. PhD thesis, University of Hamburg, 2021.
- Particle Physics Project Prioritization Panel (P5), "Building for Discovery - Strategic Plan for U.S. Particle Physics in the Global Context", May 2014. [http://science.energy.gov/~media/hep/hepap/pdf/May-2014/FINAL\\_P5\\_Report\\_053014.pdf](http://science.energy.gov/~media/hep/hepap/pdf/May-2014/FINAL_P5_Report_053014.pdf).
- Performance of the CMS TwinMux Algorithm in late 2016 pp collision runs. Dec 2016. URL <https://cds.cern.ch/record/2239285>.
- R Frazier, S Fayer, G Hall, C Hunt, G Iles, D Newbold, and A Rose. A demonstration of a time multiplexed trigger for the CMS experiment. *Journal of Instrumentation*, 7(01):C01060–C01060, jan 2012. doi: 10.1088/1748-0221/7/01/c01060. URL <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/01/c01060>.
- R.M. Brown. The cms electromagnetic calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 572(1):29–32, 2007. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.240>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020601970X>. Frontier Detectors for Frontier Physics.
- RD53 Collaboration, "RD Collaboration Proposal: Development of pixel readout integrated circuits for extreme rate and radiation", Scientific Committee Paper CERN-LHCC-2013-008, LHCC-P-006, 2013.
- Serguei Chatrchyan et al. Observation of a new boson at a mass of 125GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B*, 716:30, 2012. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.021. URL <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>.

- Serguei Chatrchyan et al. Observation of a new boson with mass near 125GeV in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8TeV. *JHEP*, 06:081, 2013. doi: 10.1007/JHEP06(2013)081. URL [https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2013\)081](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2013)081).
- Siona Ruth Davis. Interactive Slice of the CMS detector. Aug 2016. URL <https://cds.cern.ch/record/2205172>.
- Sketches of the cms tracker detector. URL <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/DPGResultsTRK>.
- T Gleisberg, S Höche, F Krauss, M Schönherr, S Schumann, F Siegert, and J Winter. Event generation with SHERPA 1.1. *Journal of High Energy Physics*, 2009(02): 007–007, feb 2009. doi: 10.1088/1126-6708/2009/02/007. URL <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/02/007>.
- T.T.Bohlen,F.Cerutti,M.P.W.Chin,A.Fasso`,A.Ferrari,P.G.Ortega,A.Mairani, P. R. Sala, G. Smirnov and V. Vlachoudis, “The fluka code: Developments and challenges for high energy and medical applications”, *Nuclear Data Sheets* **120** (2014) 211, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049>.
- Tai Sakuma. Cutaway diagrams of CMS detector. May 2019. URL <https://cds.cern.ch/record/2665537>.
- The CMS Phase-1 Pixel Detector Upgrade. Technical Report arXiv:2012.14304, Dec 2020. URL <https://cds.cern.ch/record/2748381>.