

**Atf İçin:** KILIÇ A, 2021. 1-100 MeV Enerjili Proton-Silikon Etkileşmeleri ile Geritepen Üretiminin GEANT4 Benzetişimi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(4): 2746-2757.

**To Cite:** KILIÇ A, 2021. GEANT4 Simulation of Recoils Production with Proton-Silicon Interactions with 1- 100 MeV Energy. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(4): 2746-2757.

## 1-100 MeV Enerjili Proton-Silikon Etkileşmeleri ile Geritepen Üretiminin GEANT4 Benzetişimi

Adnan KILIÇ<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Bir silikon malzeme üzerine gelen radyasyon akısı (proton, nötron, gamma, elektron, ion vb.) noktasal veya küme şeklinde bir örgü hasarına sebep olabilmektedir. Bu hasarın miktarı ve biçimi, gelen radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak değişir. Protonun, silikon atomlarıyla nükleer esnek saçılması sonucu üretilen birincil çarpışma atomlarının (primary knock on atom, PKA) ve nükleer esnek olmayan etkileşmeleriyle açığa çıkan nükleer geritepen atomların eksiksiz olarak tanımlanması, silikondaki radyasyon hasarının nicel olarak belirlenmesi açısından büyük öneme taşır. Bu çalışmada, silikon üzerine gönderilen 1-100 MeV enerji aralığındaki protonların, nükleer etkileşme tesir kesitleri, nükleer geritepen atomlar ve PKA'lar GEANT4 benzetişim yöntemiyle analiz edilmiş ve sonuçların literatürle karşılaştırmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Geant4, silikon, geritepen atom, pka

### GEANT4 Simulation of Recoils Production with Proton-Silicon Interactions with 1- 100 MeV Energy

**ABSTRACT:** Radiation flux (proton, neutron, gamma, electron, ion, etc.) on a silicon material can cause mesh damage in the form of a point or cluster. The amount and shape of this damage varies depending on the type and energy of the incoming radiation. The complete description of primary knock-on atoms (PKA's) produced by the nuclear elastic scattering of the proton with silicon atoms and nuclear recoil atoms generated by their nuclear inelastic interactions is of great importance for quantitative determination of radiation damage in silicon. In this study, nuclear interactions cross sections of protons in the energy range of 1-100 MeV sent on silicon, nuclear recoil atoms and PKA's were analyzed by using GEANT4 simulation method and the results were compared with the literature.

**Keywords:** Geant4, silicon, recoil atom, pka

<sup>1</sup>Adnan KILIÇ ([Orcid ID: 0000-0003-0983-7504](https://orcid.org/0000-0003-0983-7504)), Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Bursa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Adnan KILIÇ, e-mail: adnank@uludag.edu.tr

## GİRİŞ

Silikon aygıtlar, yüksek enerji fiziği deneyleri, nükleer reaktörler ve uzay gibi şiddetli bir radyasyon çevresinde kullanılabilirler. Bu ise silikonda önemli düzeyde örgü hasarına sebep olabilir. Radyasyon hasarı genellikle protonlar, nötronlar, pionlar ve ağır iyonlar tarafından oluşturulur. Radyasyon kusurlarının bazıları elektriksel olarak aktiftirler (Ruzin ve ark., 1999). Bu aktif kusurlar silikonun bant aralığında enerji düzeylerine sahiptirler, sonuçta güç tüketimi ve gürültüye sebep olan kaçak akımın artması, tüketim bölgesindeki elektrik alanın bozulmasına neden olan boşluk yükü etkisinin meydana gelmesi, kusur enerji düzeylerinin yük taşıyıcılarını yakalaması (tuzaklama etkisi) sebebiyle algılardan alınan sinyaldeki azalma gibi aygıtların performansını etkileyen çeşitli istenmeyen sonuçlara neden olurlar (Moll, 2018). İyonlaştırıcı olmayan enerji kaybı (Nonionizing Energy Loss, NIEL), bir parçacığın malzeme içerisinde yol alırken, atomik yerdeğiştirmeler oluşturarak kaybettiği enerji miktarını veren bir büyüklüktür. NIEL, yarıiletken ve optik cihazlardaki parçacık nedenli yerdeğiştirme hasar etkilerinin anlaşılmasında çok kullanışlı bir kavram olmuştur. Bir radyasyon alanında bulunan yarıiletken aygıtlardaki veya optik sensörlerdeki bozulmaların, yerdeğiştirme hasar enerjisiyle ve sonuçta yarıiletkende depolanan NIEL ile doğrusal olarak ilişkilendirilebileceği fikrini destekleyen çok sayıda çalışma vardır (Jun ve ark., 2003). NIEL büyüklüğü, gelen radyasyonun malzeme ile etkileşmesi sonucu üretilen PKA türlerine ve bunların kinetik enerjilerine bağlıdır. Bu nedenle gelen radyasyonun türüne ve enerjisine bağlı olarak, yarıiletken içerisinde nükleer esnek olmayan süreçlerle üretilecek nükleer geritepen türler, bunların iyonlaştırıcı olmayan süreçlerle oluşturacağı PKA'lar ile gelen parçacığın nükleer esnek etkileşmelerle doğrudan ürettiği PKA türleri, miktarları ve enerjileri, NIEL'in hesaplanmasında kullanılan fiziksel büyüklükler oldukları için, bunların doğru belirlenmesi son derece önemlidir. Farklı türde parçacıklar ışınlanarak, silikon aygıtların radyasyon dayanıklılığını araştıran çok sayıda çalışma yapılmıştır (Ruzin ve ark., 1999). Nötronlar ve elektronlar çalışmalarda çok daha yaygın olarak kullanılan ışınlama parçacıkları olmalarına rağmen, protonların hasar oluşturma hızları nötron ve elektronlara kıyasla çok daha fazla olduğundan, literatürde farklı enerji aralıklarında, ışınlama parçacığı olarak protonların kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur (Messenger ve ark., 2004; Dodd, 2005; Virmontois ve Girard, 2010; Ivantchenko ve ark., 2012; Rong-Hua ve ark., 2015; Gao ve ark., 2017; Luneville ve ark., 2017; Caron ve ark., 2019). Bu çalışmada, 1-100 MeV enerji aralığındaki protonların silikonda nükleer esnek olmayan etkileşmeler ile oluşturacağı nükleer geritepen atomların ve nükleer esnek süreçleri ile açığa çıkacak olan PKA'ların tür, miktar ve enerjilerinin GEANT4 benzetim yoluyla bir tahmini yapılmıştır.

## MATERYAL VE METOT

### Radyasyon Hasarı

Silikonda yerdeğiştirme hasarı, bir Si atomunun bulunduğu konumdan örgü içerisindeki bir ara konuma yerdeğiştirmesi sonucu oluşur. Si atomu ayrıldığı konumda bir boşluk bırakır. Bu boşluk ile ara konuma yerleşen Si atomu bir Frenkel çifti meydana getirir (Li, 2008). Geritepen enerjisine sahip ilk oluşan örgü atomu "birincil çarpan atom" (primary knock on atom, PKA) olarak adlandırılır (Nordlund ve ark., 2018). Örgü atomunun yerdeğiştirmesi için sahip olması gereken en küçük enerjiye, yerdeğiştirmeye eşik enerjisi  $E_d$  adı verilir. Gelen parçacık tarafından doğrudan veya birbirini izleyen nükleer etkileşmeler vasıtasıyla açığa çıkan tüm ikinciller (nükleer geritepenler, diğer ikincil parçacıklar) tarafından hedef PKA'lar üretilebilmektedir (Iwamoto ve ark., 2018).

Protonlarla ışınlanan silikon aygıtlarda veya diğer elektronik cihazlarda, protonun enerjisine bağlı olarak Coulomb, nükleer esnek veya esnek olmayan etkileşmeler vasıtasıyla yerdeğiştirme hasarı

oluşur (Jun ve ark., 2003). Yaklaşık 10 MeV altı proton enerjilerinde, PKA'ların üretilmesinde Coulomb etkileşmeleri etkili olur. Gerçekte, iç tabakalardaki elektronlar, boşluk yükü etkisi (space charge) yaparak çekirdek yükünü elektrostatik olarak perdelerler, bu nedenle Coulomb potansiyeli azalır. Bu durum Ziegler, Biersack, Littmark (ZBL) perdeli Coulomb potansiyeli vasıtasıyla hesaplamaya katılır. 10 MeV'den daha yüksek proton enerjilerinde, nükleer saçılmalar ihmal edilemez hale gelir. 10 MeV'den daha yüksek enerjili protonlar silikonla tamamen iki mekanizmayla etkileşirler: **Nükleer esnek saçılma**; 50 MeV'in altındaki enerjilerde baskın olur. Proton, hedef atomun elektron bulutu içerisinde yayılır, bu sırada perdelenmemiş Coulomb itmesi vasıtasıyla proton çekirdekle etkileşir ve silikon çekirdeğine bir enerji aktarır, aldığı enerji ile örgü atomu yerinden ayrılır ve PKA oluşur. PKA'nın enerjisi yerdeğiştirme eşik enerjisinden (silikon için genellikle  $E_d = 21$  eV alınır (Akkerman ve ark., 2001)) büyük olursa, PKA durgun hale gelmeden önce örgü içerisinde ardışık olarak diğer örgü atomların yerdeğiştirmelerine neden olur. Bu yerdeğiştiren örgü atomlarına SKA (secondary knock-on atom) adı verilir. **Nükleer esnek olmayan saçılma**; yaklaşık 10 MeV'in üzerinde sıklıkla görülmeye başlanan bir kusur üretim mekanizmasıdır (Donegani, 2017). Bu süreçlerle oluşan nükleer geritepenler enerjilerine bağlı olarak silikonda PKA üretimine katkı yaparlar. PKA'lar malzeme içerisinde hasar sürecini başlatır ve geniş bir hasarlı bölge veya kusur kümeleri meydana getirirler (Li, 2008). Yerdeğiştirme sağanakları, PKA'ların türü (kütlesi, yükü) ve enerji dağılımıyla yönetildiğinden, gelen radyasyon tarafından üretilen nükleer veya hedef geritepen tür ve enerjilerinin belirlenmesi önemli bir unsur olmaktadır (Rayaprolu ve ark.,2016). Gelen radyasyon veya PKA'ların yol açacağı hasarın doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi, benzetişimde her bir fiziksel etkileşme türünün eksiksiz olarak hesaba katılmasını gerektirir (Jun ve ark., 2003).

### **Benzetişimde Kullanılan Araçlar**

**Geant4:** Bu çalışmada, silikon üzerine gelen protonların takibini yapmak için GEANT4 (Geometry and Tracking) Monte Carlo aracının 10.0 sürümü kullanılmıştır. GEANT4 çok farklı parçacık türlerinin çeşitli ortamlarda taşınımını mikroskobik ölçekte yapabilen C++ dilinde yazılmış nesne yönelimli bir benzetişim aracıdır. Başlangıçta yüksek enerji fiziği uygulamaları için CERN (the European Organization for Nuclear Research) tarafından geliştirilmiş, günümüzde çok sayıda farklı alanda uygulama alanına sahip olmuştur (Agostinelli ve ark.,2003). GEANT4'te, benzetişimin çalışabilmesi için kesinlikle olması gereken, kullanıcı tarafından hazırlanması zorunlu üç tane C++ sınıfı vardır: DetectorConstruction, PhysicsList ve PrimaryGeneratorAction. DetectorConstruction'da, algıçın geometrik tanımı (boyutları, şekli, malzemesi), element ve malzeme tanımlamaları, algıçın belirli kısımlarının hassas yapılması ve manyetik alan tanımlama işlemleri yapılır. PhysicsList'de, gelen parçacık ile algıç malzemesinin etkileşmesi sonrası açığa çıkması olası diğer ikincil parçacıkların fiziksel etkileşme modelleri ve fizik süreçleri tanımlanır. PrimaryGeneratorAction sınıfında ise, algıç içerisine gönderilecek birincil parçacıkların enerjisi, harekete başlayacakları koordinat bilgisi, gelen parçacık demet şekli (noktasal, düzlemsel, eliptik vb.) ve hareket doğrultuları bilgisi yer alır. Hazırlanmaları zorunlu olmayan, gereksinimin halinde kullanıcı tarafından oluşturulan diğer opsiyonel kullanıcı sınıfları, RunAction, EventAction, TrackingAction ve SteppingAction şeklindedir (Agostinelli ve ark.,2003).

**Root:** GEANT4 verilerini analiz etmek için CERN'de oluşturulan, bir açık-kaynak veri işleme sistemidir. GEANT4'ün çalıştırıldığı sırada üretilen veriler, ROOT dosyalarına C++ nesnelere aracılığıyla aktarılır. Daha sonra GEANT4 verileri, kullanıcı tarafından hazırlanan bir C++ komut satırları dizisi olan makro dosyaları ile histogramlar veya grafikler şekline dönüştürülür. GEANT4'te

verilerin boyutları çok büyük olabilmektedir. Bu anlamda ROOT, büyük hacimli verilere hızlı erişim açısından son derece kullanışlı bir araçtır (Brun, 1996).

### Benzetişim Detayları

**Geometri:** Benzetişimde, algıç geometrisi olarak 10 m x 10 m x 10 m boyutlarında  $d = 2.33 \text{ g cm}^{-3}$  yoğunluklu doğal silikon malzemeden yapılmış bir küp oluşturulmuştur. Bu küpün bir yüzey alanının 0.8'lik kısmına rastgele konumlardan başlatılan 1-100 MeV enerjili protonlar gönderilmiştir. Genellikle silikon algıç kalınlıkları uygulama alanına göre farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısında (Large Hadron Collider , LHC) yer alan ATLAS, CMS, ALICE, LHCb vb. deneylerde iç iz takip edici silikon algıç kalınlıkları tipik olarak 100  $\mu\text{m}$  ile 500  $\mu\text{m}$  arasında değişebilmektedir (Bortoletto, 2015). Bu çalışmada, elektromanyetik süreçler dikkate alınmamış, yalnızca nükleer esnek ve esnek olmayan süreçler benzetişime dahil edildiğinden, tüm süreçlerin var olduğu duruma göre, protonlar enerjilerine bağlı olarak ilk etkileşme öncesinde silikon içerisinde çok daha uzun yol alabilmektedirler.  $\mu\text{m}$  mertebesindeki silikon kalınlıkları gelen parçacık ile silikon algıç arasındaki etkileşme olasılığının azalmasına neden olur. Silikon boyutunun büyük alınmasıyla, söz konusu enerjideki protonların ilk nükleer etkileşmelerini silikon içerisinde yapabileme olasılıkları artmış, böylece  $\mu\text{m}$  kalınlık düzeyinde çok yüksek parçacık akılarında açığa çıkması olası ikincil ürünlerin, programda 10 m silikon kalınlığı ile daha düşük proton akılarında elde edilmesi mümkün hale gelmiştir.

**Fizik:** GEANT4'te fizik listesi, belirli bir benzetişim uygulaması için gerekli olan parçacık türlerini, fizik modellerini ve tesir kesitlerini bir araya getiren ve düzenleyen bir C++ sınıfıdır. GEANT4'te bir reaksiyonun son durumu fizik modelleri ile hesaplanır. Fizik listeleri, parçacıkların madde ile nasıl etkileşeceğinin tarifini oluşturmak için fizik modelleri ile tesir kesitlerini bir araya getirir. Fizik listeleri "süreç (process)" işlevini görüp, fizik süreçleri, benzetişime fizik listeleri aracılığıyla dahil edilir. Kullanılacak fizik listeleri, gelen parçacık türüne ve parçacık enerjisine bağlı olarak tamamen kullanıcı tarafından seçilir. Burada, çalışılan proton enerji aralığına en uygun olan fizik listeleri seçilmiş ve benzetişime dahil edilmiştir. Çizelge 1'de 1-100 MeV enerjili protonların silikonla etkileşmeleri için kullanılan, fizik listeleri, fizik modelleri ve tesir kesiti takımlarının isimleri verilmektedir.

**Çizelge 1.** GEANT4 benzetişimde kullanılan fizik listeleri

<b>Hadronik Esnek Saçılma</b>	
<b>Fizik Listesi :</b> G4HadronElasticPhysics	
<b>Fizik Modeli :</b> G4ChipsElasticModel	Tüm enerjilerdeki gelen protonlar, nötronlar, pionlar, kaonlar ve anti-protonlar
<b>Tesir Kesiti :</b> G4BGGNucleonElasticXS	Barashenkov parametrizasyonu < 91 GeV Glauber-Gribov parametrizasyonu >91 GeV
<b>Hadronik Esnek Olmayan Saçılma</b>	
<b>Fizik Listesi :</b> G4HadronInelasticQBBC	
<b>Fizik Modeli :</b> G4BinaryCascade + G4PreCompoundModel (Buharlaştırma (Evaporation), Filyon, Fermi parçalanması)	PreCompound model : 0 - 170 MeV protonlar ve nötronlar için geçerli, Binary Cascade Model: 0-10 GeV protonlar ve nötronlar, 0-1.3 GeV $\pi^+$ , $\pi^-$ için geçerli
<b>Tesir Kesiti:</b> G4BGGNucleonInelasticXS	Barashenkov parametrizasyonu < 91 GeV, Glauber-Gribov parametrizasyonu >91 GeV

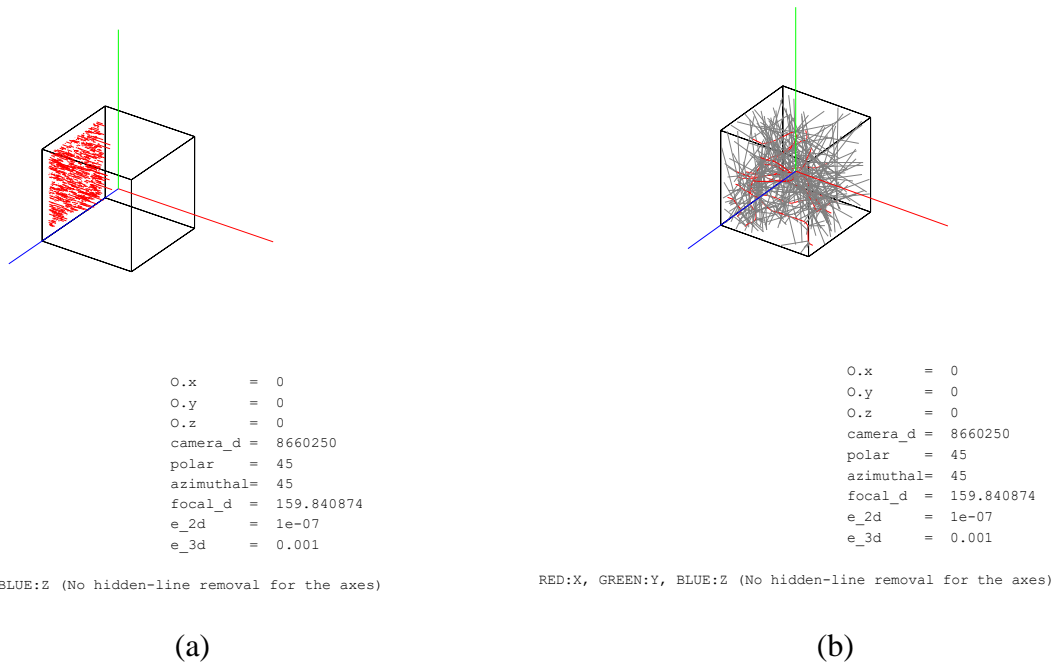
**Hadron-çekirdek esnek saçılma modellemesi:** GEANT4'te, hadronların çekirdeklerden esnek saçılması için dört model vardır: GHESISHA ve CHIPS'e (the chiral invariant phase space) dayanan

parametrelendirilmiş modeller, Glauber yaklaşımı ve dağınık kırınım (diffuse diffraction). Bu çalışmada, hadron-çekirdek esnek saçılması için G4HadronElasticPhysics fizik listesinde, CHIPS'e dayanan G4ChipsElasticModel fizik sınıfı kullanılmıştır. CHIPS modeli, tüm enerjilerdeki gelen protonlar, nötronlar, pionlar, kaonlar ve anti-protonlar için geçerlidir (Allison ve ark., 2016).

**Hadron-çekirdek esnek olmayan saçılma modellemesi:** İkili sağanak modeli (Binary Cascade model), gelen parçacık ile çekirdek içerisindeki nükleonların yayılımının zamandan bağımsız benzetişimini yapan bir "içsel çekirdek sağanak (intra nuclear cascade, INC)" modellerinden biridir. İkili sağanak modeli, tüm N-N\* (çekirdek-uyarılmış çekirdek) ve rezonans kanallarını hesaba katarak nükleon-nükleon etkileşmelerini gerçekleştirir. 0 ile 10 GeV enerji aralığında kullanılabilen ancak 70 MeV-100 MeV aralığında daha çok kabul edilir sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Daha düşük enerjilerdeki esnek olmayan çarpışmaların örneklenmesinde ön bileşik model (precompound model) uygulanır. İkili sağanak modelinde, ikincil nükleonların ve mezonların üretimi tam olarak ele alınır, ardından uyarılmış artık çekirdeğin (residual nucleus) kararlı duruma geçişi, ön bileşik model kullanılarak yapılır ve bunu yine uyarılmış çekirdeği kararlı hale geçirme modelleri olan, çekirdek buharlaşma (nuclear evaporation), hafif çekirdekler için çekirdek parçalanması (nuclear break-up) ve fisyon modelleri takip eder (Truscott ve ark., 2004).

### GEANT4'te Proton Takibi Ve Veri Oluşturma Yöntemi

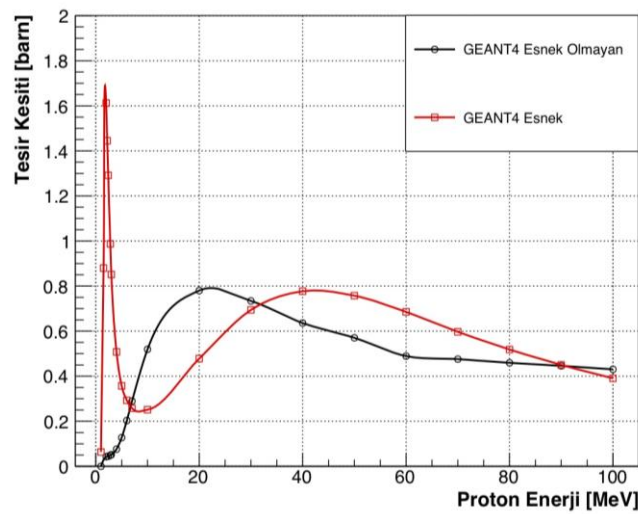
Protonun geldiği enerjiyle silikonda ilk etkileşmeyi yapıncaya kadar aldığı yol (iz uzunluğu), ortamla etkileşime uğradığı ilk noktada açığa çıkan ikincil parçacıkların (nükleer veya hedef geritepenler, elektron, gamma gibi diğer ikinciller) türleri (yükleri, atom numaraları, kütle numaraları, isimleri), sayıları, üretildikleri nükleer kanallar ve bunların ortaya çıkma sayıları, ikincillerin kinetik enerjileri gibi bilgiler SteppingAction sınıfı içerisinde gerçekleştirilir. Benzetişimde, protonun harekete başladığı enerjiyle silikondaki ilk nükleer etkileşmesi sonrası hemen takibi sonlandırılır. Böylece veriler gelen proton enerjisine ait olmuş olur. Protonların ilk etkileşme noktalarından alınan veriler, RunAction sınıfına aktarılır. RunAction sınıfında, SteppingAction'dan alınan iz uzunluğu bilgisinden, gelen proton başına ortalama serbest yol  $\lambda$  (cm) hesaplanır. Buradan ortalama nükleer etkileşme tesir kesitleri  $\sigma_{ort} (\text{cm}^{-1}) = \lambda^{-1}$  ve  $\sigma_{ort} (\text{cm}^2) = \sigma_{ort} (\text{cm}^{-1}) \cdot M_{Si} \cdot (d \cdot N_A)^{-1}$  formülü ile hesaplanır. Burada  $M_{Si} = 28.086$  g doğal silikonun mol kütlesi,  $N_A$  Avogadro sayısı ve  $d = 2.33$  g  $\text{cm}^{-3}$  doğal silikonun yoğunluğudur.  $1 \text{ cm}^2 = 10^{24}$  barn dönüşümünden,  $\sigma_{ort}$  (barn) olarak elde edilir. Tüm protonların takibi tamamlandıktan sonra, proton başına nükleer etkileşme kanallarının çağırılma sayıları, ortalama tesir kesitleri, ikincillerin üretilme sayıları, ikincil türleri ve ikincil ortama enerjileri RunAction sınıfı aracılığıyla bilgisayar ekranına yazdırılır. İstenen veriler ayrıca benzetişim esnasında ROOT dosyalarına aktarılır. Örneğin, 70 MeV'lik protonun silikondaki GEANT4 benzetişiminin, DAWN olay görüntüleme arayüzü (Perl, 2003) ile oluşturulmuş bir görüntüsü Şekil 1'deki gibidir.



**Şekil 1.** (a) 70 MeV’lik 1000 tane protonun (kırmızı yörüngeler) silikonla ilk etkileşme görüntüsü (b) 70 MeV’lik 10 tane protonun (kırmızı yörüngeler) silikon içerisinde durgun hale gelinceye kadarki olan etkileşmelerinin görüntüsü, diğer renklerdeki yörüngeler ikincil parçacıklara aittir

## BULGULAR VE TARTIŞMA

TENDL’a (TALYS-based evaluated nuclear data library) göre proton nükleer esnek saçılmasına Rutherford (Coulomb) katkısı 10 MeV’in altındaki protonlar için önemli olur. 10 MeV ve yukarı enerjilerde nükleer esnek etkileşme Coulomb’tan çok daha fazla baskındır (Caron ve ark.,2019). Bu çalışmada, esnek saçılmaya Coulomb katkısı dahil edilmemiş, protonun nükleer esnek ve esnek olmayan etkileşme türleri ele alınmıştır. GEANT4 benzetiminde, silikonda proton nükleer esnek ve esnek olmayan etkileşmelerinin toplam tesir kesiti değişimi Şekil 2’deki gibi elde edilmiştir.



**Şekil 2.** 1-100 MeV enerjili protonların silikonda nükleer esnek / esnek olmayan etkileşmeleri toplam tesir kesiti dağılımlarının GEANT4 benzetimi

Çizelge 2’de, GEANT4 ile 70 ve 100 MeV enerjili protonların, silikonda nükleer esnek olmayan reaksiyonlarla ürettikleri nükleer geritepen atom türleri ve enerji aralıkları verilmektedir.

**Çizelge 2.** 70 MeV ve 100 MeV proton için silikon içerisinde oluşan geritepen atomlar

$E_p = 70 \text{ MeV}$		$E_p = 100 \text{ MeV}$	
Al24, Al25, Al26, Al27, Al29	57.505 keV --> 9.9343 MeV	Al24, Al25, Al26, Al27, Al28	2.1334 keV --> 11.285 MeV
Na21, Na22, Na23	63.637 keV --> 10.069 MeV	Na21, Na22, Na23	199.79 keV --> 11.339 MeV
Si26, Si27, Si28, Si29, Si30	10.684 keV --> 8.8297 MeV	Si25, Si26, Si27, Si28	12.193 keV --> 9.3629 MeV
Mg23, Mg24, Mg25, Mg26	95.26 keV --> 12.309 MeV	Mg22, Mg23, Mg24, Mg25, Mg26	25.616 keV --> 15.846 MeV
Ne20, Ne21	335.92 keV --> 8.4113 MeV	Ne20, Ne21, Ne22	112.12 keV --> 12.695 MeV
P28, P29	17.371 keV --> 1.3946 MeV	O15, O16, O17, O18	241.04 keV --> 14.374 MeV
C12	276.89 keV --> 13.375 MeV	P27, P28, P30	149.71 keV --> 6.8478 MeV
F18	332.2 keV --> 9.8351 MeV	C12, C13	906.33 keV --> 9.4584 MeV
		F18, F19	97.24 keV --> 14.351 MeV

**Çizelge 3.** 70 MeV ve 100 MeV protonlar geritepen kısmi tesir kesitleri ve ortalama enerjileri

HETC (Alurraddel ve ark.,1991), ENDF/B-VI (Akkerman ve ark.,2001) ve GEANT4 (mevcut çalışma) ile hesaplanmış silikon içerisinde 70 ve 100 MeV enerjili protonların esnek olmayan etkileşme kısmi tesir kesitleri ve ortalama geritepen atom enerjilerinin karşılaştırılması

Geritepen	HETC kısmi $\sigma$ (mb)	ENDF/B-VI kısmi $\sigma$ (mb)	GEANT4 kısmi $\sigma$ (mb)	HETC $E_{ort}$ (MeV)	ENDF/B-VI $E_{ort}$ (MeV)	GEANT4 $E_{ort}$ (MeV)
$E_p = 70 \text{ MeV}$						
Si	163 ± 8	110	130	0.46 ± 0.03	1.6	1.6
Al	144 ± 8	148	163	0.99 ± 0.07	2.1	2.1
Mg	166 ± 8	144	116	1.77 ± 0.1	2.3	2.7
Na	31 ± 3	47	43	2.8 ± 0.4	2.7	3.4
Ne	27 ± 3	25	12	3.1 ± 0.5	3.0	3.8
F	-	3	4	-	3.4	3.7
O	7 ± 2	5	2	3.1 ± 1	3.8	4.3
He	133 ± 7	125	113	6.7 ± 0.5	8.6	9.2
$E_p = 100 \text{ MeV}$						
Si	123 ± 4	75	102	0.47 ± 0.02	1.2	1.7
Al	123 ± 4	113	119	0.9 ± 0.07	2.3	2.2
Mg	121 ± 4	107	110	1.7 ± 0.07	2.6	2.9
Na	41 ± 2	48	48	2.9 ± 0.2	2.9	3.6
Ne	44 ± 2	45	24	3.1 ± 0.2	3.2	4.1
F	-	14	9	-	3.8	4.5
O	17 ± 1	9	6	4 ± 0.4	4.1	4.7
N	-	6	5	-	4.1	5.2
C	-	2	4	-	4.9	5.2
He	154 ± 4	144	135	6.8 ± 0.2	9.1	8.3

Protonun silikon hedef içerisindeki nükleer esnek olmayan reaksiyonları ile geritepen atom üretimi kısmi tesir kesitlerine ait GEANT4 sonuçları, ENDF/B-VI (Akkerman ve ark.,2001) ve The High energy Transport Code (HETC) (Alurraddel ve ark.,1991) ile elde edilmiş olan değerlerle karşılaştırılmıştır. HETC, 70-600 MeV orta enerjili protonlarla ışınlanan silikondan açığa çıkan iyonların türlerini ve geritepenlerin enerjilerini hesaplamak için geliştirilmiş bir benzetişim programıdır. HETC programı içerisinde, 70-600 MeV enerjili protonların silikonla nükleer etkileşimi için sağanak-buharlaştırma (cascade-evaporation) modeli kullanılmaktadır. Sonuçta bu kod vasıtası ile çeşitli nükleer reaksiyon ürünleri ve bunların geritepme enerjileri hesaplanabilmektedir. Bu kodda geritepme enerjisinin bir kısmı elektronik uyarımlara harcanmakta, elektronik kayıplar ile hasar enerjisine harcanan enerji miktarları arasındaki oran Robinson Lindhardt paylaşım formülü ile belirlenmektedir (Alurraddel ve ark.,1991). ENDF/B-VI (Akkerman ve ark.,2001), HETC kodu (Alurraddel ve ark.,1991) ve GEANT4 ile elde edilmiş olan sonuçlar arasındaki farklılıkları belirlemek için,  $E_p=70 \text{ MeV}$  ve  $E_p=100 \text{ MeV}$  proton enerjileri seçilmiş ve ana geritepen atomlarının meydana gelme kısmi tesir kesitleri, bunların ortalama enerjileri karşılaştırılmış ve sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. En hasar verici geritepen atomların Si, Al ve Mg grubu olduğu belirtilmiştir (Akkerman ve ark.,2001). Hasara en büyük katkıyı verecek olanlarından dolayı, HETC (Alurraddel ve ark.,1991),

ENDF/B-VI (Akkerman ve ark.,2001)'de yer alan 70 MeV ve 100 MeV enerjili protonların silikon içerisinde nükleer esnek olmayan süreçlerle oluşturacağı Si, Al ve Mg geritepen ürünlerin kısmi tesir kesitleri ve ortalama enerjileri GEANT4 ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Ayrıca bu proton enerjileri için Si, Al ve Mg geritepenin açığa çıkma sıklıkları yüzde olarak hesaplanmış ve sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4'te görülebilir.

**Çizelge 4.** 70 MeV ve 100 MeV proton için silikonda Si, Al, Mg oluşma yüzdeleri

$E_p$ (MeV)	Geritepen	HETC (%) (Alurraldel ve ark., 1991)	ENDF/B-VI (%) (Akkerman ve ark., 2001)	GEANT4 (%) (mevcut çalışma)
70 MeV	Si	24.2	18.1	22.3
	Al	21.4	24.4	28.0
	Mg	24.7	23.7	19.9
100 MeV	Si	19.7	13.3	18.1
	Al	19.7	20.1	21.2
	Mg	19.4	19.0	19.6

**Çizelge 5.** 70 MeV ve 100 MeV enerjili proton için silikonda Si, Al, Mg oluşma yüzde farkları

$E_p$ (MeV)	Geritepen	HETC (Alurraldel ve ark., 1991) - ENDF/B-VI (Akkerman ve ark.,2001) (% Fark)	GEANT4 - ENDF/B-VI (Akkerman ve ark., 2001) (%Fark)	GEANT4 - HETC (Alurraldel ve ark., 1991) (% Fark)
70 MeV	Si	6.1	4.2	1.9
	Al	3.0	3.6	6.6
	Mg	1.0	3.8	4.8
100 MeV	Si	6.4	4.8	1.6
	Al	0.4	1.1	1.5
	Mg	0.4	0.6	0.2

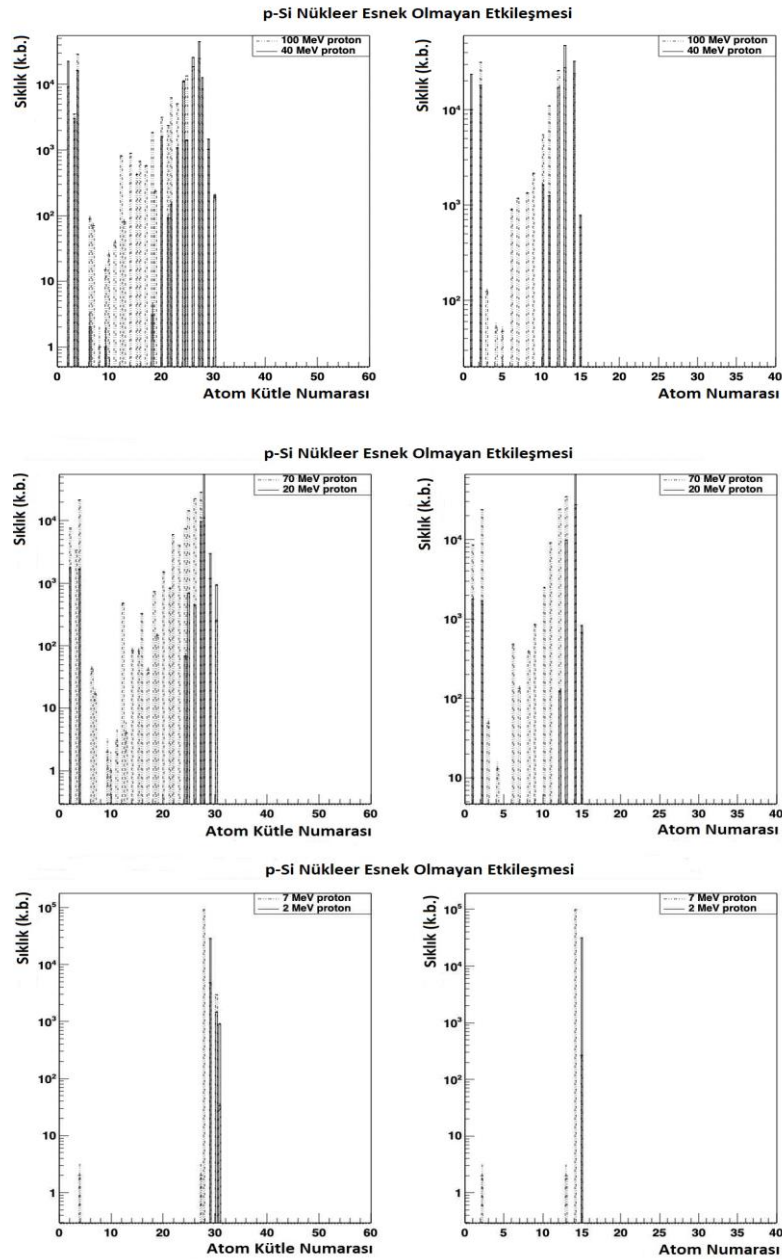
Çizelge 4'e göre Si, Al ve Mg geritepenlerin toplam oluşma sıklıkları için HETC (Alurraldel ve ark., 1991) ve GEANT4 ile elde edilen sonuçlar hemen hemen eşit iken (sırasıyla %70.3 ve %70.1), ENDF/B-VI'de (Akkerman ve ark.,2001) yaklaşık %4 daha azdır. Çizelge 5'ten görülebileceği gibi 70 MeV proton için GEANT4 ile ENDF/B\_VI (Akkerman ve ark., 2001) arasında Si, Al ve Mg oluşum sıklıkları arasında bu üç geritepen üzerinden ortalama %3.9'luk bir fark varken, GEANT4 ile HETC (Alurraldel ve ark., 1991) durumunda bu fark %4.4 civarındadır. 100 MeV proton için ise GEANT4 ile ENDF/B\_VI (Akkerman ve ark., 2001) arasındaki fark %2.2 iken, GEANT4 ile HETC (Alurraldel ve ark.,1991) arasında %2.4'tür. 70 MeV ve 100 MeV proton enerjilerinde silikonda nükleer esnek olmayan süreçlerle oluşan tüm nükleer geritepen atom ortalama enerjileri için GEANT4 ve ENDF/B-VI (Akkerman ve ark., 2001) sonuçları birbirlerine çok yakınken, HETC (Alurraldel ve ark., 1991) tarafından elde edilen sonuçların bunlara göre çok düşük olduğu Çizelge 3'ten görülebilir. 7-100 MeV enerji aralığındaki protonların silikonda nükleer esnek olmayan süreçler ile atom numarası 3'ten büyük olan tüm nükleer geritepen atomlar üzerinden, toplam tesir kesitleri, ortalama geritepme enerjileri ve ortalama atom kütle numaralarına ait GEANT4 sonuçları ile bunların literatür değerlerinin bir karşılaştırılması Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6'dan, 7-100 MeV proton enerji aralığında, nükleer esnek olmayan toplam tesir kesiti GEANT4 sonuçlarının literatürle birbirlerine oldukça yakın değerlerde oldukları, ortalama geritepen atom enerjilerinde ve üretilen geritepenlerin ortalama kütle numaralarında GEANT4'ün burada kullanılan literatür değerine göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. 1-100 MeV enerjilerindeki protonların silikon içerisindeki nükleer esnek olmayan etkileşmesine ait geritepen atom ürün türlerinin ortaya çıkma sıklık dağılımlarının GEANT4 benzetim sonucu Şekil 3'te verilmektedir. Proton enerjisi azaldıkça nükleer esnek olmayan tesir kesiti düşeceğinden, bunu doğrular nitelikte açığa çıkan ürünlerin çeşitliliğinin azaldığı bu grafiklerden açıkça görülebilmektedir.



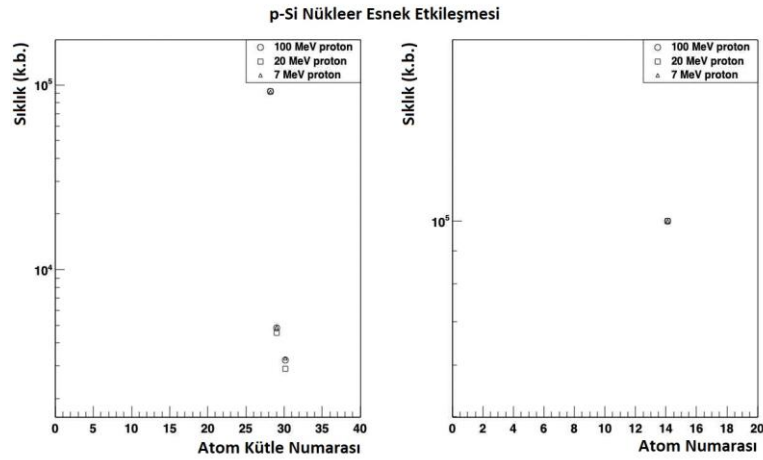
**Çizelge 6.** 7-100 MeV proton için silikon içerisinde nükleer esnek olmayan toplam tesir kesitleri ve ortalama nükleer geritepen atom enerjilerinin literatürle karşılaştırılması

$E_p$ (MeV)	Tesir Kesiti (barns) (Dale ve ark.,1994)	Tesir Kesiti (barns) GEANT4 (mevcut çalışma)	Geritepen Ortalama Enerjisi (MeV) (Dale ve ark.,1994)	Geritepen Ortalama Enerjisi (MeV) GEANT4 (mevcut çalışma)	Ortalama Atomik Kütle No. (Dale ve ark.,1994)	Ortalama Atomik Kütle No. GEANT4 (mevcut çalışma)
7	0.4554	0.2892	0.137	0.235	26.11	28.22
10	0.6127	0.5191	0.196	0.393	25.95	28.11
15	0.7135	0.7006	0.295	0.611	25.78	28.09
20	0.7275	0.7801	0.394	0.807	25.66	28.01
30	0.6835	0.7411	0.593	1.249	25.49	27.05
40	0.6253	0.6358	0.792	1.632	25.37	26.56
50	0.5746	0.5704	0.993	1.874	25.28	26.29
70	0.5016	0.4758	1.395	2.275	25.15	25.68
85	-	0.4524	1.700	2.476	-	25.23
100	0.4417	0.4305	2.008	2.639	25.00	24.87

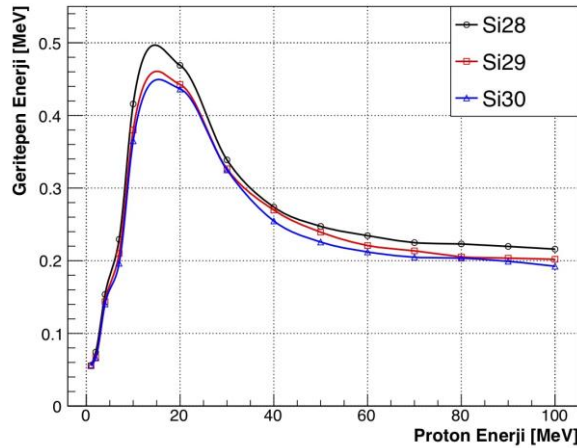


**Şekil 3.** 40 MeV-100 MeV, 20 MeV-70 MeV ve 2 MeV-7 MeV enerjili protonların silikon ile nükleer esnek olmayan etkileşmeleri ile oluşan nükleer geritepen ürünlerin atomik dağılımları

1-100 MeV enerjili protonun silikon içerisindeki nükleer esnek reaksiyonları ile açığa çıkan hedef geritepen atomların tür ve enerji dağılımlarının GEANT4 benzetimi sonuçları, sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te görülebilir.



**Şekil 4.** 7 MeV, 20 MeV ve 100 MeV enerjili protonların silikon ile nükleer esnek etkileşmesi ile oluşan PKA'ların (Si28, Si29, Si30) atomik dağılımları



**Şekil 5.** 1-100 MeV protonun silikon ile nükleer esnek etkileşmesi ile oluşan hedef geritepen atomlarının ortalama enerji dağılımları

Protonun silikonla nükleer esnek etkileşmelerinde yalnızca Si28, Si29 ve Si30 geritepenleri üretilir. Hedef geritepenlerin sıklıklarının proton enerjisine bağlı değişimlerinin GEANT4 sonucu Şekil 4'te görülebilir. Şekil 4'ten anlaşılacağı gibi 7 MeV ile 100 MeV enerji aralığında Si28'in üretilme miktarları proton enerjisinden bağımsız olup birbirlerine çok yakın iken, Si29 ve Si30 geritepenlerinin sıklıkları, değişen proton enerjisiyle birlikte küçük farklılıklar gösterebilmektedir. Protonun nükleer esnek etkileşmesinde, hedef Si atomu gelen proton enerjisinin küçük bir kesrini alır. Örneğin, GEANT4' göre, 1 MeV-100 MeV proton enerji aralığı için bir Si28 atomunun geritepme enerjisi 56 keV ile 216 keV arasında değişir. Buradan, nükleer esnek etkileşmelerle oluşan PKA'ların yerdeğiştirme hasarına katkılarının, nispeten esnek olmayan süreçlerle yapılan katkıya kıyasla daha az olacağı sonucu çıkarılabilir. Proton enerjisine bağlı olarak nükleer esnek süreçlerle silikonda oluşan hedef geritepenlerin enerji dağılımları Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5'ten görüleceği gibi, protonun nükleer esnek etkileşme olaylarından açığa çıkan hedef geritepen atomlarının (Si28, Si29, Si30) enerjileri, artan proton enerjisiyle artmakta, yaklaşık 14 MeV'lik proton için, Si28 0.51 MeV, Si29

0.47 MeV ve Si30 ise 0.46 MeV'lik geritepme enerjilerinde bir maksimuma ulaşmakta ve sonra azalmaktadır.

## SONUÇ

Protonun silikonla nükleer etkileşmesi sonucu açığa çıkan nükleer geritepenlerin türleri, miktarları ve enerjileri radyasyon hasarının uzaysal boyutunun ve büyüklüğünün belirlenmesinde ihtiyaç duyulan önemli fiziksel büyüklüklerdir. 1-100 MeV enerji aralığındaki protonların silikon içerisindeki nükleer esnek olmayan süreçleri için toplam tesir kesitleri ve bu süreçlerle açığa çıkan nükleer geritepen atom türlerine ait GEANT4 sonuçları literatürle kabul edilebilir düzeyde uyumluluk içerisindedir. Ancak söz konusu enerji aralığında protonun silikonla esnek olmayan süreçleri ile oluşan nükleer geritepen atom türlerinin oluşma sıklıklarında literatüre göre yaklaşık %5.0 ve yine söz konusu proton enerjisi için esnek olmayan süreçlerle oluşan tüm nükleer geritepen atomlar üzerinden, nükleer geritepen atom ortalama enerjilerinde ise literatüre göre yaklaşık %30 ila %40 daha büyük sonuçlar söz konusudur. Nükleer geritepen atomlar, silikon içerisinde iyonlaştırıcı olmayan süreçlerle enerji kaybına uğrayarak PKA'ları oluştururlar. Bu PKA'lar da enerjileri yeterli ise silikon içerisinde SKA'lar üreterek ardışık yerdeğiştirme zinciri ile bir kusur sağanağı meydana getirirler. Esnek olmayan etkileşmelerden farklı olarak, nükleer esnek etkileşmelerde ise PKA'lar, silikon içerisine gelen proton ile doğrudan üretilirler. GEANT4 ile protonların silikondaki nükleer esnek etkileşmeleri ile oluşturacağı PKA'ların sıklıkları ve ortalama enerjileri de ayrıca belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, 1-100 MeV enerji aralığındaki protonun silikon algıçlardaki NIEL'ine, hangi enerji ve türlerdeki nükleer geritepen atomların hangi oranlarda katkısı olabileceği sorusuna GEANT4'ün bir cevabı niteliği taşımaktadır. Ayrıca içerdiği nicel sonuçlar ile bu çalışma, literatüre güncel bir katkı sunmaktadır.

## Çıkar Çatışması

Çalışma hazırlanırken; veri toplanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması aşamalarında herhangi bir çıkar çatışması alanı bulunmamaktadır.

## Yazar Katkısı

Çalışma hazırlanması; veri toplanması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması gibi tüm aşamalarda katkı tamamen yazara aittir.

## KAYNAKLAR

- Agostinelli S ve ark. 2003. Geant4—a simulation toolkit: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 506:250–303.
- Akkerman A, Barak J, Chadwick MB, Levinson J, Murat M, Lifshitz Y 2001. Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and  $\gamma$ -rays in Si and GaAs. Radiation Physics and Chemistry, 62:301–310.
- Allison ve ark., 2016. Recent developments in GEANT4: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 835: 186-225.
- Alurraldel M, Victoria M, Caro A, Gavillet D, 1991. Nuclear and Damage Effects in Si Produced by Irradiations with Medium Energy Protons. IEE Transaction on Nuclear Science, 38(6):1210-1215
- Bortoletto D, 2015. How and why silicon sensors are becoming more and more intelligent?. Journal of Instrumentation JINST, 10 C08016: 1-13
- Brun R, Rademakers F, 1997. ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, 389: 81-86
- Caron P, Inguibert C, Artola L, 2019. Physical Mechanisms of Proton-Induced Single-Event Upset in Integrated Memory Devices. IEE Transaction on Nuclear Science, 66(7):1404-1409.

- Dale CJ, Chen L, McNulty PJ, Marshall PW, Burke EA, 1994. A Comparison of Monte Carlo and Analytic Treatments of Displacement Damage in Si Microvolumes. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 41(6):1974-1983
- Dodd PE, 2005. Physics-Based Simulation of Single-Event Effects. *IEE Transaction on Device And Materials Reliability*, 5(3):343-357.
- Donegani EM, 2017. Energy-Dependent Proton Damage in Silicon. an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften Fachbereich Physik der Universität Hamburg, (unpublished) Ph.D thesis, 203p.
- Gao F, Chen N, Hernandez-Rivera E, Huang D, LeVan PD, 2017. Displacement damage and predicted non-ionizing energy loss in GaAs. *Journal of Applied Physics*, 121, 095104
- Ivantchenko AV, Ivanchenko VN, Molina JMQ, Incerti SL, 2012. Geant4 hadronic physics for space radiation environment. *International Journal of Radiation Biology* 88:1-2: 171-175.
- Iwamoto Y, ve ark. 2018. Radiation Damage Calculation in PHITS and Benchmarking Experiment for Cryogenic-Sample High-Energy Proton Irradiation: Beam Instruments and Interactions ISBN: 978-3-95450-202-8 doi:10.18429/JACoW-HB2018-TUP2WE03
- Jun I, Xapsos MA, Messenger SR, Burke EA, Walters RJ, Summers GP, Jordan T, 2003. Proton Nonionizing Energy Loss (NIEL) for Device Applications. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 50(6):1924-1928.
- Li Z, 2008. Radiation damage effects in Si materials and detectors and rad-hard Si detectors for SLHC. *Journal of Instrumentation*, 4: P03011.
- Luneville L, Sublet JC, Simeone D, 2017. Impact of nuclear transmutations on the primary damage production: the example of Ni based steels. *Journal of Nuclear Materials*, 505:262-266.
- Messenger SR, Burke EA, Summers GP, Walters RJ, 2004. Limits to the Application of NIEL for Damage Correlation. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 51(6):3201-3206.
- Moll M, 2018. Displacement Damage in Silicon Detectors for High Energy Physics. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 65(8):1561-1582.
- Nordlund K, Zinkle SJ, Sand AE, Granberg F, Averback RS, Stoller R, Suzudo T, Malerba L, Banhart F, Weber WJ, Willaime F, Sergei L, Dudarev SL, Simeone D, 2018. Improving atomic displacement and replacement calculations with physically realistic damage models. *Nature Communications*, (9):1084.
- Perl J, 2003. DAWN GEANT4 olay görüntüleme aracı, <https://conferences.fnal.gov/g4tutorial/g4cd/Documentation/Visualization/G4DAWNTutorial/G4DAWNTutorial.html>, (erişim tarihi 14 Ekim 2003).
- Rayaprolu R, Möller S, Linsmeier CH, Spellerberg S, 2016. Simulation of neutron irradiation damage in tungsten using higher energy protons. *Nuclear Materials and Energy*, 9:29-35
- Rong-Hua L, ve ark., 2015. Phonon contribution to nonionizing energy loss in silicon detectors. *Chinese Physics C*, 39(6): 066004 1-4.
- Ruzin A, Casse G, Glaser M, Zanet A, Lemeilleur F, Watts S, 1999. Comparison of Radiation Damage in Silicon Induced by Proton and Neutron Irradiation. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 46(5):1310-1313.
- Truscott P ve ark., 2004. Assessment of Neutron- and Proton-Induced Nuclear Interaction and Ionization Models in Geant4 for Simulating Single Event Effects. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 51(6):3369-3374.
- Virmontois C, Girard S, 2010. Displacement Damage Effects Due to Neutron and Proton Irradiations on CMOS Image Sensors Manufactured in Deep Submicron Technology. *IEE Transaction on Nuclear Science*, 57(6):3101-3108.