



ORTAK NÜKLEER ARAŞTIRMA ENSTİTÜSÜ
Veksler ve Baldin Yüksek Enerji Fiziği Laboratuvarı

START PROGRAMI FİNAL RAPORU

2025 yılında IBR-2 reaktöründe termal nötronlara maruz bırakılan borla zenginleştirilmiş nükleer emülsiyonda üretilen kısa menzilli izlerin analizi

Süpervizör:

Dr. Pavel Igorevich Zarubin

Öğrenci:

Elif Nur Gün,

Hacettepe Üniversitesi, Türkiye

Katılım süresi:

13 Temmuz-23 Ağustos

2025 Yaz Dönemi

Dubna, 2025

İçindekiler

Özet.....	
Giriş:Nükleer Emülsiyon Tekniği.....	
Nükleer Emülsiyon Tekniğinin Tarihçesi.....	
Nükleer Emülsiyonlarda İz Oluşum Mekanizması.....	
Termal Nötronlarda NTE.....	
İzlerin ImageJ Programı ile Analizi.....	
Analiz Sonuçları.....	
Çıkarım.....	
Referanslar.....	

Özet

Bu çalışma, bor-10 ile zenginleştirilmiş bir nükleer emülsiyon kullanılarak $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyonu yoluyla termal nötronların ($\sim 0,025$ eV) tespitini incelemektedir. Emülsiyon, IBR-2 reaktörünün nötron akısına maruz bırakıldığında, termal nötron yakalama ile üretilen alfa parçacıkları ve ^7Li iyonlarından kaynaklanan kısa menzilli izler kaydetmektedir. Bu izler, MBI-9 ve Olympus BX63 mikroskopları kullanılarak gözlemlenmiş ve fotoğraflanmıştır. Bu yüklü ikincil parçacıklar, mikron altı uzaysal çözünürlükte tespit edilebilen yüksek iyonizasyon yoğunluklu izler ($\sim 5\text{--}10$ μm) üretmektedir. Bu izler, iz uzunluklarını elde etmek için ImageJ programı ile analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nükleer emülsiyon, termal nötronlar, $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ reaksiyonu, IBR-2 reaktörü, kısa menzilli izler, nötron görüntüleme

1. Giriş

1.1 Nükleer Emülsiyon Tekniği

Nükleer emülsiyon tekniği, parçacıkların izlerini özel olarak hazırlanmış bir fotoğrafik nükleer emülsiyonda kaydederek tespit ve analiz etmek için hassas ve etkili bir yöntemdir. Bu teknik, pionların tanımlanması ve kozmik ışınların incelenmesi de dahil olmak üzere nükleer fizikteki birçok çığır açan keşifte önemli bir rol oynamıştır. [1] Bir nükleer emülsiyon, cam veya plastik bir taban üzerine kaplanmış jelatin bir matris içinde yoğun bir gümüş halojenür mikro kristal süspansiyonundan oluşur. Yüklü bir parçacık emülsiyondan geçtiğinde, yolu boyunca ortamı iyonize ederek kimyasal iyileştirme yoluyla ortaya çıkarılabilen gizli bir görüntü oluşturur. Bu iz, optik mikroskop altında gözlemlenebilir ve parçacığın enerjisi, yükü, kütlesi ve menzili hakkında değerli bilgiler içerir. Yüksek uzaysal çözünürlüğü (genellikle bir mikronun kesirleri düzeyinde) sayesinde, nükleer emülsiyon tekniği temel parçacık fiziğinden uzay radyasyonu ölçümlerine kadar uzanan araştırma alanlarında önemli ve güçlü bir araç olmaya devam etmektedir. [2]

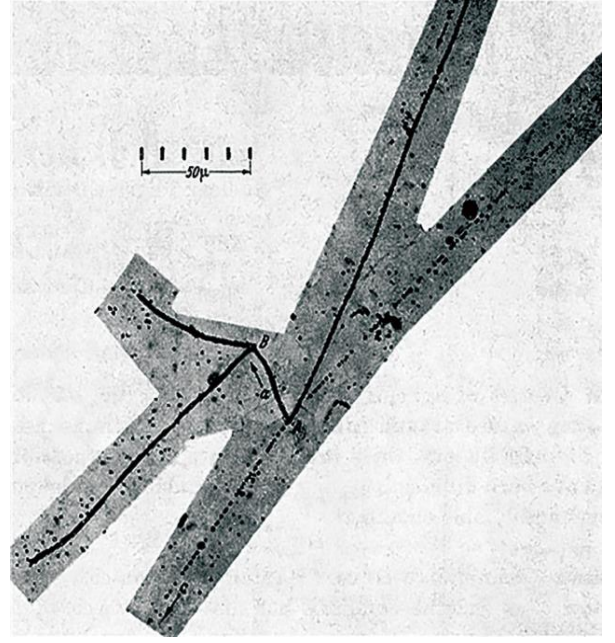
1.2 Nükleer Emülsiyon Tekniğinin Tarihçesi

Nükleer emülsiyon teknolojisinin ortaya çıktığı dönemde, dünya II. Dünya Savaşı'nın son evrelerindeydi. İnsanlar savaşın ve beraberinde getirdiği ekonomik bunalımın etkilerinden kurtulmaya çalışıyordu. O dönemde, parçacık fiziği alanında araştırma yürütecek ve liderlik edecek yeterli insan yoktu. Bu alanda çalışanlar çoğunlukla yeni mezunlar veya savaştan dönen personellerdi. Birçoğunun araştırma konusunda hevesi ve tutkusu olsa da, yeterli fizik geçmişi yoktu. Bu koşullar altında yürütülebilecek ve karmaşık gereksinimler gerektirmeyen bir araştırma alanı bulunması gerekiyordu. Fizikçiler, kozmik ışınları incelemeye karar verdiler, çünkü kozmik ışınları incelemek ve tutarlı veriler elde etmek pahalı veya karmaşık ekipmanlar gerektirmiyordu. Nükleer emülsiyonun en uygun yöntem olduğuna karar verdiler. Ucuz ve kullanımı kolay olmasının yanı sıra, çalışmayı yürütenlerden kapsamlı bir araştırma uzmanlığı da gerektirmiyordu. Araştırmacılar bilime meraklı olmalarına rağmen kapsamlı bilgiye sahip olmadıkları için, bu yöntem çalışma için idealdi. Tek yapmaları gereken, nükleer fotoğrafik emülsiyonları bir dağa yerleştirmek ve bunları bir süre kozmik ışınlarla maruz bırakmaktı. Dağların yüksekliği, deniz seviyesinden on kat daha yoğun kozmik ışınlarla maruz kalma olanağı sağlıyordu. Maruz kalmanın ardından bu katmanlar banyo edilip yıkanılıyordu. Banyo yapıldıktan sonra, emülsiyonlar içlerinden geçen yüklü parçacıkların izlerini ortaya çıkarıyordu. [3]

Bu yöntem kısa sürede çok tutarlı ve değerli sonuçlar verdi ve bilim dünyasında bilinen bir isim haline geldi. Genç ve hevesli fizikçiler Bristol'daki büyük bir konferansta bir araya geldiler. Sunumlarını yaptılar, deneysel verileri paylaştılar ve tartıştılar. Ardından, deneyi bir sonraki seviyeye taşımak için emülsiyonları daha yüksek pozlamaya maruz bırakmaya karar verdiler. Bu amaçla büyük bir sıcak hava balonu hazırlandı. Bu yöntemin istatistikleri daha tutarlı hale getireceğine inanıyorlardı. Amaç, daha yüksek irtifalarda daha fazla kozmik ışın yakalamaktı. [3, 4]



Şekil 1: Yükselişe hazır bir balon - Temmuz 1953



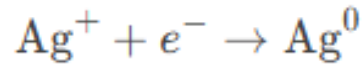
Şekil 2: Kozmik ışınlara maruz kalan bir nükleer emülsiyonda τ mezonunun varlığının ilk net gözlemi

Daha önce, neredeyse her ay yeni bir bozunma modu veya belki de yeni bir ana kütle için bilinen bir bozunma modu bulunduğu düşünülüyordu. Ancak, artık en yaygın bozunma modlarının sayıca oldukça sınırlı olduğu ve çok hassas kütle değerlerine sahip olduğu anlaşıldı. Bu emülsiyonlarda, her katman bir sonrakiyle doğrudan temas halindeydi, böylece maruziyetten sonra ikincil parçacıkların izleri bir katmandan diğerine çok daha uzun mesafelerde izlenebiliyordu. Bu emülsiyonlar, ölçüm hassasiyetinde önemli bir gelişme sağlayarak, parçacıkları benzersiz bir şekilde tanımlamamıza ve bir parçacığın menzilini ölçerek enerjisini hesaplamamıza olanak tanıyordu.

2. Nükleer Emülsiyonlarda İz Oluşum Mekanizması

Nükleer emülsiyonlar, yüksek çözünürlük sunan bir tür katı hal parçacık dedektörüdür. Nükleer emülsiyonlar, kısa menzilli, yüksek LET (Lineer enerji transferi) parçacıklarının izlerini doğrudan görselleştirip ölçebildikleri için nükleer reaksiyonları ve nötron uygulamalarını analiz etmek için tercih edilir. Emülsiyonlar aracılığıyla parçacıkları tanımlama yeteneği önemli bir avantajdır. [5, 6, 7]

Yüklü bir parçacık, borla zenginleştirilmiş nükleer emülsiyondan (çoğunlukla jelatin içindeki AgBr kristalleri) geçtiğinde, yolu boyunca atomları iyonlaştırır ve reaksiyonla birlikte gizli görüntü merkezlerindeki elektronları serbest bırakır;



İyonlaşma enerjisi kaybı (dE/dx) Bethe-Bloch formülü ile belirlenir:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 Z \rho}{m_e v^2} \left(\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right)$$

- **z:** Olay parçacığının yükü.
- **Z:** Emülsiyonun atom numarası ve kütlesi
- **I:** Ortalama uyarılma potansiyeli
- $\beta = v/c$
- **m=Durgun Kütle**

Elde edilen küçük gümüş parçacıkları, emülsiyon üzerinde görünür bir görüntü oluşturur. Sonuç olarak, foto emülsiyon bir geliştirici solüsyonu (genellikle bir amidol geliştirici) ile geliştirildikten sonra, "tanecikler" metalik gümüş parçacıklarına dönüşür. Sabitleyici, reaksiyona girmemiş AgBr'yi uzaklaştırarak izlerin kalıcı olmasını sağlar. Sonuç olarak, iz oluşumu hem nükleer reaksiyonların kinetiğine hem de fotoğrafik emülsiyonların kimyasal reaksiyonlarına dayanan karmaşık bir süreçtir. [1, 6, 7]

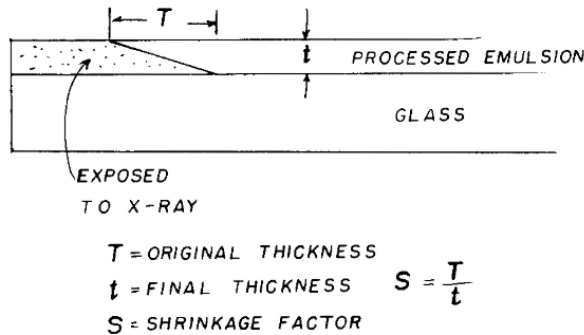
Emülsiyon tabakasının kalınlığı, nükleer emülsiyon dedektörlerinin genel etkinliğini ve hassasiyetini belirlemede önemli bir rol oynar. Daha kalın bir emülsiyon tabakası, dedektörün, özellikle emülsiyon yüzeyine dik açılarla giren parçacık yörüngelerinin genişletilmiş bölümlerini kaydetme kabiliyetini önemli ölçüde artırır. Bu artan kalınlık, daha kapsamlı bir yol yapılandırmasına olanak tanıyarak parçacık izi analizinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. [7]

Geliştirme sürecinin ardından, iyi tanımlanmış bir matematiksel ilişki sayesinde parçacık izlerinin hassas ölçümü mümkün hale gelir. Geliştirilmiş bir izin uzunluğu aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z \cdot S)^2}$$

Burada X, Y ve Z, olayın koordinatlarıdır. S, emülsiyon tabakasının büzülme faktörüdür. Büzülme olayı, kimyasal geliştirme işlemi sırasında gelişmemiş gümüş halojenür kristallerinin uzaklaştırılmasından kaynaklanır. Bu bileşenler yıkandıkça, emülsiyon hacimce küçülür ve sıkıştırılmış bir duruma ulaşır. Büzülme faktörü S şu şekilde tanımlanır:

$$S = \frac{V_{\text{initial}} - V_{\text{removed}}}{V_{\text{gelatin}}}$$



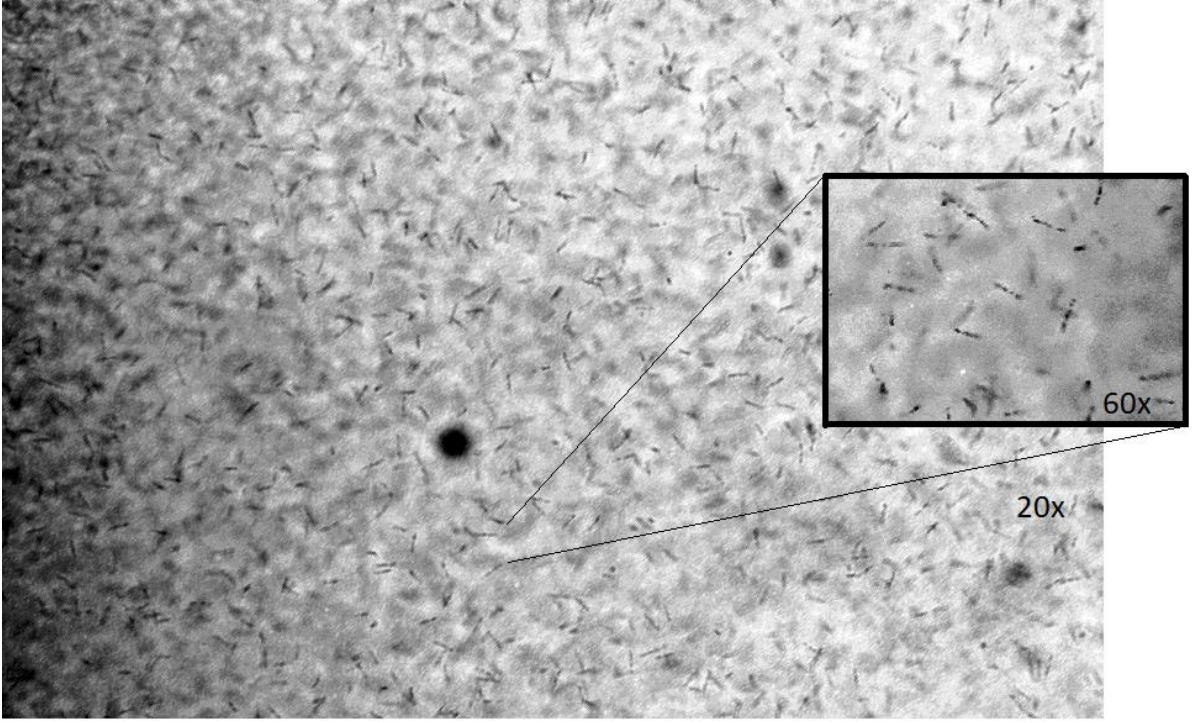
2.1 Termal Nötronlarda Nükleer İz Emülsiyon Tekniği

Termal nötronlar düşük enerjili (genellikle 0,025 eV ve 2200 m/s) ve yavaş hareket eden nötronlardır. Adlarını, ortam sıcaklığındaki atomlarla termal dengelerinden alırlar. Bu nötronlar, yüksek enerjili nötronların (örneğin, fisyon nötronları) moderatör malzemelerde (su, grafit, ağır su vb.) elastik saçılma yavaşlamasıyla oluşur. Termal nötronların çekirdeklerle etkileşime girme olasılığı, hızlarıyla (1/v) ters orantılıdır. Bu nedenle, yavaş nötronların yakalama kesiti daha yüksektir. Örneğin, ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H} \rightarrow 5330 \text{ barn}$ (0,025 eV'de) ve ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H} \rightarrow 940 \text{ barn}$. Daha düşük enerjileri nedeniyle, yalnızca yüksek kesitli malzemelerde verimli bir şekilde yakalanırlar. Nötronlar elektrik yükü taşımadığından, maddeyle etkileşimleri tamamen nükleer kuvvetler aracılığıyla gerçekleşir. Bu özellik, emülsiyonda doğrudan bir iz bırakmalarını engeller. NTE'nin çalışma prensibi, AgBr kristallerindeki yüklü parçacıkların oluşturduğu iyonlaşma izlerine dayanır. Ancak, yüksüz nötronlar bu mekanizmayı tetikleyemediğinden, tespitleri bu izi bırakan ikincil parçacıkların incelenmesiyle sağlanır. [6] Aşağıdaki reaksiyon, bir termal nötronun borla zenginleştirilmiş bir emülsiyona girdiğinde meydana gelen birincil reaksiyondur. Bor, bir nötronu yakalayıp lityum ve helyum oluşumuna neden olur. İkincil parçacıklar yüklü oldukları için, emülsiyonda iz bırakabilir ve incelenebilirler. Nötron yakalamanın uygulamaları, bor nötron yakalama terapisinde, nötron dedektörlerinde ve nötron görüntüleme filmlerinde kullanılabilir. [9]



- ${}^{10}\text{B}$ = Bor-10 (kararlı izotop)
- n = Termal nötron (düşük enerji, ~0,025 eV)
- ${}^7\text{Li}$ = Lityum-7 (kararlı izotop)
- ${}^4\text{He} (\alpha)$ = Alfa parçacığı (helyum çekirdeği)
- 2,31 MeV = Açığa çıkan toplam enerji (Bu enerji Li ve He arasında dağıtılır)

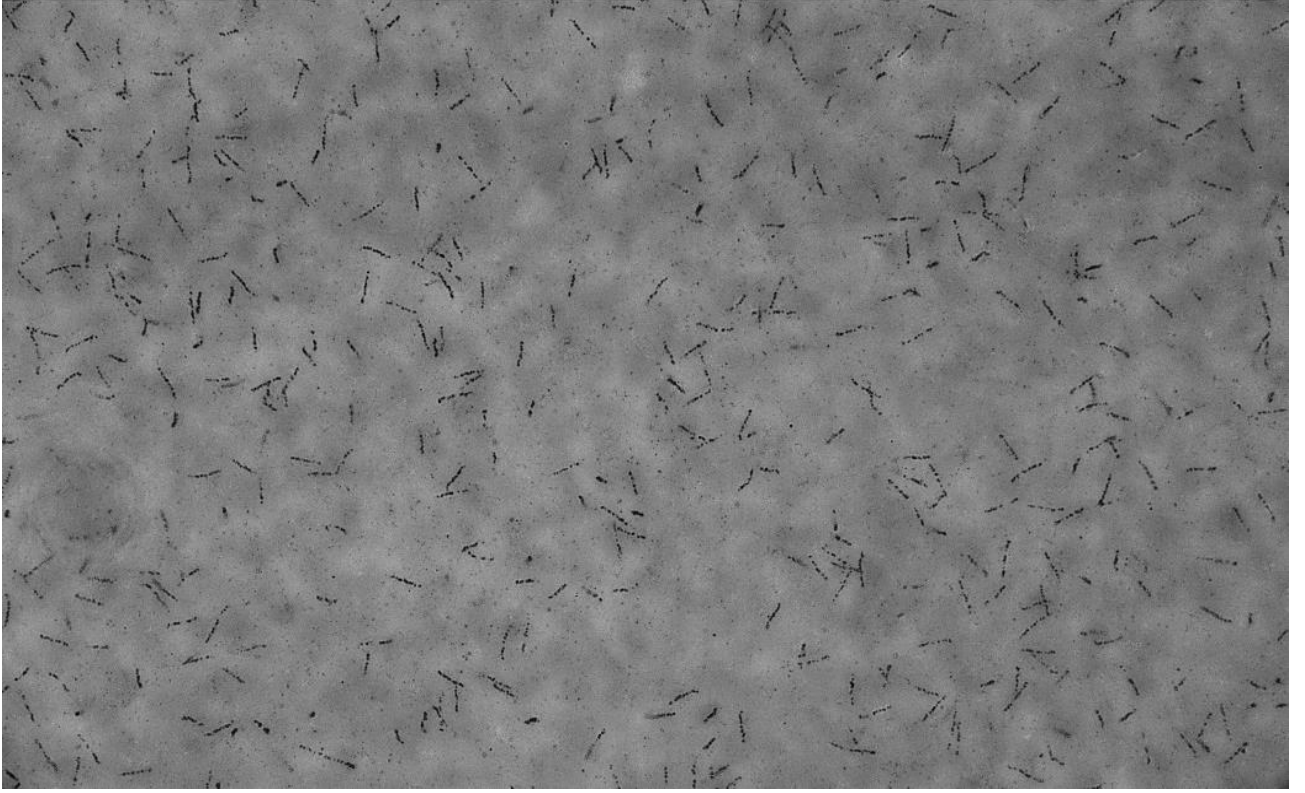
Bu reaksiyondan sonra emülsiyonda oluşan izleri görebiliriz. Sonuçların mikroskobik analizi, yüksek çözünürlüklü optik mikroskoplar (Olympus BX63) kullanılarak gerçekleştirilir ve yağ daldırma teknikleri bu süreçte kritik bir rol oynar. Genellikle 90x'e kadar büyütme sağlayan lens sistemleri tercih edilir ve yağ daldırma daha yüksek çözünürlük ve netlik sağlar. Emülsiyon numuneleri özel olarak hazırlanmış plakalara yerleştirilir ve objektif lens ile numune arasındaki hava boşluğunu ortadan kaldırmak için yağ daldırma ile kaplanır. Bu, ışık saçılımını en aza indirir ve izlerin ayrıntılı yapısının daha net bir şekilde gözlemlenmesini sağlar. [10, 11]



Şekil 3: MBI-9 mikroskobunda 20x ve 60x merceklerle görüntülenen, termal nötronlara maruz bırakılan borla zenginleştirilmiş emülsiyondaki izler



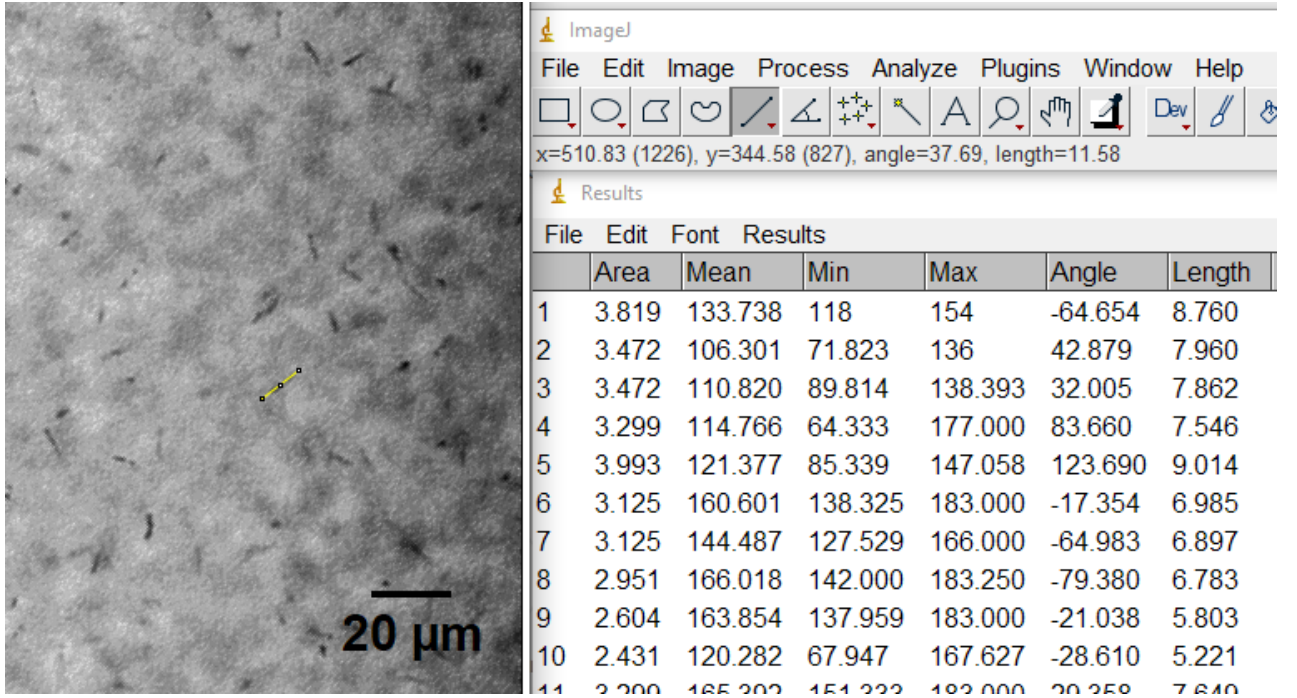
Sekil 4: Emülsiyondaki izlerin MBI-9 mikroskopi ile incelenmesi



Şekil 5: MBI-9 mikroskobunda 20x ve 60x merceklerle görüntülenen, termal nötronlara maruz bırakılan borla zenginleştirilmiş emülsiyondaki izler

2.2 ImageJ programıyla izlerin analizi

ImageJ bir görüntü analiz programıdır. Özellikle fizik ve malzeme bilimlerinde sıklıkla kullanılır. Basit arayüzüne rağmen, bu program oldukça güçlü analiz araçları sunar ve detaylı analizlere olanak tanır. Özellikle mikroskop görüntülerinin analizi için kullanışlıdır. Bir fotoğraf mikroskoptan ilk çekildiğinde, analiz için tamamen uygun değildir. Bazı fotoğraf iyileştirmeleri gereklidir. ImageJ kontrastı artırır ve analizi basitleştirir. [12]

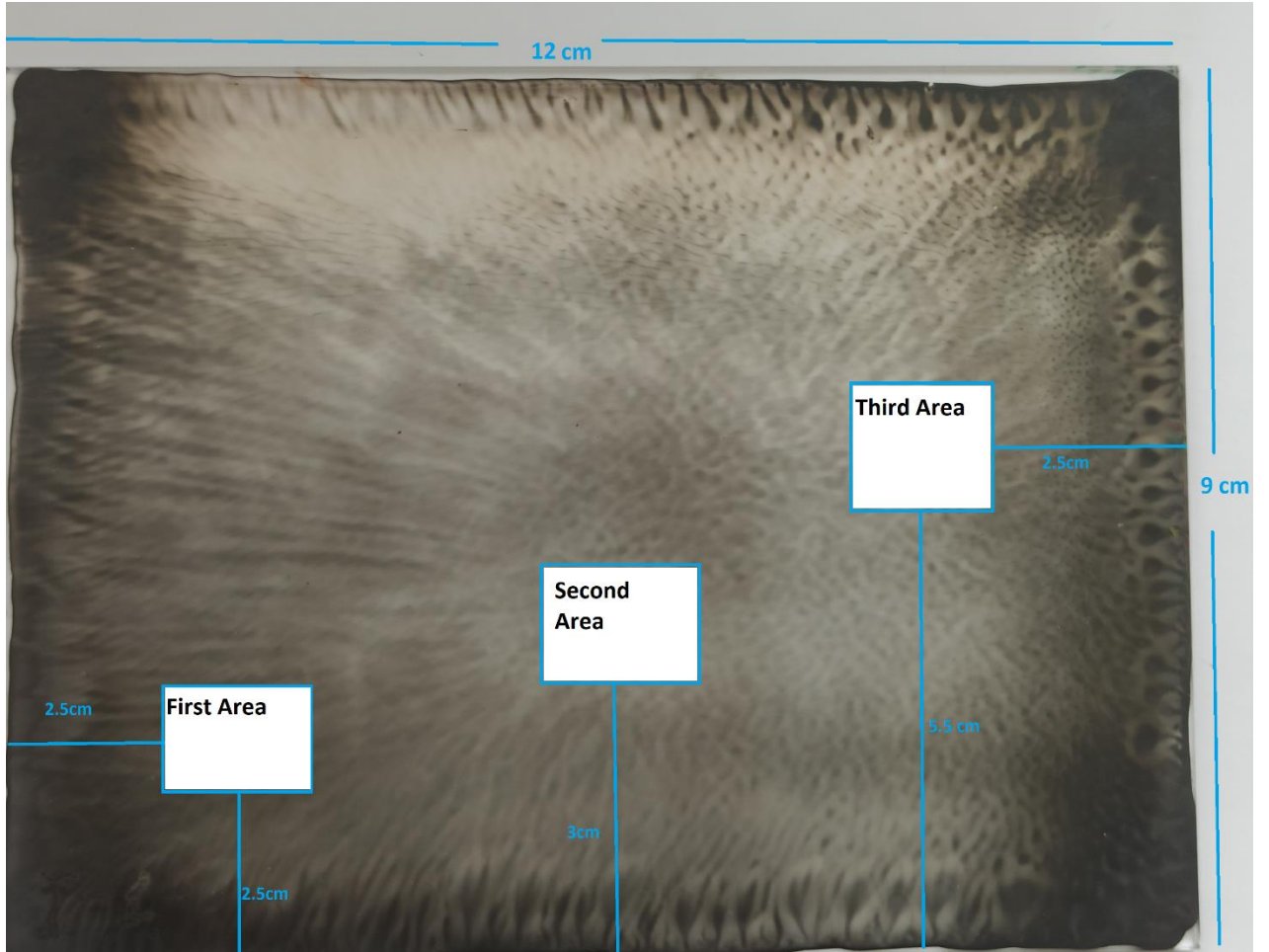


Şekil 6: ImageJ programıyla izlerin analizi

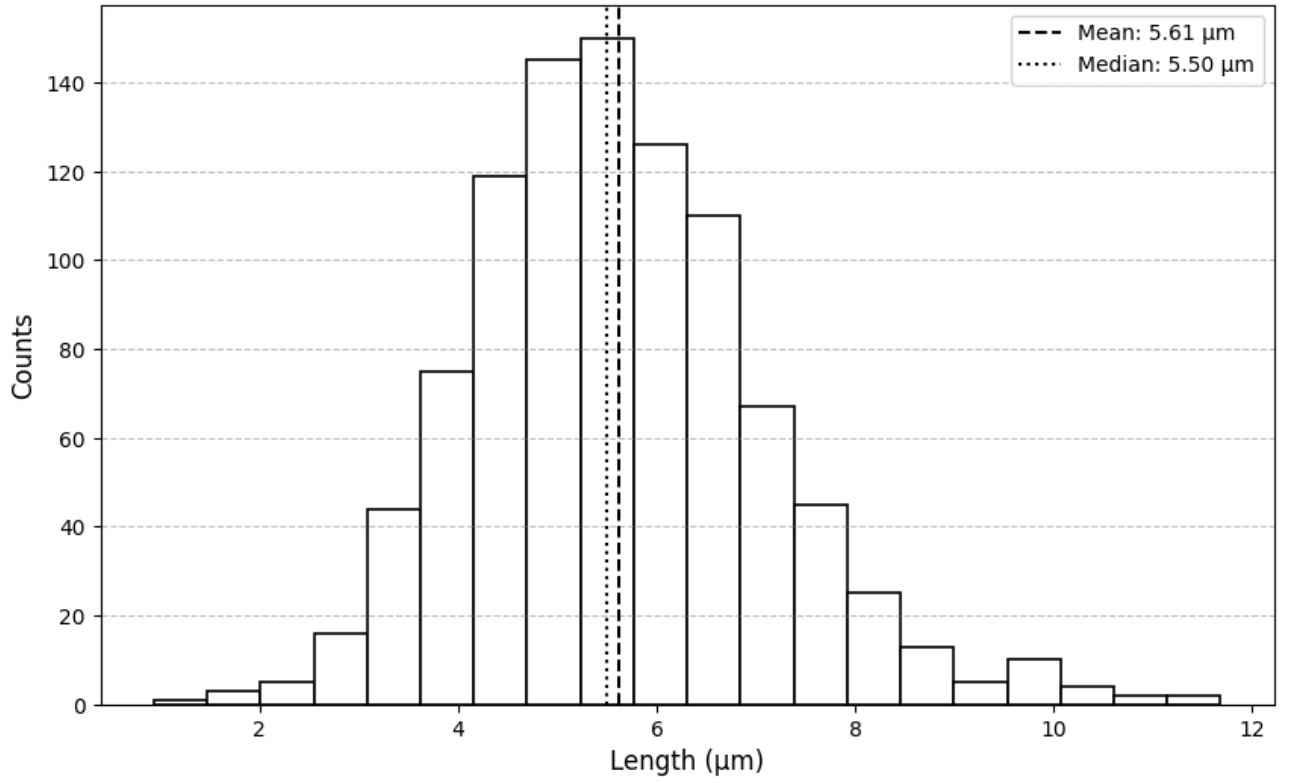
Emülsiyon üzerindeki bu izleri ImageJ kullanarak incelerken bazı noktalar dikkate alınmalıdır. Yetersiz veya aşırı nötron akısı, iz yoğunluğunu doğrudan etkiler. Düşük akı, istatistiksel olarak yetersiz verilere yol açabilirken, yüksek akı, üst üste binen izlere neden olabilir. Optimum pozlama süresi belirlenmeli ve nötron kaynağının homojenliğine dikkat edilmelidir. Yanlış mikroskop ayarları (aydınlatma, kontrast, objektif büyütme), izlerin net görüntülenmemesine neden olabilir. Yüksek çözünürlüklü ve kontrastı yüksek görüntüler alınmalı ve farklı büyütme oranları test edilmelidir. Emülsiyondaki toz, çizik veya kusurlar, nötron izleriyle karıştırılabilir ve yanlış sayılabilir (özellikle program manuel sayım yerine otomatik sayım yapıyorsa). Görüntüdeki düzensiz şekiller kaldırılmalıdır. "Dairesellik" ve "Boyut" filtreleri uygulanarak gerçek izler seçilebilir. Piksel-gerçek boyut oranı (µm/piksel) yanlış girilirse, iz boyutu ve yoğunluk hesaplamaları hatalı olacaktır. Doğru kalibrasyon, bir mikrometre slaydı kullanılarak yapılmalıdır. Ayrıca, doğru bir ölçek seçilmelidir. Kozmik ışınlar veya diğer radyasyon kaynakları ek izler oluşturabilir. Arka plan gürültüsü giderilmelidir. Bor emülsiyonundaki termal nötron izlerinin ImageJ ile analizi dikkatli bir hazırlık, doğru görüntü işleme teknikleri ve istatistiksel kontroller gerektirir. Bu, doğru ve tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlar.

2.3 Analiz Sonuçları

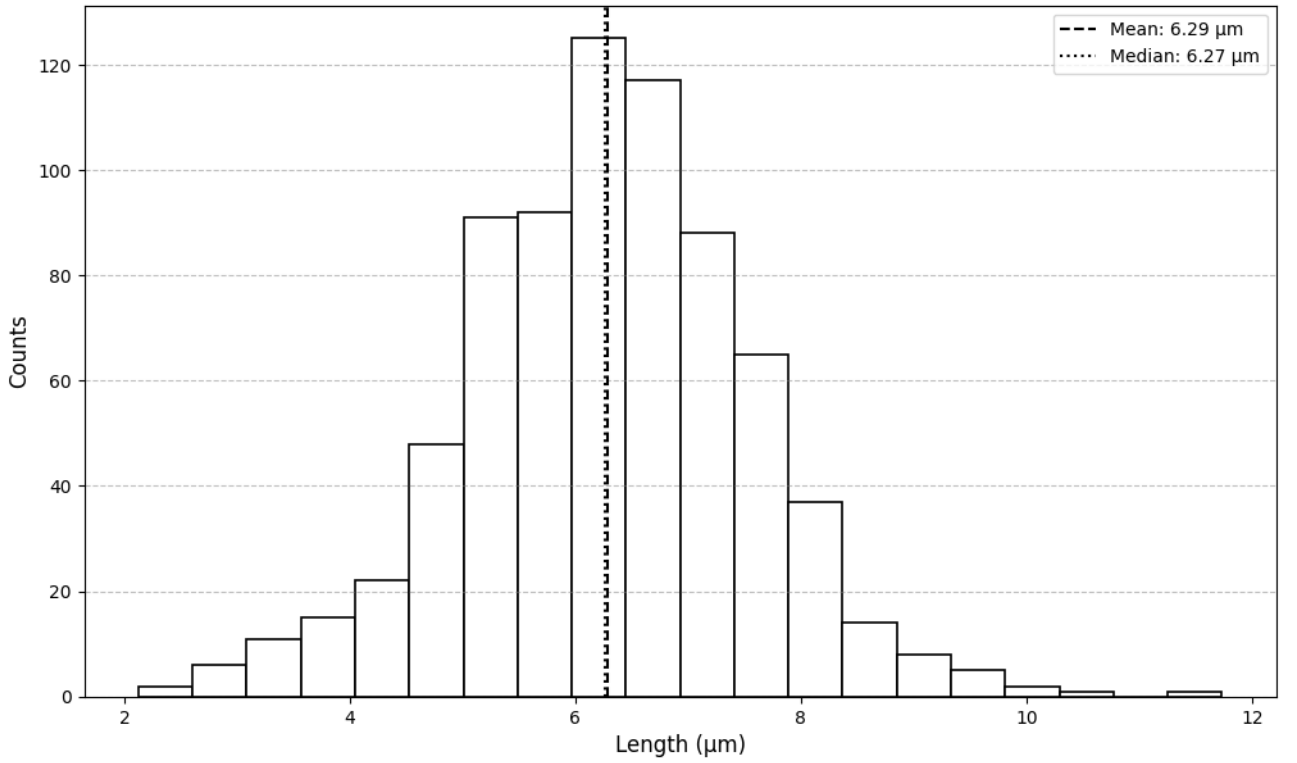
Tek bir alandan toplanan veriler numunenin tamamını temsil etmeyebilir. Çok alanlı analiz yapılmalıdır. Emülsiyon her yerinde eşit ve homojen radyasyona maruz kalmadığı için, izlerin yoğunluğu her alanda farklılık gösterir. Bu nedenle, izlerin en yüksek konsantrasyona sahip olduğu alanlar belirlenmeli ve uygun bir dağılım belirlenmelidir.



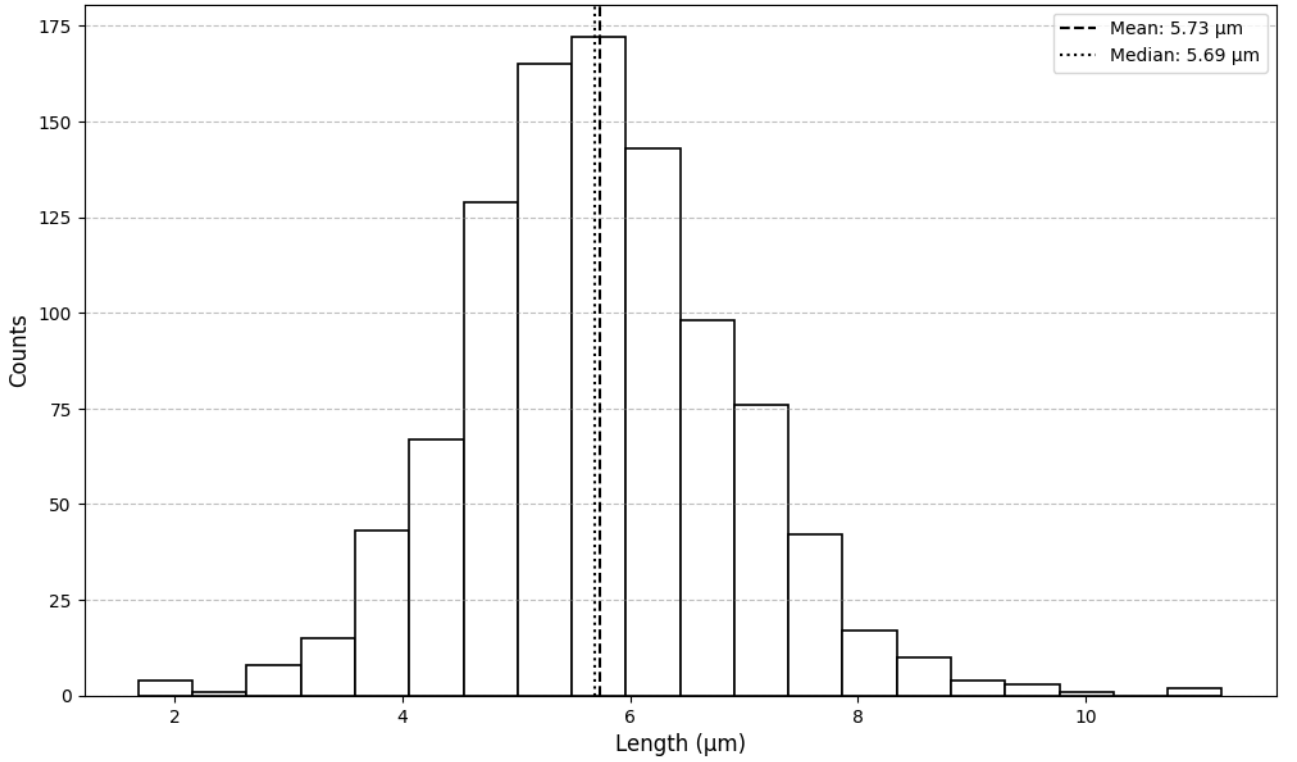
Şekil 7: Emülsiyonda incelenen çoklu alanların gösterimi



Grafik 1: Birinci alanın analiziyle elde edilen izlerin histogram çizimi



Grafik 2: İkinci alanın analiziyle elde edilen izlerin histogram çizimi



Grafik 3: Üçüncü alanın analiziyle elde edilen izlerin histogram çizimi

Borla zenginleştirilmiş nükleer emülsiyondaki kısa menzilli izlerin analizi, $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyonuyla üretilen helyum ve lityum iyon izlerinin uzunluklarını ölçmek ve sınıflandırmak için ImageJ yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. İzler, istatistiksel güvenilirliği sağlamak ve termal nötron ışınlamasındaki değişiklikleri hesaba katmak için birden fazla örnek alanında tanımlandı ve ölçüldü. Yukarıda sunulan histogramlar (Grafik 1–3), emülsiyonun üç farklı bölgesi için iz uzunluklarının dağılımını göstererek reaksiyon homojenliği hakkında fikir vermektedir. İzlerin çoğu, termal nötron yakalamasından kaynaklanan alfa parçacıkları ve ^7Li iyonları için teorik tahminle tutarlı olarak beklenen 5–10 μm aralığına düşmektedir. Farklı bölgeler arasındaki iz yoğunluğundaki değişimler, nötron akısı veya bor konsantrasyonunda yerel farklılıklar olduğunu göstermektedir. Histogramlar, iyi kontrol edilen bir maruz kalma sürecini gösteren kabaca bir Gauss dağılımı göstermektedir. Daha uzun izlerin küçük bir kısmı ($>10 \mu\text{m}$), daha yüksek enerjili ikincil parçacıklara veya arka plan etkileşimlerine karşılık gelebilir. Sert bir arka planın (kozmetik ışınlar veya doğal radyoaktivite) varlığı, iz dağılımında ve emülsiyon yüzey kusurlarında küçük düzensizliklere neden olur. Ancak bu, birincil nötron kaynaklı sinyali önemli ölçüde etkilemez. Çoklu alan analizi, emülsiyonun termal nötronlara düzgün tepki verdiğini doğrulayarak, nötron uygulamaları için uygunluğunu doğrulamaktadır. [8, 6]

2.4 Çıkarımlar

Bu araştırmada açıklanan nükleer emülsiyon testi yalnızca temel araştırma yürütmekle kalmamış, aynı zamanda uygulamalı fizikte, özellikle bor nötron yakalama terapisi (BNCT) ve nükleer astrofiziğin geliştirilmesinde kritik bir amaca hizmet etmiştir. Burada analiz edilen emülsiyonlar, Nükleer Fizik Enstitüsü'nde Prof. S.Yu. Taskaev liderliğindeki ortak bir projenin parçası olarak üretilmiştir. Bu projede, emülsiyon yığınları, termal ve epitermal nötronlar için bor-10'un yüksek kesit alanından yararlanan hedefli bir kanser tedavisi olan BNCT'yi ilerletmek için gerekli olan bir proton kaynağı tarafından üretilen epitermal (rezonans) nötronları tespit etmek üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bor-10 bir nötronu yakaladığında, $10\text{B}(n,\text{He})7\text{Li}$ reaksiyonuna girerek, kanser hücrelerini yok eden ve çevredeki sağlıklı dokuyu koruyan helyum ve lityum iyonları salar. Bu çalışmada test edilen emülsiyonlar, termal nötron etkileşimlerinden kısa menzilli izleri başarıyla kaydettikleri için, bu tür uygulamalar için malzemenin uygun üretimini ve hassasiyetini doğrulamaktadır.

Nükleer emülsiyonlarda iz analizinin kritik bir yönü, üç boyutlu yapılarını hesaba katmaktır. İzler yalnızca yanal olarak (x-y düzlemi) değil, aynı zamanda z eksenini boyunca (derinlik) da yayılır ve bu da mikroskop-fotoğraf tabanlı ölçümleri zorlaştırır. Örneğin, beklenenden daha kısa görünen bir iz, yörüngesinin emülsiyonun derinliğine doğru önemli ölçüde saptığını gösterebilir ve bu da standart optik mikroskopi altında yeniden yapılandırmayı zorlaştırır. Bu z eksenini penetrasyonu, izlerin gerçek uzunluğunu ve yönünü belirsizleştirebilir ve örtüşen veya kısmen görünen izleri çözmek için dikkatli odak düzlemi ayarlamaları ve yağ daldırma teknikleri gerektirir. Bu zorluklara rağmen, nükleer emülsiyonların yüksek uzaysal çözünürlüğü, izlerin büzülme ve geometrik etkiler için uygun düzeltmelerle analiz edilmesi koşuluyla, hassas ölçümlere olanak tanır.

Dahası, bu emülsiyonlar nükleer astrofizikte, özellikle yıldız nükleosentez süreçlerini simüle eden proton güdümlü reaksiyonların incelenmesinde gelecekteki deneyler için umut vaat etmektedir. Burada sunulan çoklu alan analizi ve iz uzunluğu dağılımları da dahil olmak üzere ön sonuçlar, emülsiyonun sert bir arka planın varlığına rağmen yüksek LET parçacık izlerini çözme yeteneğini göstermektedir. Muhtemelen kozmik ışınlardan veya diğer ortam radyasyonundan kaynaklanan bu arka plan, gözlemlenen yüzey kusurlarına katkıda bulunur, ancak emülsiyonun genel performansını etkilemez. Emülsiyonun termal nötronlara verdiği tepkiyi doğrulayarak, bu çalışma hem tıbbi hem de astrofizik araştırmalarda daha geniş kullanımını desteklemektedir.

Referanslar

- [1]W. H. Barkas, Nuclear Research Emulsions, California-Berkeley: Academic Press of New York and London, 1963.
- [2]P. C.F.Powell, The Study of Elementary Particles by the Photographic, London,New York,Los Angeles,Paris: Pergamon Press, 1959.
- [3]M. B. Ceolin, "Discreet Charm of The Nuclear Emulsion Era," University of Padova, Department of Physics, Italy, 2002.
- [4] CERN Courier, "Nuclear Emulsions," CERN , vol 6, May 1966, pp. 83-87.
- [5] Artemenkov, D.A., Bradnova, V., Zaitsev, A.A. *et al.* "Irradiation of nuclear track emulsions with thermal neutrons, heavy ions, and muons" *Phys. Atom. Nuclei* 78, 579–585 (2015), <https://doi.org/10.1134/S106377881504002X>.
- [6] Zarubin, P.I. "Recent applications of nuclear track emulsion technique" *Phys. Atom. Nuclei* 79, 1525–1535 (2016), <https://doi.org/10.1134/S1063778816130093>.
- [7] Mamatkulov, K.Z. et al. "Computer analysis of nuclear track emulsion exposed to thermal neutrons and Cf source," *Journal of Physics: Conference Series* 675 (2016) 022012. doi:10.1088/1742-6596/675/2/022012, 2016.
- [8] Zaitsev, A.A. "Analysis of exposure of nuclear emulsion to thermal neutrons" Final qualifying work, Smolensk University, 2014 (in Russian), http://becquerel.jinr.ru/thesisreferate/Zaitsev_Analiz_oblucheniya_yadernoy_emulsii_teplov2.pdf.
- [9]Wikipedia, "Boron neutron capture therapeutics".
- [10]K. Morishima, "Latest Development in Nuclear Emulsion Technology," ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.082>, 2015.

[11]A. U. K. T.TAni, "Track formation in nuclear emulsion plates for cosmic rays imaging with stabilized Ag nanoparticles," ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165427>, 2021.

[12]T. F. W. Rasband, "ImageJ User Guide,IJ 1.46r," 2012. [Online].