

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

**İKİ NOKTALI NÜKLEER REAKTÖR KİNETİK MODELİNİN BİR GRUP  
GECİKEN NÖTRON PREKÜRSÖRLERİ İÇİN ÇÖZÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHTAP ARSLAN

TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. ALİ İHSAN GÖKER

BİLECİK, 2022

10461402

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

**İKİ NOKTALI NÜKLEER REAKTÖR KİNETİK MODELİNİN BİR GRUP  
GECİKEN NÖTRON PREKÜRSÖRLERİ İÇİN ÇÖZÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHTAP ARSLAN

TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. ALİ İHSAN GÖKER

BİLECİK, 2022

10461402

## BEYAN

İki Noktalı Nükleer Reaktör Kinetik Modelinin Bir Grup Geciken Nötron Prekürsörleri İçin Çözümü adlı yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezi/dönem projesinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>		<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<b>X</b>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>			
<b>2- TÜBİTAK</b>			
Diğer;..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Mehtap ARSLAN**

**Tarih**

.....

**İmza**

.....

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, bir nükleer reaktörde, kritikliğe yakın çalışma şartlarında çekirdek ve yansıtıcıdaki nötron popülasyonlarının zamana bağlı değişimini iki nokta nükleer reaktör kinetik modeli sonlu farklar yöntemiyle çözerek tespit etmek amaçlanmaktadır. Bu şekilde nükleer reaktör çalışmalarına ışık tutmak hedeflenmektedir.

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER' e değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavı sırasında değerli jüri üyelerine/ danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali İhsan GÖKER' e çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri için eşim Ufuk ARSLAN ve kızlarım Elif ARSLAN ile Esmâ ARSLAN' a ve bu çalışmamla beraber doğup, büyüyen oğlum Ömer Alp ARSLAN' a teşekkür ederim.

**Mehtap ARSLAN**

**2022**

## ÖZET

### İKİ NOKTALI NÜKLEER REAKTÖR KİNETİK MODELİNİN BİR GRUP GECİKEN NÖTRON PREKÜRSÖRLERİ İÇİN ÇÖZÜMÜ

Fizik madde ve enerji arasındaki ilişkiyi inceleyen doğa bilimlerinin temelidir. Madde atomlardan, atomlar ise üçlü kuark yapısına sahip baryonlar ve elektronlardan oluşur. Elektriksel olarak yüksüz ve kararsız bir baryon olan nötronlar atom çekirdeğinde protonlarla beraber fiziksel evrenin şekillenmesinde, madde ve enerji arasındaki dönüşümde önemli bir rol üstlenir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber günümüzde enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılayacak çözüm yollarından biri olan nükleer güç reaktörlerinde nötronların davranışlarını iyi analiz etmek gerekir. Kesintisiz güç sağladığı için yenilenebilir enerji kaynaklarına göre geçerli bir alternatif oluşturan nükleer güç reaktörlerinden elde edilen enerji miktarı, yapım ve işletim maliyetleri ve kullanılan yakıt miktarı bakımından hala cazibesini korumaktadır. Nükleer enerjinin ticari kullanımı ise nükleer reaktörlerde gerçekleşen kontrollü fisyon reaksiyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Bu çalışmada, fisyon reaksiyonunu tetikleyen nötronlar çabuk ve geciken nötronlar olmak üzere ikiye ayrılmış, süperkritik bir reaktör için, iki-nokta kinetik model numerik ve iteratif olarak çözülmüştür. Reaktivitenin lineer olarak arttığı durum için çekirdek, yansıtıcı ve geciken nötron sayıları ilk değerler seçilerek zamanın fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Sonuçlarımız, artan geciken nötron oranı  $\beta'$  nin çekirdek ve reflektördeki nötron sayılarının üstel artış eğilimini kırdığını göstermektedir.  $\beta = 0.5$  değerine ulaşıldığında çekirdek ve reflektördeki nötron sayıları stabilize olmaya,  $\beta > 0.5$  bölgesinde ise asimptotik olarak sifıra yakınsamaktadır. Geciken nötronlar  $\beta = 0.5$  olduğunda geciken nötron sayısı sifırdan farklı bir değere asimptotik olarak yakınsamaktadır. Bu şekilde, geciken nötron oranını artırarak süperkritik bir reaktörde fisyon reaksiyonunun kontrol altında tutulabileceği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nükleer Reaktör, Fisyon, Geciken Nötron, Kinetik Model.

## ABSTRACT

### SOLUTION OF THE TWO POINT NUCLEAR REACTOR KINETIC MODEL FOR ONE GROUP OF DELAED NEUTRON PRECURSORS

Physics is the foundation of the natural sciences that studies the relationship between matter and energy. Matter consists of atoms, while atoms consist of baryons and electrons with a triple quark structure. Neutrons, which are electrically unstable and unstable baryons, play an important role in the formation of the physical universe, in the transformation between matter and energy, together with protons in the atomic nucleus. With the development of technology, the need for energy is increasing day by day. It is necessary to analyze the behavior of neutrons in nuclear power reactors, which is one of the solutions to meet the energy needs. The amount of energy obtained from nuclear power reactors, which is a viable alternative to renewable energy sources because it provides uninterrupted power, still maintains its attractiveness in terms of construction and operating costs and the amount of fuel used. The commercial use of nuclear energy is through the controlled fission reaction that takes place in nuclear reactors. In this study, the neutrons that trigger the fission reaction are divided into two as fast and delayed neutrons, and the two-point kinetic model for a supercritical reactor is solved numerically and iteratively. For the case where the reactivity increases linearly, the number of nuclei, reflectors and delayed neutrons were calculated as a function of time by choosing the initial values. Our results show that increasing lagging neutron ratio  $\beta$  breaks the exponential increase trend of neutron numbers in the core and reflector. When  $\beta = 0.5$  is reached, the number of neutrons in the core and reflector stabilizes, and in the region of  $\beta > 0.5$ , it converges to zero asymptotically. When delayed neutrons are  $\beta = 0.5$ , the number of delayed neutrons converges asymptotically to a nonzero value. In this way, it has been observed that the fission reaction can be kept under control in a supercritical reactor by increasing the delayed neutron ratio.

**Keywords:** Nuclear Reactor, Fission, Delayed Neutron, Kinetic Model.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
GRAFİKLER LİSTESİ .....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. MADDE ENERJİ İLİŞKİSİ .....	3
2.1. Maddenin Yapısı .....	3
2.2. Atom Çekirdeğinin Kararlılığı ve Radyoaktif Bozunmalar .....	5
2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Nükleer Enerji .....	12
2.4. Nükleer Güç Reaktörleri .....	13
2.5. Nükleer Güç Reaktörlerinde Nötron Taşınımı ve Kritiklik .....	15
2.6. İki Noktalı Reaktör Kinetik Modeli ( Nötron Difüzyon Denklemleri) .....	17
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	19
4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	34
KAYNAKÇA .....	35

## TABLÖLAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Yukarı Quarkın Ve Aşağı Quarkın Özellikleri .....	<b>4</b>
<b>Tablo 2.2.</b> Proton Ve Nötronun Özellikleri .....	<b>4</b>
<b>Tablo 2.3.</b> Nükleer Yakıt Özellikleri Ve Filyon Nötronları .....	<b>11</b>
<b>Tablo 2.4.</b> Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Yüzdeleri.....	<b>12</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1.</b> Proton Ve Nötron Quark Yapısı Ve Elektriksel Yükleri .....	<b>3</b>
<b>Şekil 2.2.</b> Nükleon Başına Bağlanma Enerjisi ( A: Atomun Kütle Numarası) .....	<b>5</b>
<b>Şekil 2.3.</b> Atomların Nötron Sayıları / Proton Sayıları Oranına Göre Kararlılığı .....	<b>6</b>
<b>Şekil 2.4.</b> Alfa, Beta Ve Gamma Bozunmalarının Madde İçinde İlerlemesi .....	<b>7</b>
<b>Şekil 2.5.</b> Alfa, Beta Ve Gamma Bozunmalarının Manyetik Alanda İzlediği Yörüngeler .....	<b>7</b>
<b>Şekil 2.6.</b> Parçalanma (Fisyon) Tepkimesi.....	<b>9</b>
<b>Şekil 2.7.</b> Zincirleme Tepkime .....	<b>10</b>
<b>Şekil 2.8.</b> U-235'in Termal Fisyonundan Üretilen Fisyon Ürünleri .....	<b>11</b>
<b>Şekil 2.9.</b> Basınç Sulu Nükleer Reaktör Çalışma Sistemi .....	<b>14</b>
<b>Şekil 2.10.</b> Fisyon Reaksiyonu .....	<b>16</b>

## GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa

- Grafik 3.1.**  $\beta=0.1$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ve farklı  $\rho$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi .....**19**
- Grafik 3.2.**  $\rho =0$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.03$ ,  $\beta=0.05$ ,  $\beta=0.07$ ,  $\beta=0.09$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişimi.....**21**
- Grafik 3.3.**  $\rho =0$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.03$ ,  $\beta=0.05$ ,  $\beta=0.07$ ,  $\beta=0.09$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişimi.....**23**
- Grafik 3.4.**  $\rho =0.1+20t$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.03$ ,  $\beta=0.05$ ,  $\beta=0.07$ ,  $\beta=0.09$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi .....**25**
- Grafik 3.5.**  $\rho=0.1+20t$ ,  $\Lambda_C =0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.1$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\beta=0.7$ ,  $\beta=0.9$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi .....**26**
- Grafik 3.6.**  $\rho=0.1+20t$ ,  $\Lambda_C=0.8$ ms,  $l_r=3$ ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=2$ ,  $N_r(0)=6$ ,  $C(0)=1$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.03$ ,  $\beta=0.05$ ,  $\beta=0.07$ ,  $\beta=0.09$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi .....**28**
- Grafik 3.7.**  $\rho=0.1+20t$ ,  $\Lambda_C=0.8$ ms,  $l_r=3$ ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=2$ ,  $N_r(0)=6$ ,  $C(0)=1$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  (  $\beta=0.1$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\beta=0.7$ ,  $\beta=0.9$ ) değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi .....**30**
- Grafik 3.8.**  $\rho =0$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü.....**32**
- Grafik 3.9:**  $\rho =0,1+20t$ ,  $\Lambda_C=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü.....**33**

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

$\rho$  : Reaktivite

$\beta$  : Geciken Nötron Öncü Oranı

$a_{cr}$  : Reaktör Çekirdeğinden Yansıtıcıya Kaçan Nötron Yoğunluğu

$a_{rc}$  : Yansıtıcıdan Reaktör Çekirdeğine Dönen Nötron Yoğunluğu

$\Lambda_c$  : Sonsuz Korda Nötron Üretim Zamanı

$l_r$  : Yansıtıcıdaki Nötronların Ortalama Ömrü

$\lambda$  : Bozunum Sabiti

$N_r$  : Yansıtıcıdaki Nötron Yoğunluğu

$N_c$  : Reaktör Çekirdeğindeki Nötron Yoğunluğu

$C$  : Geciken Nötron Öncü Yoğunluğu

$ms$  : Milisaniye

$s$  : Saniye

$MeV/c^2$  : Kütle Birimi

$MeV$  : Milyon Elektron Volt (Enerji Birimi)

$MW$  : Megawatt ( Güç Birimi)

$mm$  : Milimetre

$CO_2$  : Karbondioksit

$e$  : Elemanter Yük

$n^0$  : Nötron

$p^+$  : Proton

$e^-$  : Elektron

$\bar{\nu}$  : Antinötrino

$u$  quark : Yukarı Quark

$d$  quark : Aşağı Quark

$\beta^-$  : Beta Negatif Bozunumu

$\beta^+$  : Beta Pozitif Bozunumu

$\alpha$  : Alfa Bozunumu

$\gamma$  : Gamma Bozunumu

**SI** : Uluslararası Birimler Sistemi (Fransızca: Syst me International D'unit s)

**X** : Ana ekirdek

**Y** : r n ekirdek

**A** : Kütle Numarası

**Z** : Atom Numarası

${}^4_2\text{He}$  : Alfa (A) Parçacığı

$e^+$  : Pozitif Elektron, Pozitron

$\nu$  : Nötrino

**Th**<sup>232</sup> : Toryum Elementi

**U**<sup>233</sup>, **U**<sup>234</sup>, **U**<sup>235</sup>, **U**<sup>238</sup> : Uranyum Ve İzotopları

**Pu**<sup>239</sup> : Plütonyum Elementi

**Br** : Brom Elementi

**Kr** : Kripton Elementi

**Sr** : Strontiyum Elementi

**Cs** : Sezyum Elementi

**I** : İyot Elementi

**Xe** : Ksenon Elementi

**PWR** : Basınçlı Su Reaktörü

**BWR** : Kaynar Sulu Reaktör

**PHWR** : Basınçlı Ağır Su Reaktörü

**GCR** : Gaz Sođutmalı Reaktör

$\Delta t$  : Zaman Adımı

**t** : Zaman

## 1. GİRİŞ

Fizik madde ve enerji arasındaki ilişkiyi inceleyen doğa bilimlerinin temelidir. Madde atomlardan; atomlar, atom çekirdeği ve elektronlardan; atom çekirdeği, proton ve nötronlardan oluşur. Baryon olarak adlandırılan grupta yer alan nötron ve protonların temel yapı taşı ise kuark olarak adlandırılan yapılardır. Kuark yapısındaki farklılıklar nötronların protonlardan daha kararsız olmasını ve protona dönüşme isteğini belirler. Madde ve enerji arasındaki dönüşümde kilit rol oynayan nötronlar fiziksel evrenin şekillenmesinde de etkili olur. (Ocak, 2015) Temelde “iş yapabilme yeteneği” olarak tanımlanan enerji, teknolojinin gelişmesine katkıda bulunmuştur. Teknolojinin gelişmesiyle beraber günümüzdeki enerji ihtiyacı ise giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak için fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer güç reaktörleri gibi farklı kaynaklar kullanılmaktadır.

Bilimsel ve çoğu siyasi otorite iklim değişikliğinin ana etkeni olarak gösterilen küresel ısınmaya fosil yakıtların kullanımındaki artışıyla paralel olarak CO<sub>2</sub> gibi sera gazlarının salınımındaki artışın neden olduğu konusunda hemfikirdir. Ulaşım ve özellikle enerji üretiminde sera gazı salınımının fazla olduğu fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilerek küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır. (Mitchell, 2016, s. 2) 1940’ların ortalarından itibaren nükleer enerji çalışmaları başlamış ancak meydana gelen kazalar ve nükleer atıkların saklanması başta olmak üzere çeşitli problemler ülkeleri yeni enerji kaynağı arayışına itmiştir. (Yıldırım & Örnek, 2007, s. 33) Konutlar ve özellikle sanayinin enerji ihtiyacının karşılanmasında ise alternatif enerji kaynaklarının veriminin ve kullanılabilir potansiyeli düşük olması bu ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Nükleer güç reaktörlerinden elde edilen enerji miktarı, yapım ve işletim maliyetleri ve kullanılan yakıt miktarı bakımından hala cazibesini korumakta, yüksek verim ve kapasite potansiyeli bakımından önemli bir alternatif haline gelmektedir. Meydana gelebilecek nükleer kazalar sonrasındaki radyoaktif serpinti olasılığı ise nükleer enerjiye karşı olumsuz önyargılar ve negatif bakış açısıyla kamuoyunda tedirginliğe neden olmaktadır. (Bunn & Heinonen, 2011, s. 1580) Nükleer enerji santrallerine karşı oluşan negatif önyargının kırılabilmesi için nükleer santrallerin yapım, işletim ve nükleer atıkların saklanması gibi temel konulardaki tüm tereddütlerin detaylıca ele alınması ve kaygıların giderilmesi gerekir. (Dai & vd, 2019, s. 200) Bu nedenle, nükleer reaktörün kalbinde gerçekleşen fisyon reaksiyonunun kontrol altında tutulabilmesi için yakıt çubuklarındaki nötron sayılarının kontrol altında tutulması, hem fisyon reaksiyonunun güvenli bir şekilde devam etmesi hem de zincirleme bir reaksiyona sebep olmaması açısından önem arz etmektedir. (Göker, 2021, s. 117)

Nükleer reaktör çekirdeği, yansıtıcı ve geciken nötronların zamana bağlı değişimi girift, karmaşık diferansiyel denklemler kullanılarak oluşturulan iki nokta reaktör kinetik modelinde, nükleer reaktörün tamamı en etkili nötron oluşum zamanına sahip ve uzaydan bağımsız, tek bir nokta olarak kabul edilerek nötron sayısı taşınım denklemleri oluşturulur. Tek nokta reaktör kinetik modelinin, küçük bir nükleer çekirdeğin kalın bir yansıtıcıyla çevrelenmesiyle oluşan bu reaktörlerin davranışını açıklamakta yetersiz kaldığı deneysel sonuçlarda göstermiştir. İki-nokta reaktör kinetik modelin yansıtıcılı nükleer reaktörlerin nötronların taşınımı ve reaksiyonların gelecekteki davranışlarını açıklayabilmek için daha doğru sonuçlar vereceği savunulmaktadır. (Van Dam, 1996, s. 81) Nötron popülasyonunda nükleer çekirdekte yansıtıcıya kaçanlarla yansıtıcıdan geri dönen nötron kesirleri yoluyla ve gecikmiş nötronların nükleer reaktör içindeki nötron taşınımında hesaba katılması iki nokta reaktör kinetik modeli ile verilir.

Kaynak terimi olmaksızın, bu modelle çabuk, geciken ve yansıtıcıdan dönen nötron sayılarının üstel fonksiyonlardan oluşan denklemleri temel matris metodu gibi teknikler kullanılarak analitik çözüm yapılabilir. (Aboanber & Nahla, 2018, s. 288) İki nokta ve tek nokta reaktör kinetik modellerinin analitik çözümlerinin zamanla değişmeyen parametrelerle belirli bir limitte benzer sonuçlar verdiği gösterilmiştir. (Aboanber A. E., 2009, s. 726) Bu çalışmada, sonlu farklar yöntemi kullanılarak ilk değer problemi haline getirilen iki nokta reaktör kinetik modelinin iteratif çözümü yapılacaktır. Reaktör çekirdeğindeki, yansıtıcıdaki ve geciken nötron sayılarının zamana göre değişimini veren iteratif denklem grubu, farklı geciken nötron prekürsörleri ile sabit ve lineer olarak artan reaktivite için kritik ve süperkritik bir reaktörde çözümlere hesaplanacaktır.

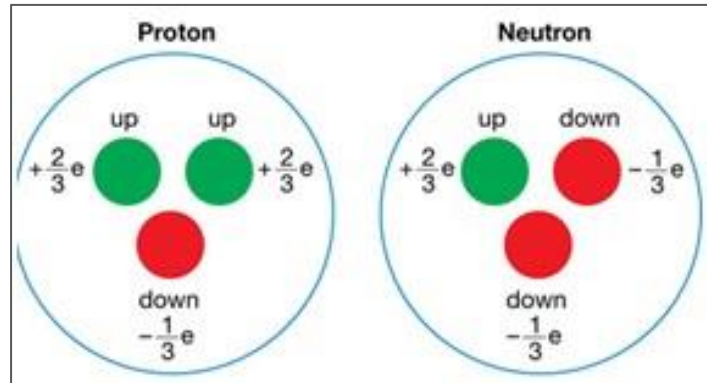
## 2. MADDE ENERJİ İLİŞKİSİ

Albert Einstein' in ünlü denklemi  $E=mc^2$ ' de belirtildiği gibi madde ve enerji arasında birbirine dönüşen bir süreç vardır. Maddenin nelerden meydana geldiği, yapıtaşlarının özellikleri yıllar boyunca teknolojinin gelişmesine paralel olarak daha iyi anlaşılır hale gelmiştir. Asıl önemli olan insanlığın giderek artan enerji ihtiyacına çözüm bulmak için bu dönüşümün en yüksek verimle yapılmasıdır.

### 2.1. Maddenin Yapısı

Fiziksel evrendeki maddeler atomlardan, atomlar çekirdek ve elektrondan, çekirdek ise bir çeşit baryon olan proton ve nötrondan oluşur. Baryonlar ise quark adı verilen daha temel parçacıkların belli şartlardaki kombinasyonlarda bir araya gelmesiyle oluşan üçlü yapılardır. Böylece parçacık fizikçilerine göre madde; yukarı quark, aşağı quark ve elektron lepton olmak üzere üç temel yapıdan oluşur. Nötronlar elektriksel yük olarak nötrdür. Tek başına kararsız olan nötron en kararlı baryon olan protona dönüşür. Bu dönüşünde quarklar arası elektriksel yük dengesi yeniden düzenlenir. (Ocak, 2015) Denklem 2.1' de gösterildiği gibi sıfır elektrik yüklü nötrondan +e elektrik yüklü proton, -e yüklü elektron ve antinötrino oluşur. (Meriç P. D., 2017, s. 1)

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1. Proton, Nötron Quark Yapısı Ve Elektriksel Yükleri

**Kaynak:** (FizikBilimi, 2017)

Şekil 2.1' de görüldüğü gibi proton uud quark yapısında ve kararlı iken, nötron udd quark yapısında ve kararsızdır. Proton ve nötronun elektrik yükleri arasındaki farkın kaynağı olan yukarı quark ve aşağı quarkın özellikleri ise Tablo 2.1' de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** Yukarı Quarkın Ve Aşağı Quarkın Özellikleri

Quark Adı	Sembolü	Elektrik Yükü	Kütlesi (MeV/c <sup>2</sup> )	Spini
Yukarı ( Up)	u	+2/3e	1,5 - 4	1/2
Aşağı ( Down)	d	-1/3e	4 – 8	1/2

**Kaynak :** (Çek, 2016, s. 1)

**Tablo 2.2.** Proton Ve Nötronun Özellikleri

Parçacık adı	Grubu	Sembolü	Elektrik Yükü	Kütlesi (MeV/c <sup>2</sup> )	Spini
Proton	Hadron/ Baryon	P <sup>+</sup>	+1e	938,3	1/2
Nötron	Hadron/ Baryon	n <sup>0</sup>	0	939,6	1/2
Elektron	Lepton	e <sup>-</sup>	-1e	0,511	1/2

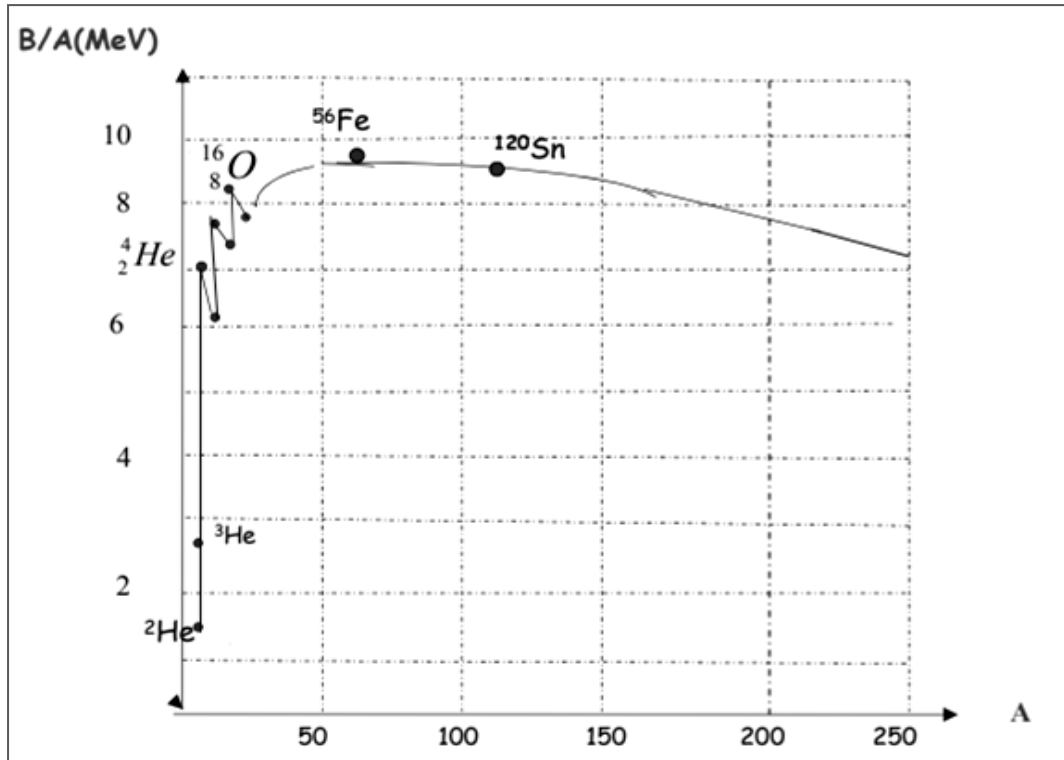
**Kaynak:** (Çek, 2016, s. 2)

Kararsız olan nötron çeşitli radyoaktif bozunmalarla daha kararlı olan protona dönüşür. Hadronların baryon alt grubundan olan proton ve nötron ile birlikte -1e elektrik yüküne sahip leptonların bir alt çeşidi olan elektronun özellikleri Tablo 2.2’de yer almaktadır. Proton ve nötronla aynı spine sahip olmasına rağmen kütlelerinin çok daha az olması atom çekirdeği dışında yer alan elektronların maddenin elektriksel ve kimyasal etkileşmeler nedeniyle ortamda hareket etmesine ve maddeye iletkenlik özelliği kazandırarak elektrik akımı oluşturmasını sağlamaktadır. (Çek, 2016, s. 2) Quarkların kütleleri arasındaki fark, nötronun kütlelerinin protonunkinden % 0,14 daha fazla ve kararsız olmasının nedenidir. (Ocak, 2015) Ağır çekirdek kütlelerine sahip radyoaktif maddelerin enerji kaynağı olarak kullanılmasında yukarı quark, aşağı quark ve elektron lepton parçacıkları etkilidir. (Çek, 2016, s. 6) Ağır çekirdek kütlelerine sahip radyoaktif maddeler  $\beta^-$  bozunumu,  $\beta^+$  bozunumu, elektron yakalama,  $\alpha$  bozunumu ve  $\gamma$  ( gamma) ışınları yayma gibi çeşitli yollarla enerji açığa çıkmasına sebep olurlar. Radyoaktif fisyon parçalanmasıyla oluşan ürün çekirdeklerden bazıları uyarılmış durumdan daha kararlı hale geçebilmek için elektromanyetik radyasyonun bir çeşidi olan gamma ışınlarıyla beraber yüksek ısı enerjisi de yayınlırlar. (Meriç N. , 2018, s. 1)

## 2.2. Atom Çekirdeğinin Kararlılığı ve Radyoaktif Bozunmalar

Atom çekirdeğinin parçacık ya da elektromanyetik ışına yaparak bozunmasına radyoaktivite denir. Atom çekirdeğindeki proton ve nötronların ortak adı ise nükleondur. Atomun kütlesinin büyük bölümü çekirdektedir. Nükleonlar arasındaki güçlü nükleer kuvvet, elektromanyetik (coulomb) kuvvetten daha büyük olduğunda atom çekirdeği yapısını korur. Bu durumda atom çekirdeği kararlıdır denir. Atom çekirdeğinin kütlesi çekirdeği oluşturan nükleonların toplam kütlesinden daha azdır. İki değer arasındaki fark çekirdek bağlanma enerjisidir. Bağlanma enerjisinin en büyük değerlerindeki atom çekirdekleri kararlıdır.

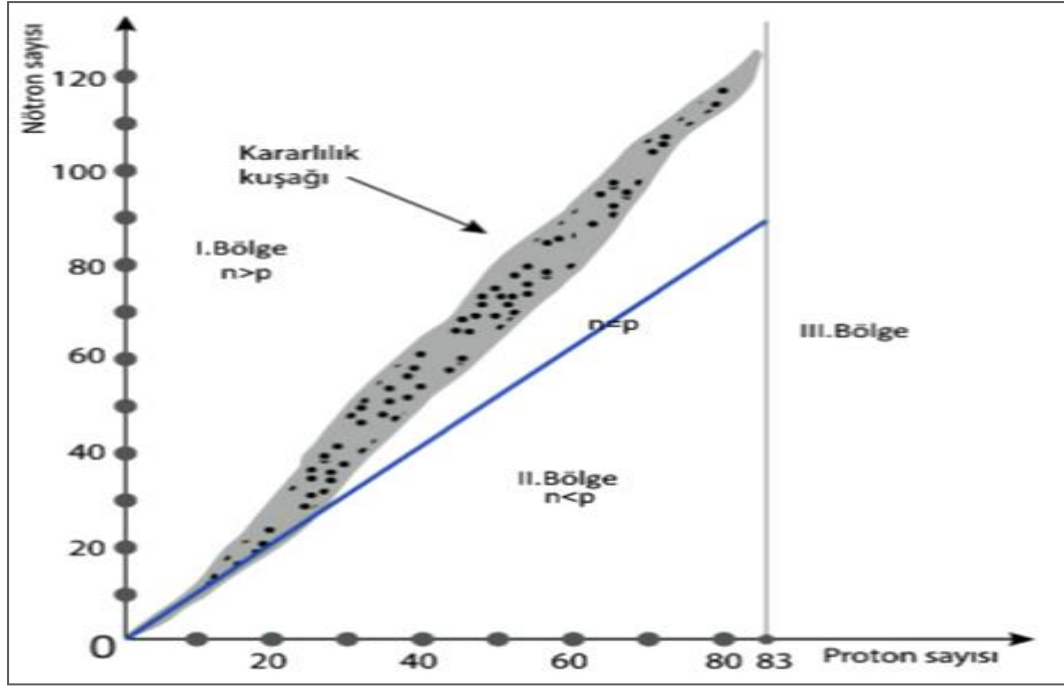
Periyodik cetvelde yer alan çekirdeklerin bağlanma enerjileri ve nükleon sayıları arasındaki ilişki Şekil 2.2' deki gibidir. (Nükleer Fizikte Kullanılan Birim Sistemi, 2016, s. 24)



Şekil 2.2. Nükleon Başına Bağlanma Enerjisi Grafiği ( A: Atomun kütle numarası)

**Kaynak:** (Aytekin, 2017, s. 23)

Radyoaktif bozunmalar atom çekirdeklerinin yapısına göre fisyon ve füzyon reaksiyonları olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Atom numarası 20'dan küçük olan çekirdekler füzyon kaynaşması reaksiyonu gerçekleştirebilirken 20'dan büyük olanlar fisyon parçalanma reaksiyonu gerçekleştirirler. Kararlı çekirdeklerin nötron sayıları proton sayılarına oranı yaklaşık 1'dir. Şekil 2.3' de görüldüğü gibi atom numarası 83'den büyük olanlarda ise bu oran 1,5 dan büyüktür. (Çifci & vd, 2019, s. 216)



Şekil 2.3. Atomların Nötron Sayıları / Proton Sayıları Oranına Göre Kararlılığı

Kaynak: (Çifci & vd, 2019, s. 216)

Bununla beraber nötronun kendisi de kararsız bir baryondur. Nötron kararlı olmak için madde ile dört şekilde etkileşme gerçekleştirir.

1. *Esnek Saçılma*: Kararsız yapıdaki nötron, bir atom çekirdeği ile esnek çarpışma yaparak kinetik enerjisinin bir kısmını kaybeder. Sonra çarpıştığı çekirdeğin yapısında herhangi bir değişikliğe neden olmadan kendi geliş doğrultusundan farklı bir doğrultuda yoluna devam eder.

2. *Esnek Olmayan Saçılma*: Çarpıtığı çekirdeğin içine giren nötron, çekirdeğin yapısında kısa süreli bir değişikliğe neden olur. Kinetik enerjisinin bir miktarını çekirdeğe aktaran nötronun momentumu değişir ve geliş doğrultusundan farklı olacak bir doğrultuyla çekirdekten ayrılır. Kararsızlaşan uyarılmış çekirdek bir gama fotonu yayınlamaya enerji seviyesine geri döner.

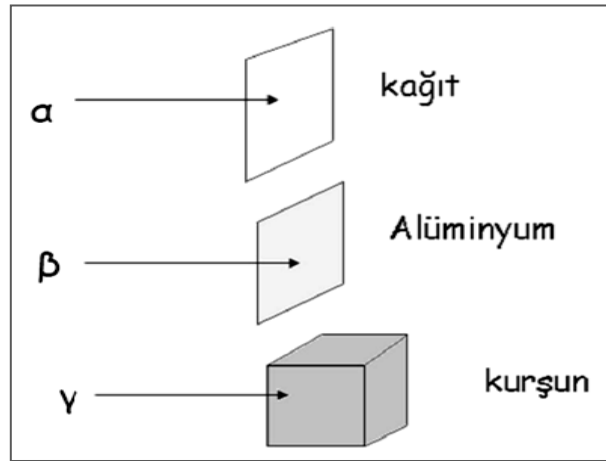
3. *Adi Transmutasyon Reaksiyonları*: Nötron- Gamma, Nötron-Proton ve Nötron –Alfa ( Nötron Absorblama) reaksiyonları ve n-2n ( Nötron Çoğaltma) reaksiyonları olmak üzere iki çeşittir.

4. *Fisyon*: Atom numarası 30' dan büyük olan çekirdekler, üzerlerine gönderilen belirli kinetik enerjilere sahip nötronlar aracılığı ile birbirine yakın atom numaralı iki çekirdeğe parçalanır. (Özemre, 1969, s. 2)

## Radyoaktif Bozunmalar

Bozunma, kararsız atom çekirdeğinin herhangi bir yolla parçacık ve / veya radyasyon yayınlarak enerjisini azaltıp daha kararlı bir atom çekirdeğine dönüşmesidir. Bozunan çekirdek ( ana çekirdek ), başka bir çekirdeğe dönüşür ( ürün çekirdek). SI da radyoaktif bozunma birimi Becerel'dir. 1 Becerel saniyedeki bozunma sayısıdır.

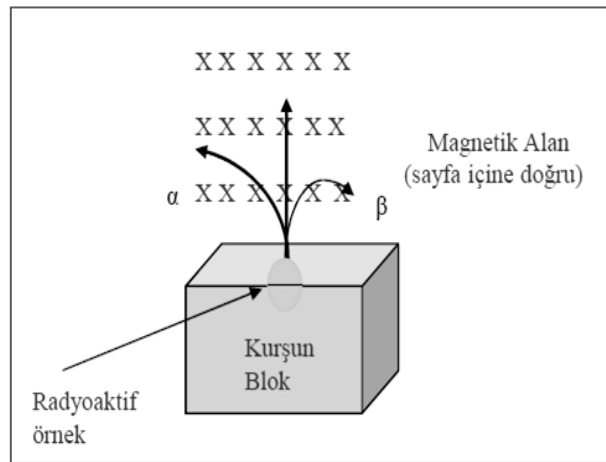
Radyoaktif bozunma, yayınlanan ışınların madde içinde ilerleme derinliklerine göre alfa ( $\alpha$ ) bozunması, beta ( $\beta$ ) bozunması ve gamma ( $\gamma$ ) bozunması olmak üzere üç çeşittir.



Şekil 2.4. Alfa, Beta Ve Gamma Bozunmalarının İçinde İlerlemesi;

**Kaynak:** (Aytekin, 2017, s. 20)

Şekil 2.4 'da görüldüğü alfa ışınları; ancak bir kâğıt parçasında, beta ışınları alüminyumda 3 mm'ye kadar ve gamma ışınları ise çok girici olup bir kurşun levhada birkaç santimetre ilerleyebilmektedir. Bazen kurşun levhadan geçen gamma ışınları dedektör aracılığı ile tespit edilmektedir.



Şekil 2.5. Alfa, Beta Ve Gamma Bozunmalarının Manyetik Alanda İzlediği Yörüngeler

**Kaynak:** (Aytekin, 2017, s. 61)

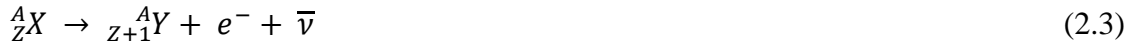
Şekil 2.5' de görüldüğü gibi farklı elektrik yüklerine sahip olan alfa, beta ve gamma bozunmaları manyetik alanda farklı yollar izler. (Aytekin, 2017, s. 61)

*Alfa Bozunması ( $\alpha$ )*



Alfa bozunumu denklem 2.2 ile sembolize edilir. X, ana çekirdek; Y, ürün çekirdek; A, kütle numarası ve Z atom numarasıdır.  ${}^4_2He$  ise alfa ( $\alpha$ ) parçacığı olarak adlandırılır. Büyük kütleli atom çekirdeklerinde güçlü nükleer kuvvetler coulomb kuvvetinin itici etkisini yenmek için protonları iyice sıkıştırarak çekirdeğin dağılmadan bir arada kalmasını sağlamaya çalışır. Birbirine daha fazla yaklaşan protonlar arasındaki itici coulomb kuvveti, güçlü nükleer kuvvetten ( nükleonları birbirine adeta yapıştıran) daha büyük olduğu için kararsızlaşan çekirdek, içinde oluşturduğu bu  $\alpha$  parçacığını ve yüksek ısı enerjisi yayınlamaya başlar başka bir çekirdeğe dönüşür. Atom numarası 82'den büyük olan çekirdeklere çoğunlukla alfa bozunması gözlenir. (Aytekin, 2017, s. 21)

*Beta Bozunması ( $\beta$ )*



Beta bozunumu Denklem 2.3 gibi gerçekleştiğinde çekirdekteki 1 nötron, 1 protona dönüşür, çekirdekten dışarı bir elektron ve bir anti nötrino ve enerji yayınlanır. Bu sırada yayınlanan elektrona beta ( $\beta$ ) parçacığı denir. Beta bozunumu Denklem 2.4' de olduğu gibi gerçekleştiğinde 1 proton, 1 nötrona dönüşür, çekirdekten dışarı bir antielektron ( pozitron), nötrino ve enerji yayınlanır. Bu sırada yayınlanan antielektrona beta artı ( $\beta^+$ ) parçacığı denir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi atomların kararlılık kuşağının üzerinde yer alan çekirdeklerin nispeten nötron sayıları proton sayılarından daha fazla olduğu için beta bozunumu, altında yer alan çekirdekler ise proton sayıları nötron sayılarından nispeten daha fazla olduğu için pozitron bozunumu yaparlar. Denklem 2.5' de gösterildiği gibi proton sayısı nötron sayısından fazla olan çekirdek yörünge elektronlarından birini yakalayarak bir protonu bir nötrona dönüştürebilir. Bu olaya ise Elektron Yakalama (Electron Capture ) denir. (Aytekin, 2017, s. 31)

### Gamma Bozunması ( $\gamma$ )

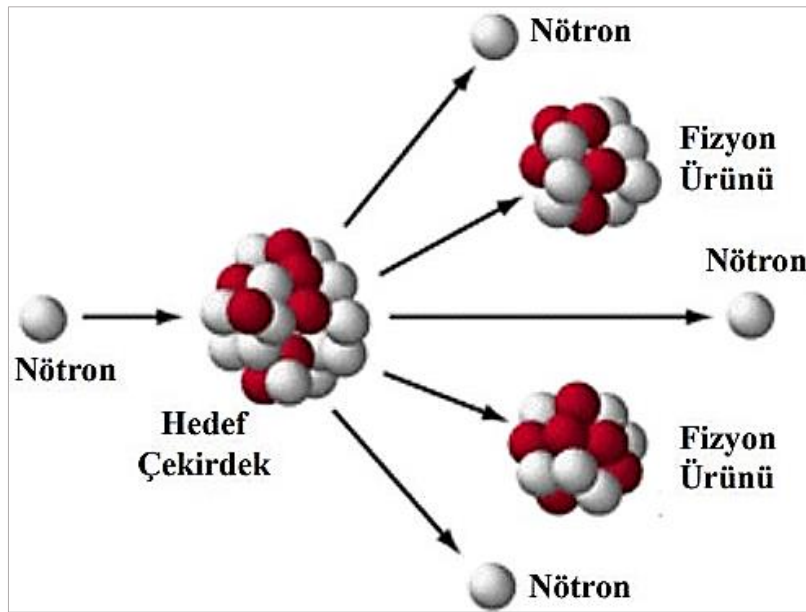


Denklem 2.6' de gösterildiği gibi gerçekleşen gamma bozunmalarında \* işareti ana çekirdeğin uyarılmış ve kararsız olduğunu anlatır. Gamma bozunumu bir gamma ışını yayınladığı için çekirdekte parçacık değişikliği olmaz. Kısaca uyarılmış çekirdekten foton yayınlanmasıdır. (Aytekin, 2017, s. 41)

### Nötron Çoğaltma

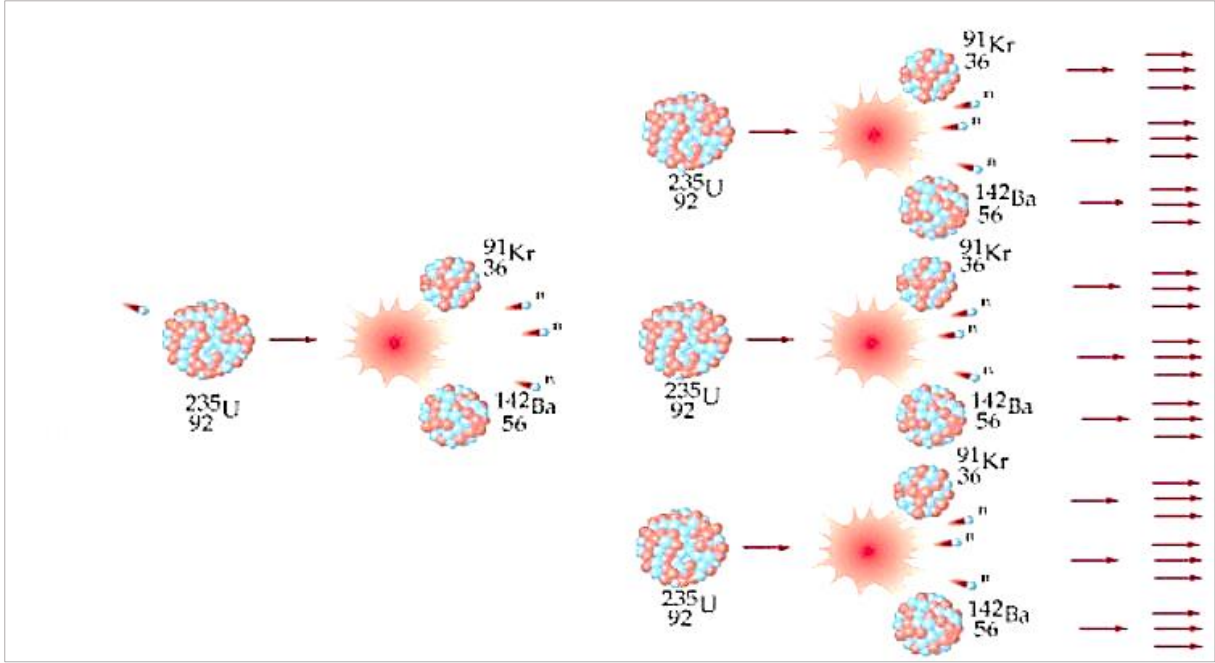
Nötron çoğaltma reaksiyonları ise iki kademeli olarak gerçekleşir. Önce büyük enerjili bir nötron hedef çekirdeğe esnek çarparak uyarılmış bir çekirdek oluşmasını sağlayarak çekirdeği terk ederken, uyarılan çekirdek kararlı hale dönmek için gamma fotonu yerine bir nötron yayınlamaktadır. (Özemre, 1969, s. 4)

*Fisyon:* Atom numarası 30' dan büyük olan çekirdekler, üzerlerine gönderilen belirli kinetik enerjilere sahip nötronlar aracılığı ile birbirine yakın atom numaralı iki çekirdeğe parçalanır. Şekil 2.6' te görüldüğü gibi bu parçalanmayla fisyon ürünü iki yakın kütleli çekirdek, nötrino ve 3 tane nötron açığa çıkar. Fisyon ürünü çekirdekler kararsız olduğu için gamma fotonu yayımlayarak kararlı hale geçerler.



Şekil 2.6. Parçalanma (Fisyon) Tepkimesi

Kaynak: (Meriç N. , 2021, s. 6)



Şekil 2.7. Zincirleme Tepkime

**Kaynak:** (Meriç N. , 2021, s. 7)

Nükleer fisyon reaksiyonlarında enerjinin çok kısa sürede ve kontrolsüz bir şekilde ortaya çıkmasıyla elde edilen nükleer silahlarda Şekil 2.7’ deki gibi zincirleme reaksiyon gerçekleşir. (Meriç N. , 2021, s. 7)

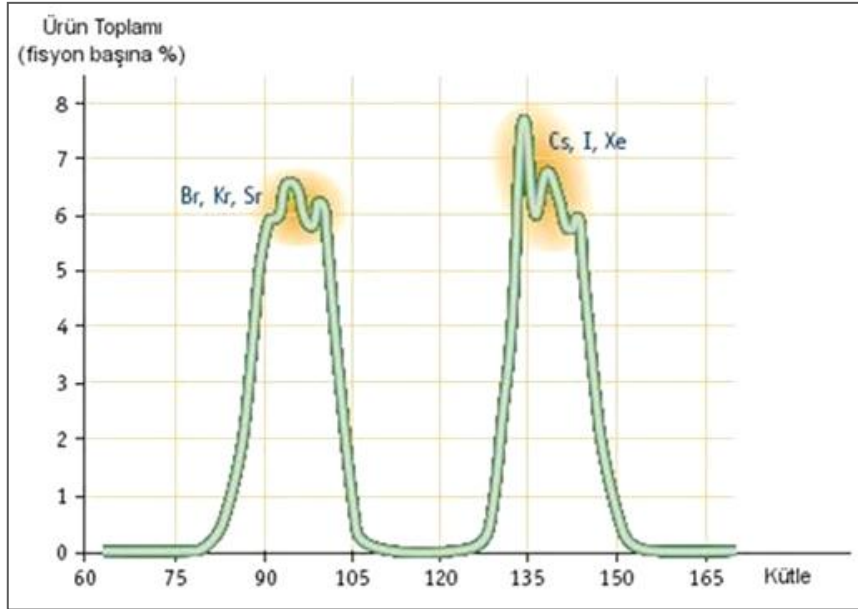
Nükleer güç santrallerinde enerji elde etmek için yakıt olarak  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{U}^{233}$ ,  $\text{U}^{234}$ ,  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{U}^{238}$  ve  $\text{Pu}^{239}$  gibi elementler kullanılır. En çok tercih edilen nükleer yakıtların özellikleri ve fisyon oluşturabilecek nötronların özellikleri Tablo 2.3’ de gösterilmiştir. (Özemre, 1969, s. 8) Ürün nötronlar başka U-235 çekirdeklerine çarparak parçalanmalarını sağlar. İkincil ürün nötronlar diğer U-235’leri parçalar. Bu olaya “zincirleme tepkime” denir. Zincirleme tepkime çok kısa sürede çok hızlı gerçekleşerek büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasına neden olur. Kısaca atom bombası. Nükleer reaktörde ise zincirleme tepkime, çok daha yavaş ve kontrollü olarak gerçekleşir. Nükleer reaktörlerin kontrollü bir şekilde çalışması için nötron sayıları çok önemlidir.

**Tablo 2.3.** Nükleer Yakıt Özellikleri Ve Fiyon Nötronları

	Th <sup>232</sup>	U <sup>233</sup>	U <sup>234</sup>	U <sup>235</sup>	U <sup>238</sup>	Pu <sup>239</sup>
Fiyona sebep olan nötronun enerjisi (MeV)	1,3	ılık*	0,4	ılık	1,2	ılık
Fotofiyonun eşik enerjisi (MeV)	5,9	5,5	?	5,75	5,85	5,5
Fiyon başına açığa çıkan ortalama nötron sayısı : $\nu$	2,34	2,51	2	2,47	2,50	2,91
İzafi bolluk (%)	100	( <sup>5</sup> )	0,0058	0,715	99,28	( <sup>6</sup> )

**Kaynak:** (Özemre, 1969, s. 8)

Tablo 2.3' de görüldüğü gibi kütle numarası tek olan çekirdekler yavaş ( ılık) nötronlarla, kütle numaraları çift olan çekirdekler hızlı nötronlarla fiyon parçalanması gerçekleştirir. Şekil 2.8' de görüldüğü gibi fiyon ürünü iki yeni çekirdeğin kütle numaraları birbirine yakın ve yaklaşık 5/7 oranına sahiptir. (Özemre, 1969, s. 8)



**Şekil 2.8.** U-235'in Termal Fiyonundan Üretilen Fiyon Ürünleri

**Kaynak:** (TNEAE, 2022)

### 2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Nükleer Enerji

Teknolojinin gelişimine paralel olarak ortaya çıkan en önemli sorunlardan birisi artan enerji ihtiyacıdır. Üretilen her bir teknoloji ile birlikte enerji tüketimi de artmaktadır. Ülkeler bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek için enerjinin verimli kullanılmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırma çalışmalarına devam etmektedir.

**Tablo 2.4.** Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Yüzdeleri

	Kömür	Doğal gaz	Hidrolik	Rüzgâr	Güneş	Jeotermal	Diğer
2018	% 37,3	% 29,8	% 19,8	% 6,6	% 2,6	% 2,5	% 1,4
2019	% 22,4	% 28,6	% 31,4	% 8,1	% 6,2	% 1,6	% 1,7

Türkiye’ de elektrik üretimindeki 2018 ve 2019 yıllarına ait kurulu güç bakımından değişimi gösteren Tablo 2.4 incelendiğinde 2019 yılı itibarıyla toplamda %51’ i kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanıldığı termik santrallerden oluşmaktadır. Sadece Türkiye’ de bir yılda hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanılarak üretilen elektrik enerjisi %32,9’ dan % 49’ a çıkmıştır. (EVTKBBM, 2021) Fakat artan nüfus ve enerji ihtiyacı düşünüldüğünde bile bu artış yetersiz kalmaktadır.

Enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için kullanılan kaynaklardan biri de nükleer güç santralleridir. Güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal gibi yenilenebilir güç santralleri ve doğalgaz-kömür termik güç santralleri, nükleer güç santralleri ile kıyaslandığında günlük enerji üretim miktarı açısından avantajlıdır.

Enerji kaynaklarının verimli, yüksek kapasite ve potansiyele sahip günün her anında kullanılabilen, güvenilir, çevre dostu ve ucuz da olması gerekmektedir. Bütün bu özellikleri taşımakla beraber, sürdürülebilirlik bakımından enerji stratejilerinde içerisinde büyük bir öneme sahip olan nükleer enerjinin Dünya genelinde enerji ihtiyacını karşılamak üzere elektrik üretiminde tercih edilmesinin nedenlerinden bazıları şu şekilde sıralanabilir.

\*Nükleer güç santralleri yenilenebilir enerji santrallerine göre gibi dış koşullara bağlı değildir.

\*Termik santrallerdeki gibi atmosferde sera gazı etkisine neden olan karbon monoksit, karbondioksit, sülfürdioksit ve azotdioksit gibi zararlı baca gazları atmosfere salınmaz. Karbon emisyonu olmadığı için atmosferdeki bu zararlı gazların atmosferdeki oranı azalır. İklim

değişikliğinin önlenmesi için önemli bir katkı sağlar. Enerji piyasası sektörünün elektrik üretiminden kaynaklanan yaklaşık olarak yıllık %17 sera gazı emisyonu azalması günümüzde aktif halde bulunan nükleer güç santralleri sayesinde.

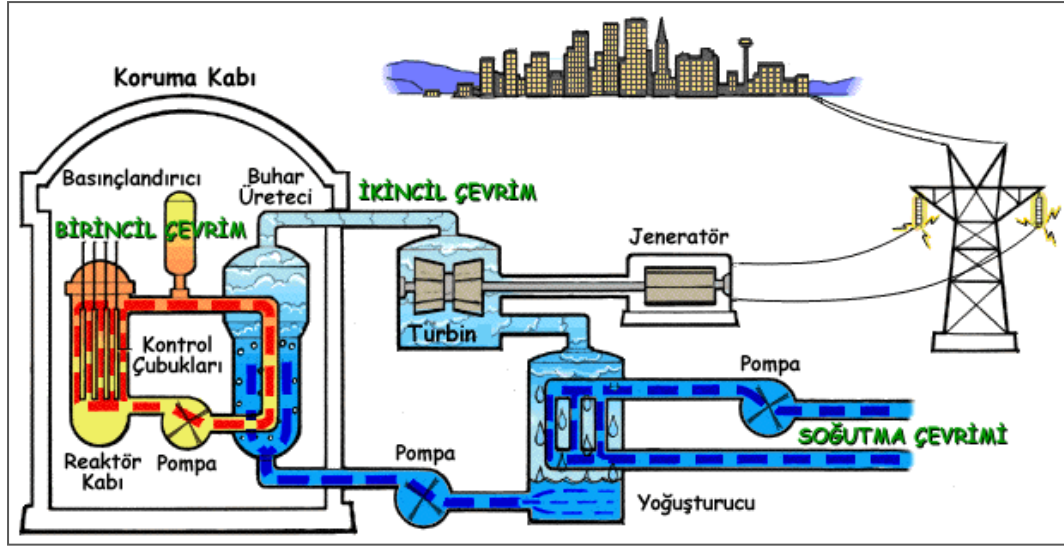
\*Radyoaktif atık miktarının çok az olması ve hacminin küçük olması yer üstündeki depolarda güvenli bir şekilde saklanmasını kolaylaştırmaktadır.

\*Ayrıca tekrar işlenebilen (reprocessing) nükleer yakıtlar enerji üretimi için sürdürülebilirlik bakımında iyi bir geri dönüşüm sağlamaktadır. Filyon reaksiyonu sonucu elde edilen ürünlerin %3' ü nükleer atık olarak güvenli bir şekilde saklanırken plütonyum ve uranyum içeren %97'si ile ise yeniden yakıt elementleri zenginleştirilmesi yapılmaktadır. (ETKBBM, 2021, s. 56) şeklinde sayılabilir. Nükleer Güç santralleri, diğer güç santralleri arasında verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından tüketici ihtiyaçlarını en çevreci olarak karşılayandır.

## **2.4. Nükleer Güç Reaktörleri**

Nükleer güç reaktörleri, nükleer enerjiyi nükleer yakıtların filyon parçalanması ile ısı enerjisine, ısı enerjisini taşıyıcı sistemlerle türbinlerde kinetik enerjiye, kinetik enerjiyi ise jeneratörlerle de elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Kullanım amacına göre maddelerin fiziksel, kimyasal ve nükleer özellikleri nedeniyle farklı tasarımda nükleer reaktörler vardır. (Bobat & vd, 2018, s. 141)

- Nükleer güç reaktörleri: Nükleer enerji kaynaklı ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmekle ticari amaç için kullanılır.
- Nükleer araştırma reaktörleri: 1-10MW katı hâl fiziği araştırmalarında kullanılır.
- Dönüştürücü reaktörler: Filyon yapmayan maddeleri filyon yapabilen yakıtlara dönüştürmek için kullanılır.



Şekil 2.9. Basınç Sulu Nükleer Reaktör Çalışma Sistemi

**Kaynak:** (Bobat & vd, 2018, s. 141)

Şekil 2.9’ de basınçlı su reaktörlerindeki sistemler gösterilmiştir. Nükleer reaktörler genel olarak soğutucu malzeme ve sistemine göre çeşitlilik gösterir. Dünyadaki çalışan reaktörlerin % 85’inde soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Basınçlı Su Reaktörü ( PWR) ve Kaynar Su Reaktörü (BWR) olarak iki çeşittir. Geriye kalan % 15 ise soğutucu olarak Ağır Su (PHWR) ve gaz (GCR) kullanılmaktadır. (NED, 2021)

Yakıt çubukları, nötron yavaşlatıcı, kontrol çubukları, yansıtıcı, zırlama( koruma kabı), soğutucu nükleer güç reaktörlerindeki temel elemanlardır.

*Yakıt Çubukları ( Fiyon Yapabilen Malzeme);* yavaş veya hızlı nötronların çarpmasıyla fiyon reaksiyonu gerçekleştirebilen radyoaktif maddelerdir. Genellikle Uranyum-235 kullanılır. Doğada Uranyum-235 ve Uranyum-238 izotoplarıyla birlikte bulunur. Uranyum-238 belirli enerji seviyelerindeki nötronların esnek olmayan çarpması sonucu önce Plütinyum–239 izotopuna ( $^{239}\text{Pu}$ ) dönüşür. Plütinyum-239 izotopu termal veya hızlı nötronların çarpmasıyla fiyon parçalanma reaksiyonunu gerçekleştirir.

*Nötron Yavaşlatıcı;* fiyon parçalanma reaksiyonunda açığa çıkan hızlı nötronların kontrollü zincirleme tepkimeyi gerçekleştirebilmesi ve yavaşlatılması için içinden geçtiği ortamdır. Yavaşlatıcı, nötronların başka çekirdekler tarafından soğurulmadan esnek çarpışmalarla kinetik enerjisini azaltacak kütle numarası bakımından hafif malzemelerden seçilir. Genellikle yavaşlatma işlemi için normal su kullanılır, bazen grafit ve ağır su da kullanılır.

*Kontrol Çubukları*; nükleer bozunma sırasında açığa çıkan nötronların sayısını istenen değerde tutmakta kullanılır. Bor ( $_{5}B$ ), Gümüş ( $_{47}Ag$ ), Kadmiyum ( $_{48}Cd$ ), İndiyum( $_{49}In$ ), ve Hafniyum( $_{72}Hf$ ) gibi nötron yutucu elementler içeren malzemeler tercih edilir. Kontrol çubukları nötron sayısını değiştirebilmeyi ve nükleer fisyonu kontrol altında tutmayı sağlar.

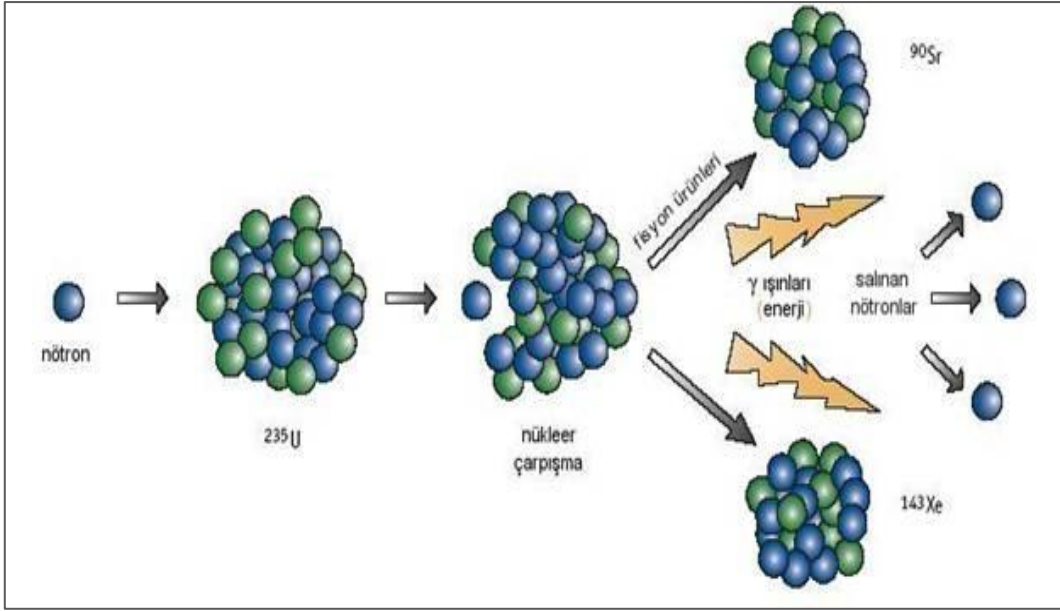
*Yansıtıcı ( Nötron Kaçağını Azaltmak İçin)*; nükleer güç reaktörünün merkezinde gerçekleşen bozunma reaksiyonu sırasında açığa çıkan nötron sayısını kontrol altında tutmak için kullanılır. Yakıt çubukları nükleer fisyon reaktörün merkezinde, kalbinde (korunda) bulunur. Yakıt çubuklarının nükleer fisyon reaksiyonu sonrasında kordan dışarı kaçan nötronların kora geri döndürülmesi ve nötron sayısını kontrol altında tutmak için koru çevreleyen düzenektir.

*Zırhlama ( Koruma Kabı)*; radyoaktif maddelerin doğaya karışmasını engellemek ve basıncı kontrol altında tutmak için kullanılır. Kor da denilen reaktör çekirdeği ve yansıtıcının içine yerleştirildiği dayanıklı kalın çelik kaba basınç kabı da denilir. Zırhlama, korda meydana gelen nükleer fisyon reaksiyonu sırasında yüksek hızlı nötron ve gamma ışınlarının yansıtıcı engelini aşanlarının doğaya salınmasını engeller.

*Soğutucu*; nükleer fisyon sonucu oluşan ısı ve yakıt çubuklarının sıcaklığını kontrol altında tutmak için gereklidir. Soğutucu, elektrik enerjisi üretmek için korda açığa çıkan ısı enerjisini türbinleri çalıştırmak üzere iletir. Günümüzde birçok nükleer güç reaktöründe yavaşlatıcı aynı zamanda soğutucu işlevini de yerine getirir. (TNEAE, 2022)

## **2.5. Nükleer Güç Reaktörlerinde Nötron Taşınımı ve Kritiklik**

Nükleer güç reaktörlerinde meydana gelen fisyon tepkimelerinin Şekil 2.10' de görüldüğü gibi kontrollü zincir tepkimeleri olarak devam edebilmesi için her fisyon reaksiyonu sonucunda bir ürün nötronun salınması ve ürün nötronun bir başka çekirdekle etkileşerek yeni bir fisyon reaksiyonu başlatması istenir. Fisyon reaksiyonu sonucu oluşan üç nötron yakınlarındaki diğer fisyon müsait atomlarla çarpışarak momentum enerji değiş tokuşu neticesinde kararsızlaşmalarına neden olurlar. Bu atomlar da çok kısa bir süre içerisinde yeni fisyon reaksiyonları yaparak birçok yeni serbest nötron oluşmasına neden olurlar. Zincirleme reaksiyon ise fisyon ürünü nötronların bir başka fisyon olayını tetiklediği art arda gerçekleşen reaksiyon dizisidir. Kinetik enerjisi yetersiz kalan bazı nötronlar çekirdek tarafından yakalanan veya çekirdeğe çarpılarak saçılan (scattering) bazı nötronlar ise fisyon reaksiyonu başlatmadan sistemden ayrılabilir.



**Şekil 2.10.** Filyon Reaksiyonu

**Kaynak:** (TNEAE, 2022)

Nükleer reaktördeki reaktivite kritikliği filyon sonucu oluşan serbest nötron sayısının çekirdek tarafından yakalanma ve kaçma ile kaybedilen nötron sayısını dengelenmesiyle gerçekleşir. Kontrollü zincirleme filyon reaksiyonun gerçekleşebilmesi için reaktör çekirdeği içerisinde yeterince serbest nötron oluşmasını sağlayacak en az yakıt bulunmalıdır. (TNEAE, 2022)

Kontrollü filyon zincirleme reaksiyonu, reaktör çekirdeğindeki filyon yapabilen nötronların, çekirdek ve yansıtıcı arasında yerdeğişimi yapan nötronlara oranının değiştirilmesiyle sağlanır. (Cockbame, 1966, s. 21) Ürün nötronları sayısının filyon yapabilen nötronların sayısına oranına reaktör kritikliği denir.

$\rho > 0$  Kritik üstü ( Supercritic) zincirleme nükleer filyon reaksiyonu durumu (nükleer bomba)

$\rho = 0$  Kritik reaktör, korda filyon reaksiyonu kontrollü zincir tepkimesi olarak devam etme durumu

$\rho < 0$  Kritik altı ( Subcritic) reaktördeki filyon reaksiyonlarının devam etmeme durumu (Özemre, 1969, s. 42)

Nükleer reaktör teorisi, reaktör içinde nötronların dağılımının belirlenmesini temel problem olarak ele alır. Nötron dağılımı reaktör nükleer filyon tepkimelerinin hızını (nuclear reactor rates) belirler. Nötron yoğunluğu incelenerek, kontrollü filyon tepkimesinin kararlılığı

hakkında yorum yapılabilir. Nötron taşınımı, en doğru soy gazların (rarefied gas/dilute gas) kinetik teorisine karşılık gelen “Neutron Transport Equation” ile açıklanır. Daha karmaşık matematik işlemler gerektirdiği için bilgisayar çözümleri daha çok kullanılmaktadır. Nötron transport denkleminin en temel dezavantajı, analitik çözümünün çok güç olmasıdır. Çeşitli matematik yöntemler ve bilgisayar programları ile nümerik çözümler yapılabilir. (Yücel, 2019, s. 5)

## 2.6. İki Noktalı Reaktör Kinetik Modeli ( Nötron Difüzyon Denklemleri)

Bir nükleer reaktörün istenen sabit güç seviyesinde çalışabilmesi için, fisyon reaksiyonlarındaki nötron üretim hızı, reaktör çekirdeğine dönen ve kaçan nötronlar ile dengede olmalıdır. Fisyon reaksiyonu sonucu iki çeşit nötron oluşur.

- i. Ani (hızlı) nötronlar
- ii. Gecikmiş nötronlar

Fisyon reaksiyonu sırasında açığa çıkan nötronların %99 u parçalanma anında oluşur. %1’lik miktarı ise fisyon ürünlerinin kendilerinin birkaç saniye ile bir dakikalık bir zaman gecikmesiyle oluşur. Gecikmiş nötronların fisyon zincir reaksiyonları sürecinin belirlenmesinde önemli etkileri vardır. Üretilen nötronların gecikmiş nötronlara oranı ( $\beta$ ),  $\nu_d$  fisyon başına açığa çıkan ortalama gecikmiş nötron sayısını ve  $\nu$  fisyon başına ani ve gecikmiş nötron sayısını göstermek üzere

$$\beta = \frac{\nu_d}{\nu} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 ile verilir.

Nötronların çoğalmasında ani (hızlı) ve geciken nötronların tamamen farklı yaşam süreleri gösterilir. Hızlı ve gecikmiş nötronların yaşam süresinin zamana bağlı davranışını hesaplamak için diferansiyel denklem takımı gerekir. Bu denklemler;

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{\rho - \beta - a_{cr} a_{rc}}{\Lambda_c} N_c + \frac{a_{rc}}{l_r} N_r + \lambda C \quad (2.8)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda_c} N_c - \lambda C \quad (2.9)$$

$$\frac{dN_r}{dt} = \frac{a_{cr}}{\Lambda_c} N_c - \frac{N_r}{l_r} \quad (2.10)$$

İki noktalı reaktör kinetik modelinde bir grup geciken nötron sayısı için Denklem 2.8, Denklem 2.9 ve Denklem 2.10’ da olduğu gibi karmaşık diferansiyel denklemleri takım olarak verilir. (Spriggs & vd, 1997, s. 214). Denklemlerde  $N_c$  reaktör çekirdeğindeki nötron sayısını,

$N_r$  yansıtıcıdaki (reflektördeki) nötron sayısını,  $C$  ise geciken nötron sayısını ifade eder. Sonsuz bir reaktör çekirdeği için nötron oluşum zamanı  $\Lambda_c$ , yansıtıcıdaki nötron ömrü  $l_r$ , yansıtıcı nötronlarının reaktör çekirdeğine geçenlerinin oranı  $a_{rc}$ , fisyon reaksiyonda oluşan nötronlardan yansıtıcıya kaçanlarının oranı  $a_{cr}$ , reaktör çekirdek reaktivitesi  $\rho$ , geciken nötron grubunun bozunma sabiti  $\lambda$  ve geciken nötron grubunun oranı ise  $\beta$  ile gösterilmiştir.

Denklem 2.8, Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 nötron sayıları için diferansiyel denklem grubu sonlu farklar yöntemiyle kesikleştirilerek (Lewis & Miller, 1984)

$$N_c(t + \Delta t) = N_c(t) + \frac{\rho - \beta - a_{cr}a_{rc}}{\Lambda_c} N_c(t)\Delta t + \frac{a_{rc}}{l_r} N_r(t)\Delta t + \lambda C(t)\Delta t \quad (2.11)$$

$$C(t + \Delta t) = C(t) + \frac{\beta}{\Lambda_c} N_c(t)\Delta t - \lambda C(t)\Delta t \quad (2.12)$$

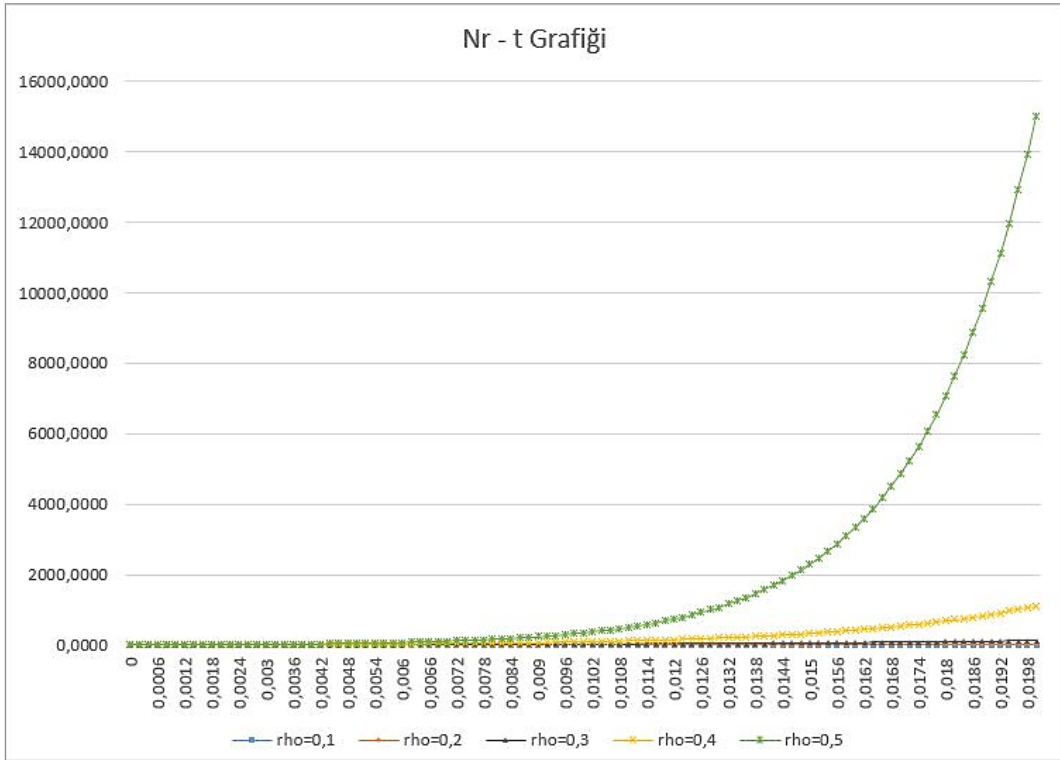
$$N_r(t + \Delta t) = N_r(t) + \frac{a_{cr}}{\Lambda_c} N_c(t)\Delta t - \frac{N_r(t)}{l_r} \Delta t \quad (2.13)$$

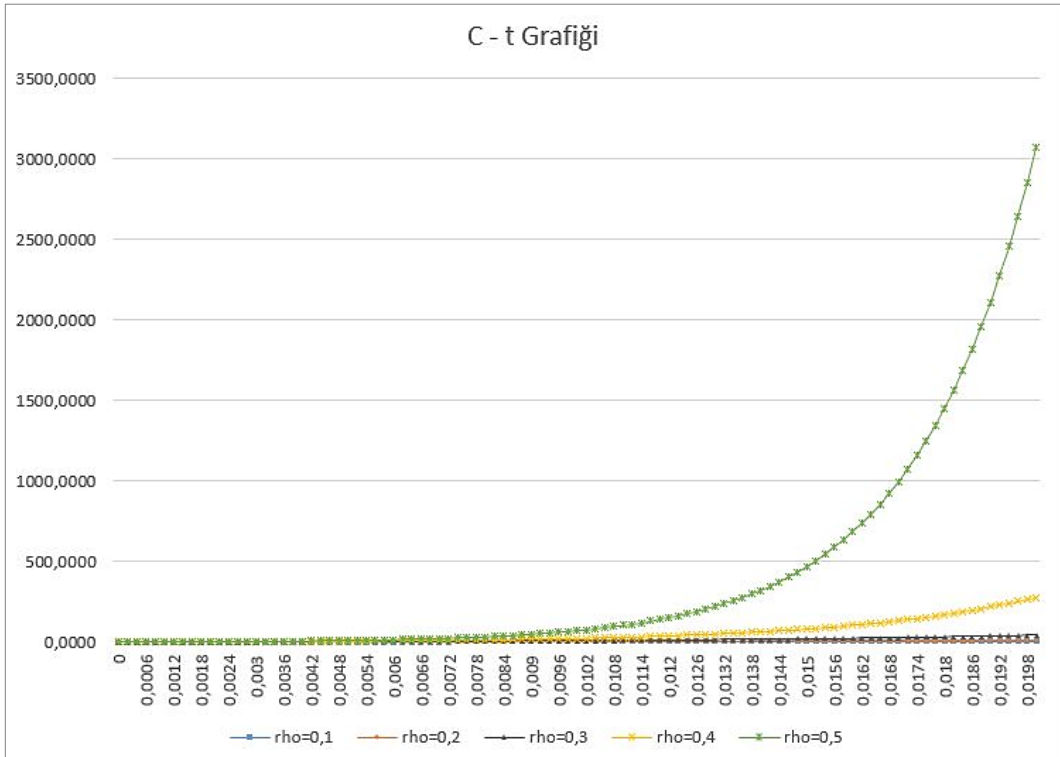
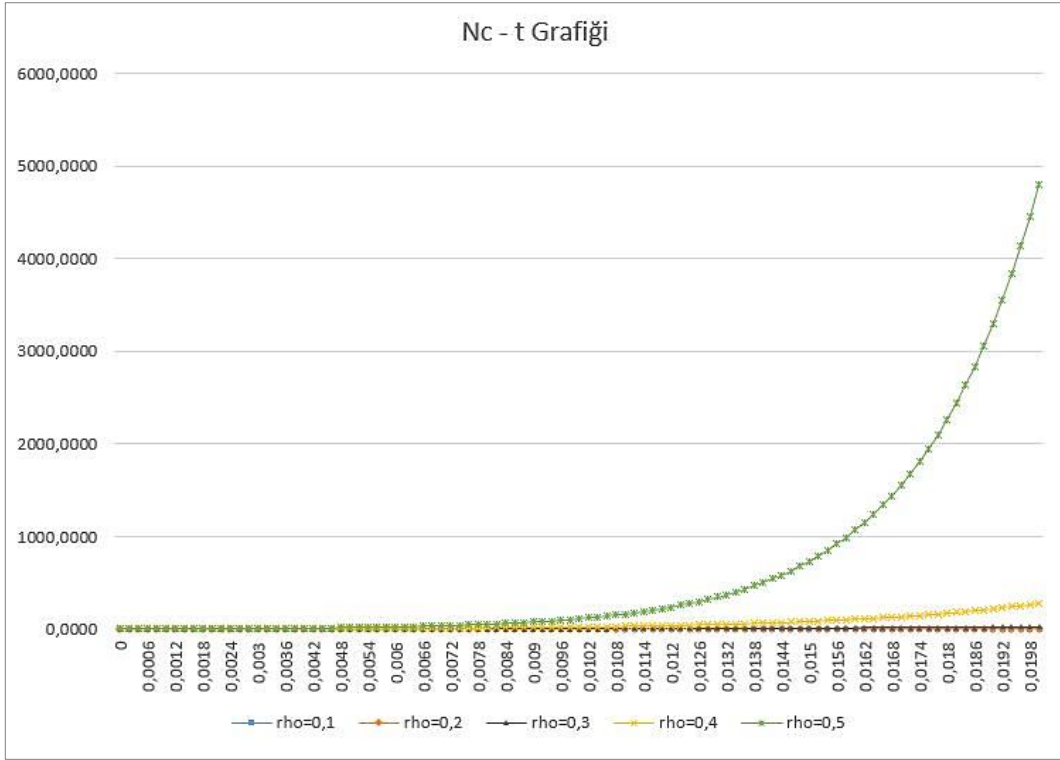
denklem grubuna ulaşılır. İlk değer problemi olan, 2.11, 2.12 ve 2.13 denklemlerinde verilen  $N_c(t_0)$ ,  $N_r(t_0)$  ve  $C(t_0)$  ilk değerleri denklemde yerine yerleştirilerek bir sonraki zaman adımı değerleri olan  $N_c(t_0 + \Delta t)$ ,  $N_r(t_0 + \Delta t)$  ve  $C(t_0 + \Delta t)$  hesaplanarak elde edilir. Bu yeni değerler denklemlerin sağ tarafına tekrar yazılıp hesaplama yeniden hesaplama yapılırca bir sonraki data değerleri elde edilir. İstenilen zaman değerine ulaşıncaya kadar belirlenen zaman adımıyla bu iterasyon (işlem döngüsü) devam ettirilerek datalar dizisi oluşturulur.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Denklemler grubunun hesaplamalarında zaman adımı  $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$  olarak seçilmiş, bu değerden daha küçük zaman adımları için iterasyon işlemleri sonucunda ulaşılan değerlerde bir değişiklik olmamıştır. Diğer zaman ölçeklerinden çok daha küçük olduğu için denklemler grubunun iterasyon hesaplamalarında 0,2 ms' lik zaman adımı ile devam edilmiştir.

İsviçre' deki nükleer güç rektöründe kullanılan  $\Lambda_c = 0.4 \text{ ms}$ ,  $l_r = 4 \text{ ms}$ ,  $\lambda = 0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $arc = 0.5$ ,  $acr = 0.8$  parametreleri ile  $N_c(0) = 4$ ,  $N_r(0) = 1$  ve  $C(0) = 2$  ilk değerleri ve  $\Lambda_c = 0.8 \text{ ms}$ ,  $l_r = 3 \text{ ms}$  parametreleri ve  $N_c(0) = 2$ ,  $N_r(0) = 6$ ,  $C(0) = 1$  ilk değerleri denklemler grubunun çözümündeki hesaplamalar için seçilmiştir.



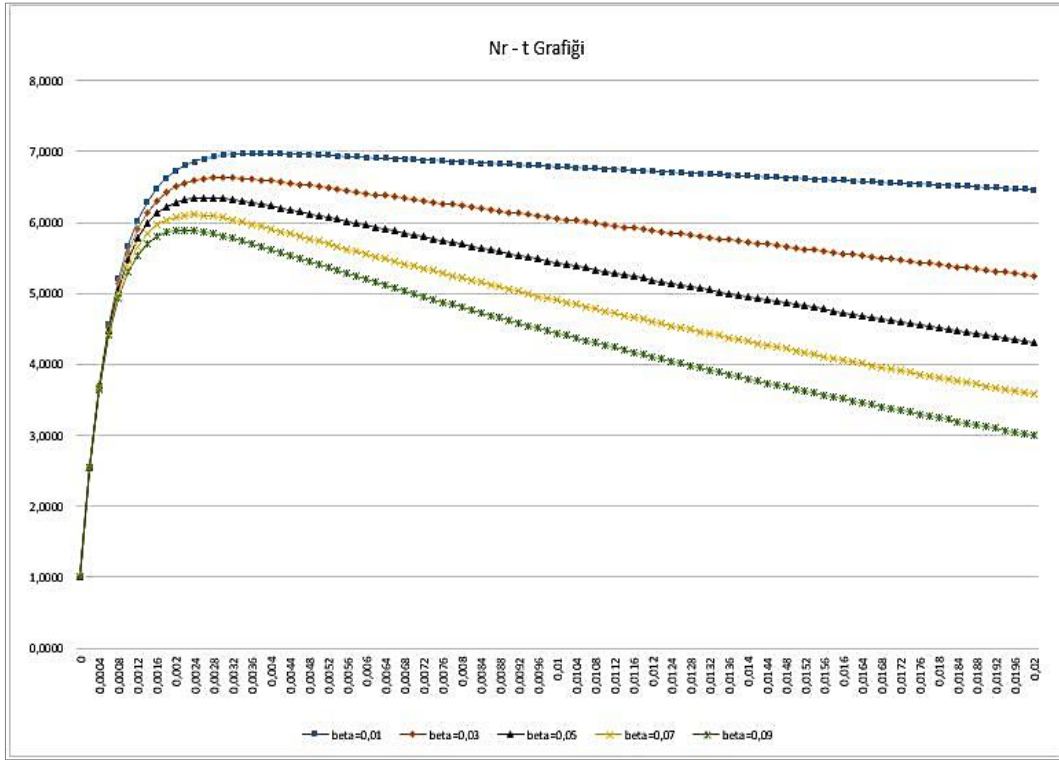


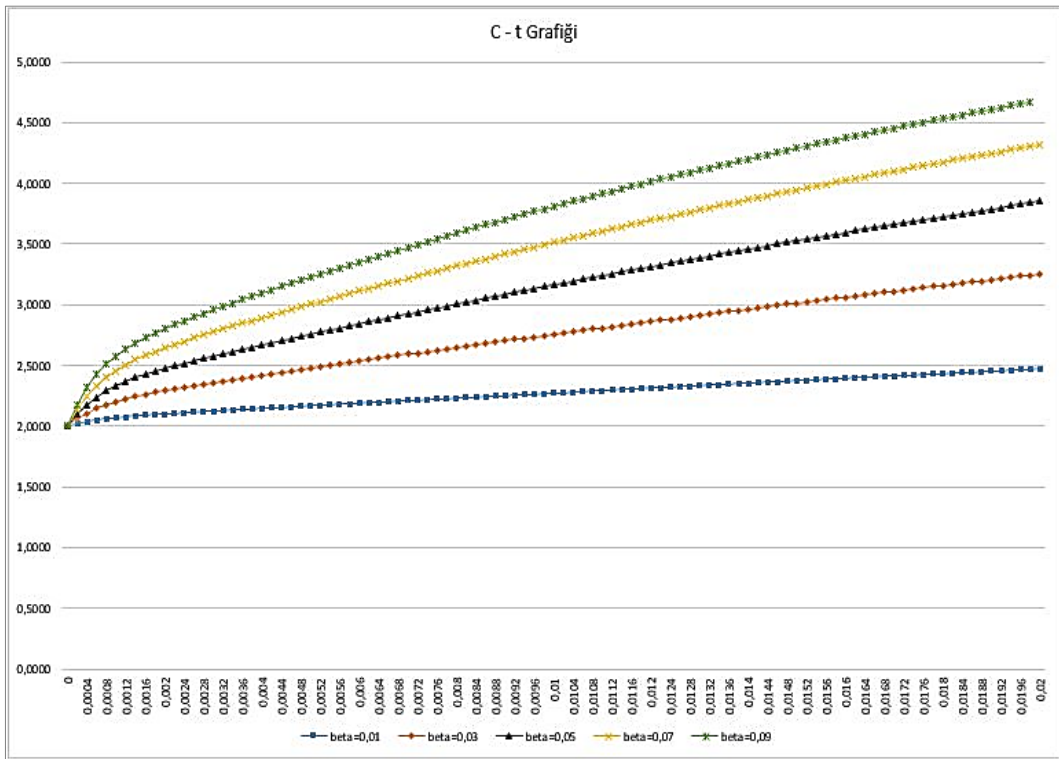
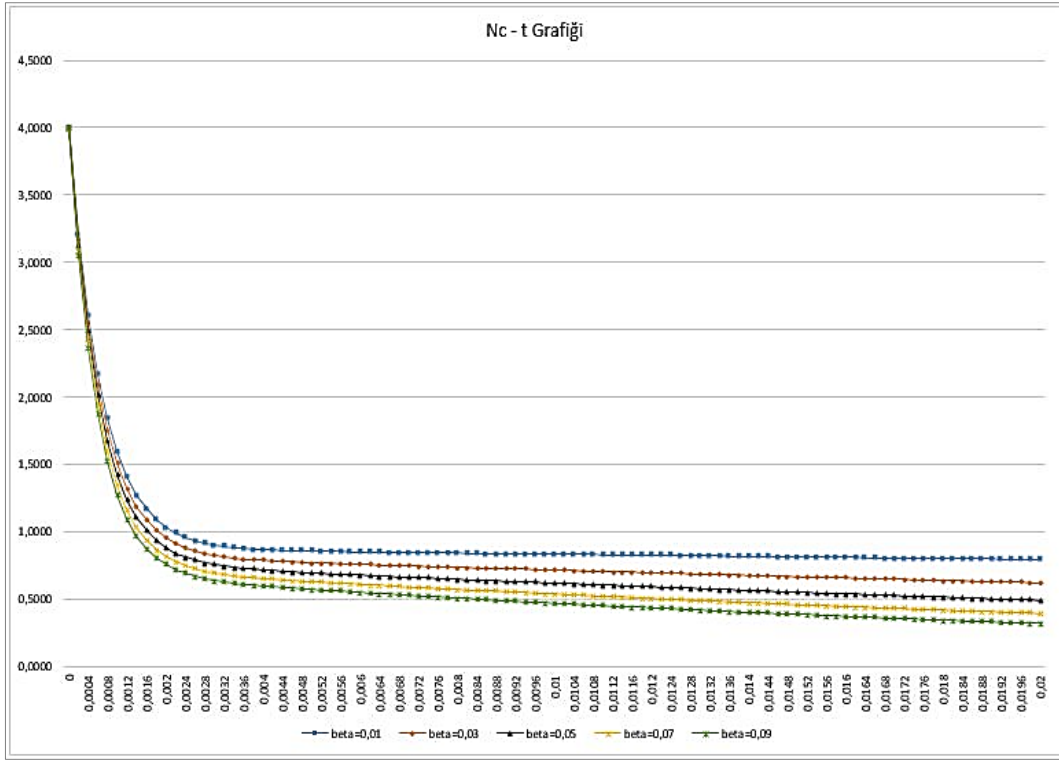
**Grafik 3.1:** Farklı  $\rho$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi

Grafik 3.1' de  $\beta= 0.1$ ,  $A_C= 0.4$  ms,  $t_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $arc=0.5$ ,  $acr=0.8$  ve  $N_c(0)= 4$ ,  $N_r(0)=1$  ve  $C(0)=2$  olarak seçilen ilk değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin farklı  $\rho$  değerlerindeki zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Kritik bir reaktörde  $\rho=0$  iken, hesaplamada kullanılan  $\rho$

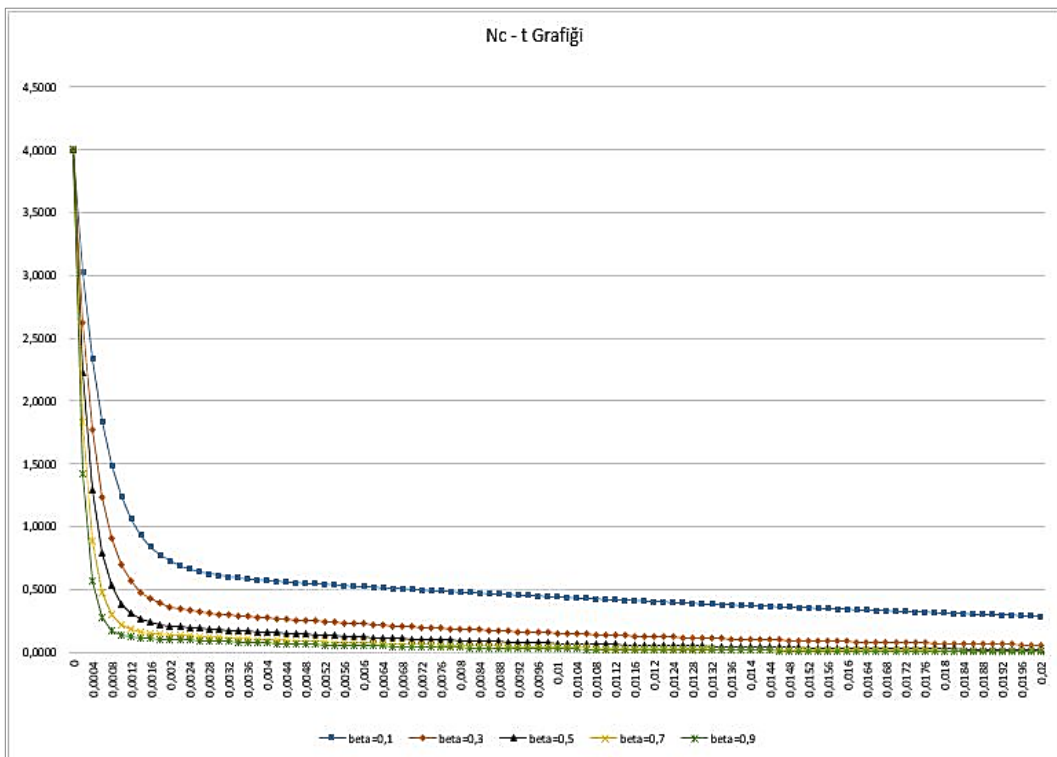
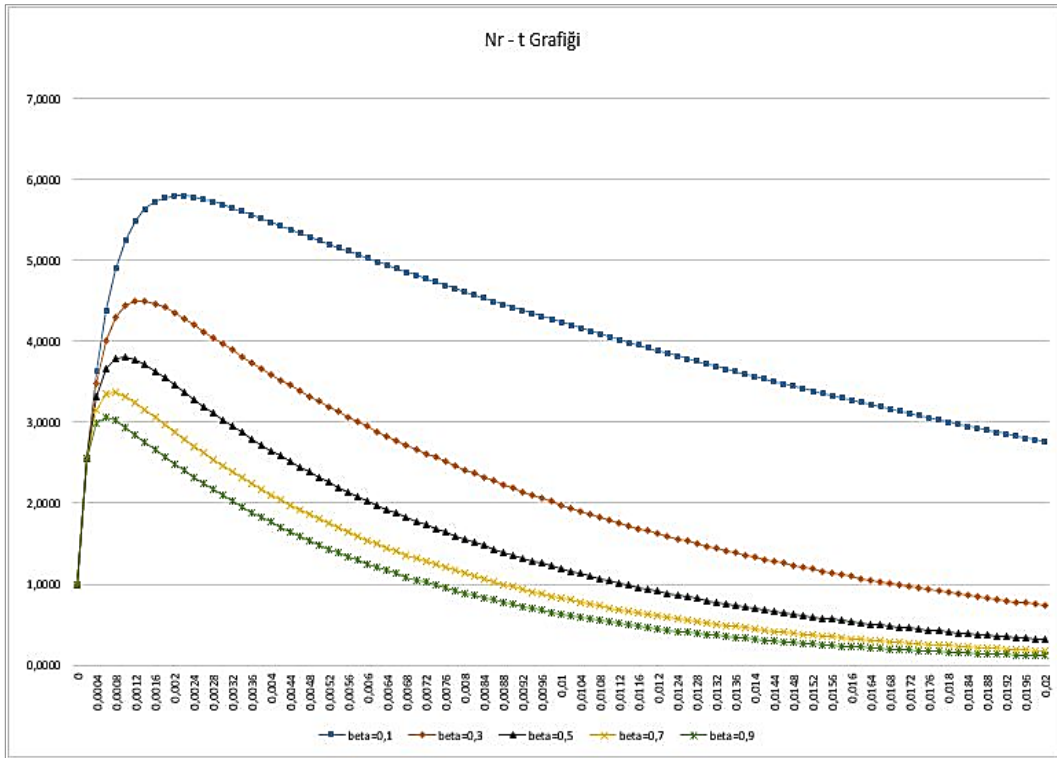
değerleri sıfırdan büyük ve giderek artarak süperkritik reaktörü işaret etmektedir. Grafik 3.1' de fisyon zincirleme reaksiyonunda  $\rho$  arttıkça  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C'$  de üstel artış görülmektedir. Bu beklenen sonuç yapılan hesaplamaların doğru olduğunu göstermektedir.

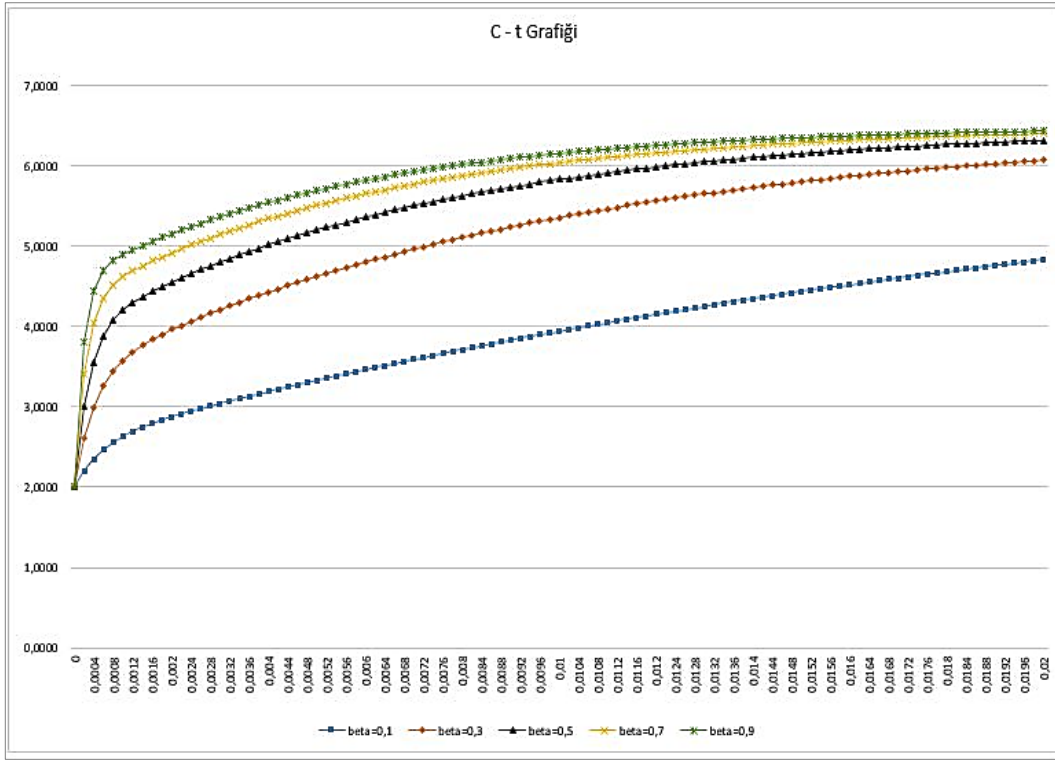
Hesaplamanın doğruluğunun kontrolünden sonra, reaktivite  $\rho = 0$  iken fisyon reaksiyonlarının kontrollü zincirleme reaksiyon olarak devam etme durumunda;  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C'$ 'nin zamana göre değişimi grafik 3.1' de kullanılan ilk değerler ve farklı  $\beta$  (geciken nötron oranı) değerleri için hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları grafik 3.2 ve grafik 3.3' te gösterilmiştir.





**Grafik 3.2:**  $\rho = 0$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişimi.



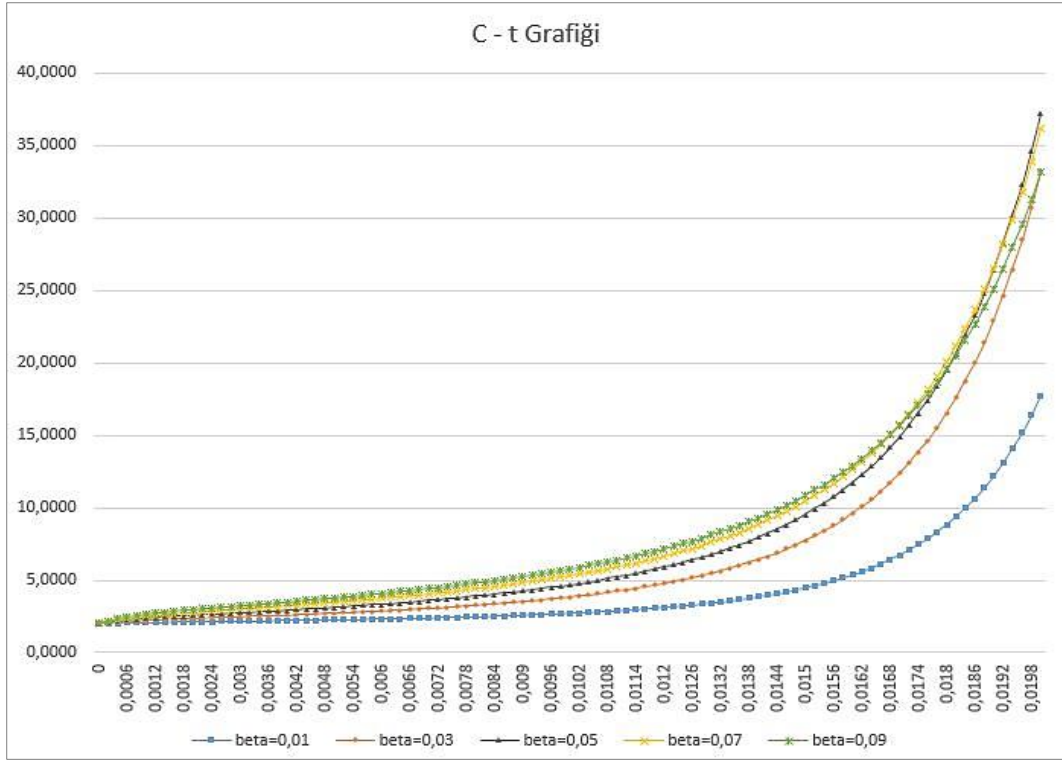


**Grafik 3.3:**  $\rho = 0$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ ' nin zamana bağlı değişimi.

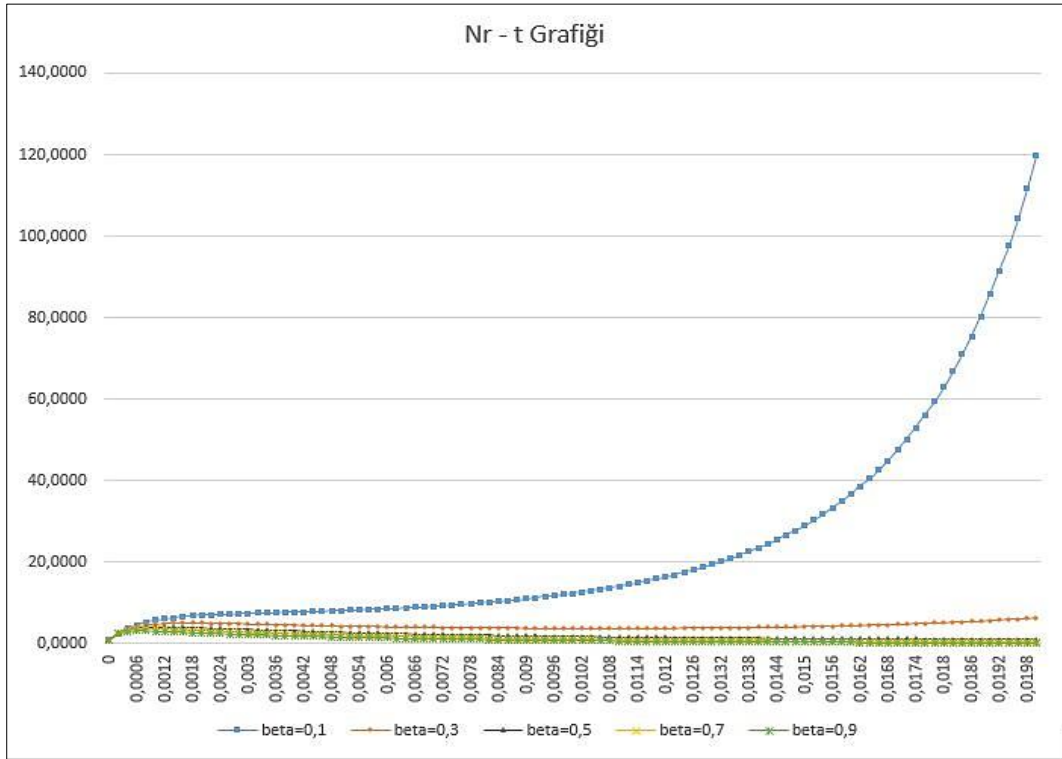
$\rho = 0$  yani nükleer reaktör kritik durumda iken  $\beta = 0,01$ ,  $\beta = 0,03$ ,  $\beta = 0,05$ ,  $\beta = 0,07$ ,  $\beta = 0,09$  parametreleri için grafik 3.2  $N_c$ ' nin sıfırdan farklı bir değere yakınsadığı,  $N_r$ ' nin azalan bir artış eğiliminden sonra  $\beta > 0,01$  olduğu durumlarda daha hızlı azalmaya başladığı stabilleştiği,  $C$  ise azalan artışın giderek lineer bir artışa dönüştüğü,  $\beta = 0,1$ ,  $\beta = 0,3$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $\beta = 0,7$ ,  $\beta = 0,9$  parametreleri için grafik 3.3 incelendiğinde  $N_c$ ' nin sıfıra yakınsadığı,  $N_r$ ' nin azalan bir artış eğiliminden sonra  $\beta > 0,5$  olduğu durumlarda sıfıra yakınsayıp stabilleştiği,  $C$  azalan bir artış eğiliminden sonra  $\beta > 0,5$  olduğu durumlarda sıfırdan farklı bir değere yakınsayıp stabilleştiği görülmüştür.  $\beta < 0,1$  değerlerinde ve incelenen zaman dilimi içerisinde  $C$ ' de azalan artışın giderek lineer bir artışa dönüşmüştür.

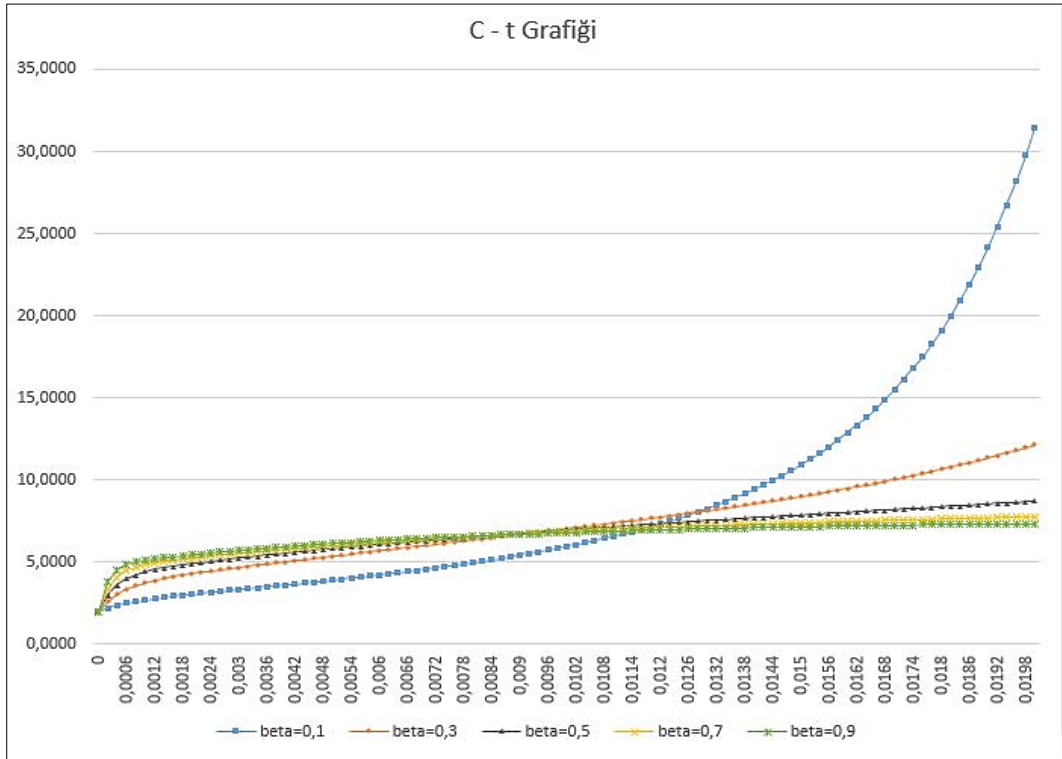
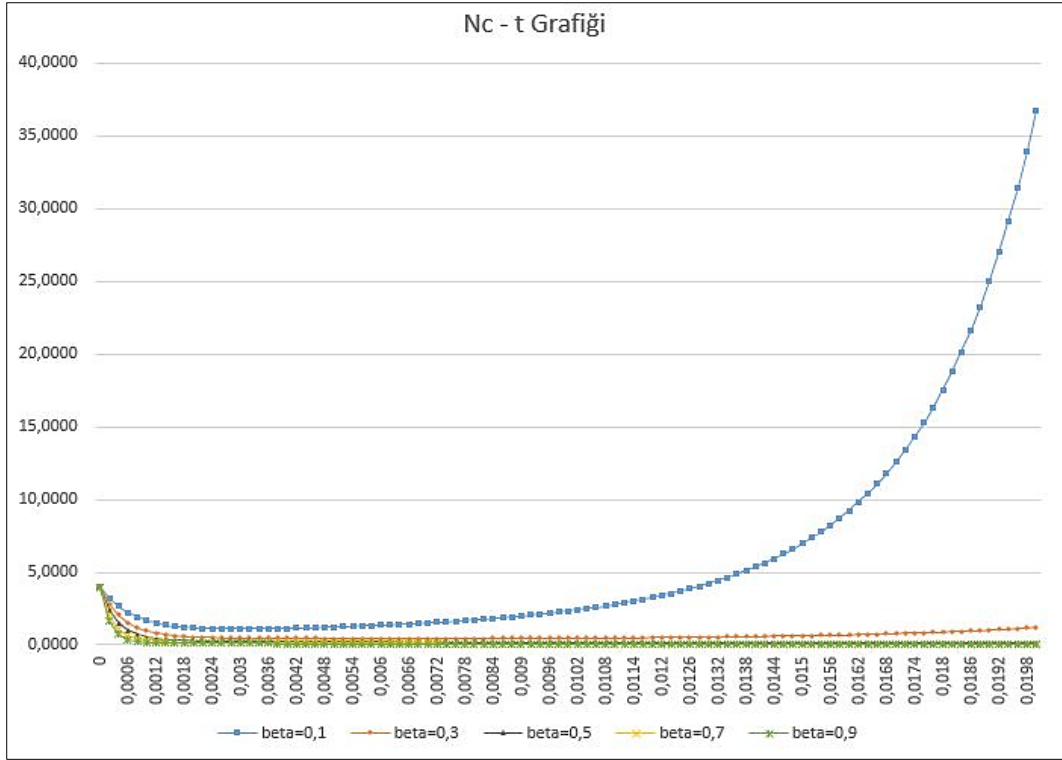
Reaktivite zamana bağlı olarak  $\rho = 0,1 + 20t$  (lineer) şeklinde artarken,  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ ' nin zamana göre değişimi yine grafik 3.1' de kullanılan ilk değerleri ve farklı  $\beta$  (geciken nötron oranı) değerleri için de hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları grafik 3.4 ve grafik 3.5' te gösterilmiştir.





**Grafik 3.4:**  $\rho = 0.1+20t$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişimi.





**Grafik 3.5:**  $\rho=0.1+20t$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi

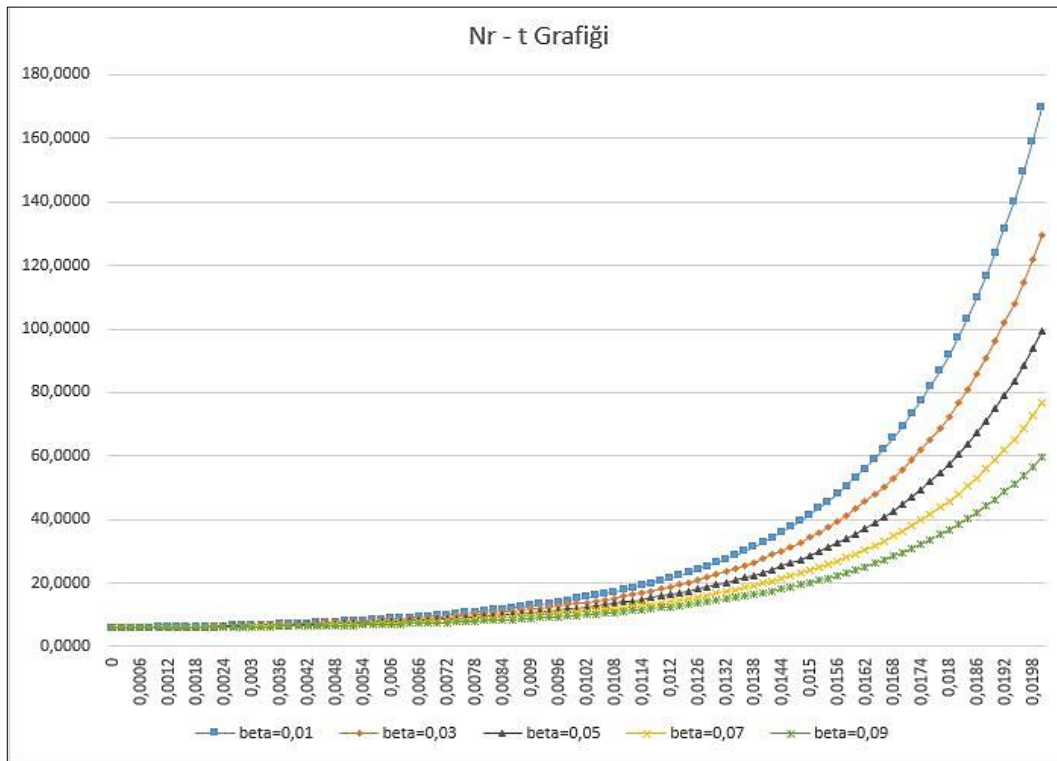
Zamanla lineer olarak değişen reaktivite ( $\rho=0.1+20t$ ) için denklem grubunun iterasyon hesabında grafik 3.4 farklı  $\beta$  ( $\beta=0.01$ ,  $\beta=0.03$ ,  $\beta=0.05$ ,  $\beta=0.07$ ,  $\beta=0.09$ ), grafik 3.5' de ise yine farklı  $\beta$  ( $\beta=0.1$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\beta=0.7$ ,  $\beta=0.9$ ) değerleri

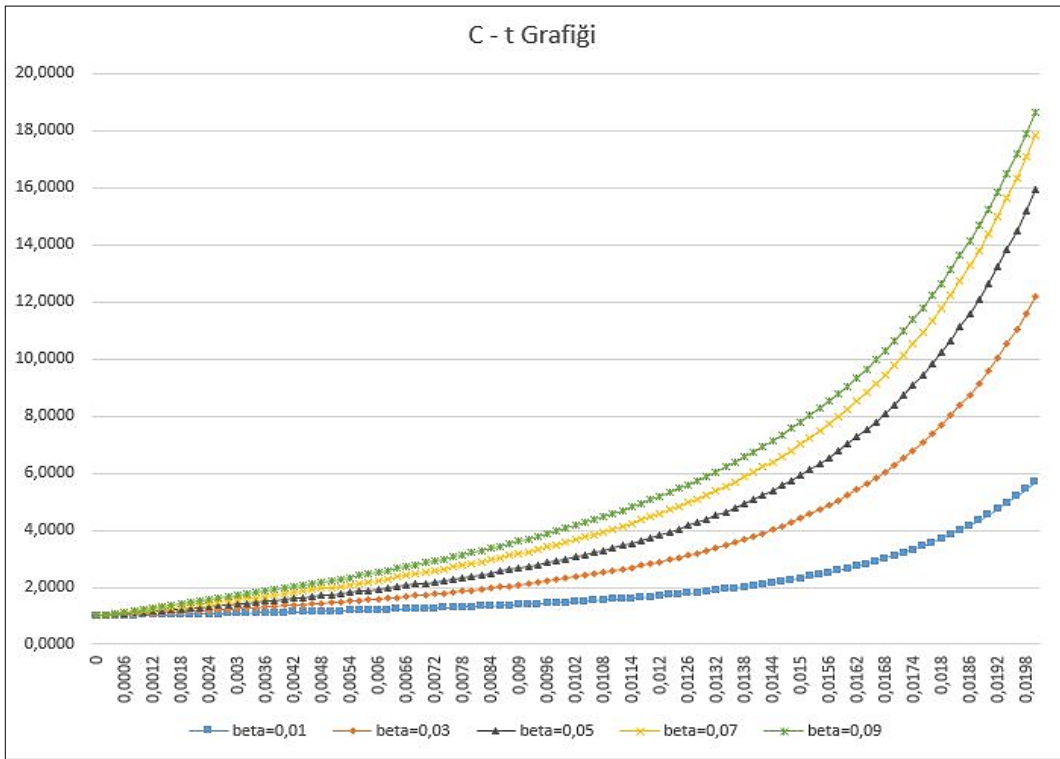
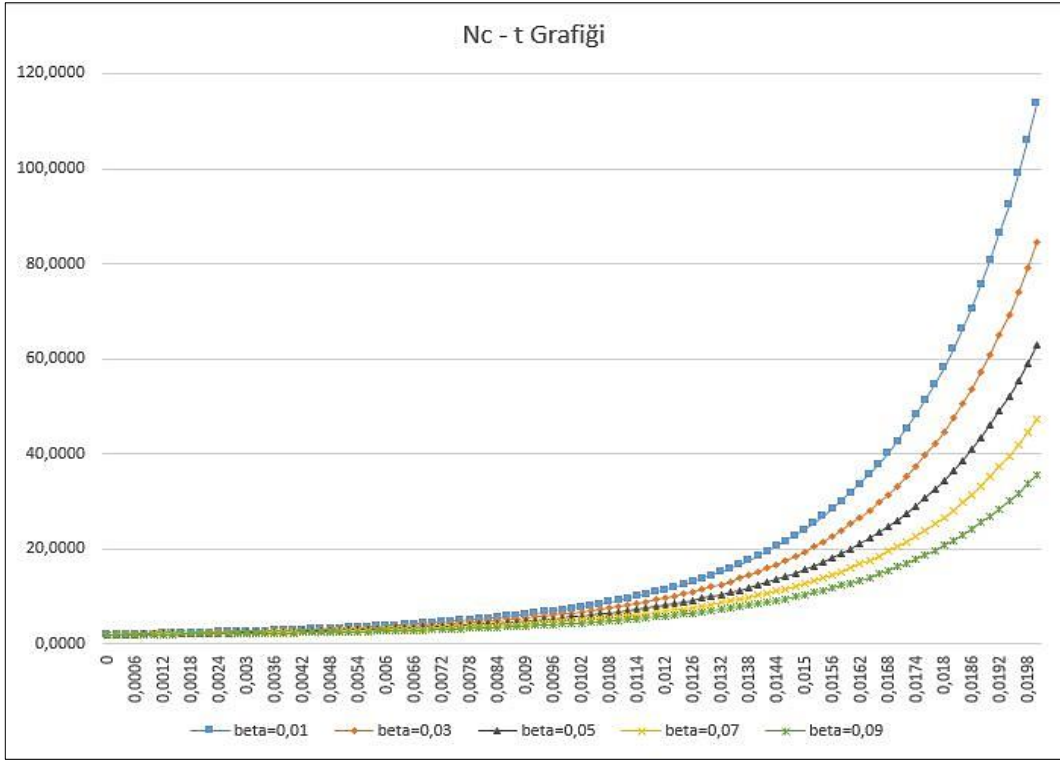
kullanılmıştır. Yapılan iterasyon hesaplamaları sonucunda elde edilen grafik 3.4 ve grafik 3.5 incelendiğinde iki farklı eğilim okunabilir.

İlk olarak, reaktivite kritik durumdan süperkritik duruma doğru lineer olarak giderek arttığı için düşük  $\beta$  değerlerinde  $N_r$  ve  $N_c$  beklendiği gibi üstel artış eğilimi göstermiştir. Ancak  $\beta$  giderek artırıldığında  $\beta > 0.1$  olduğu durumlarda üstel artış eğiliminin giderek azaldığı,  $\beta = 0.5$  değerinde stabilleştiği,  $\beta > 0.5$  değerlerinde ise asimptotik olarak sıfıra yakınsadığı gözlenmiştir.

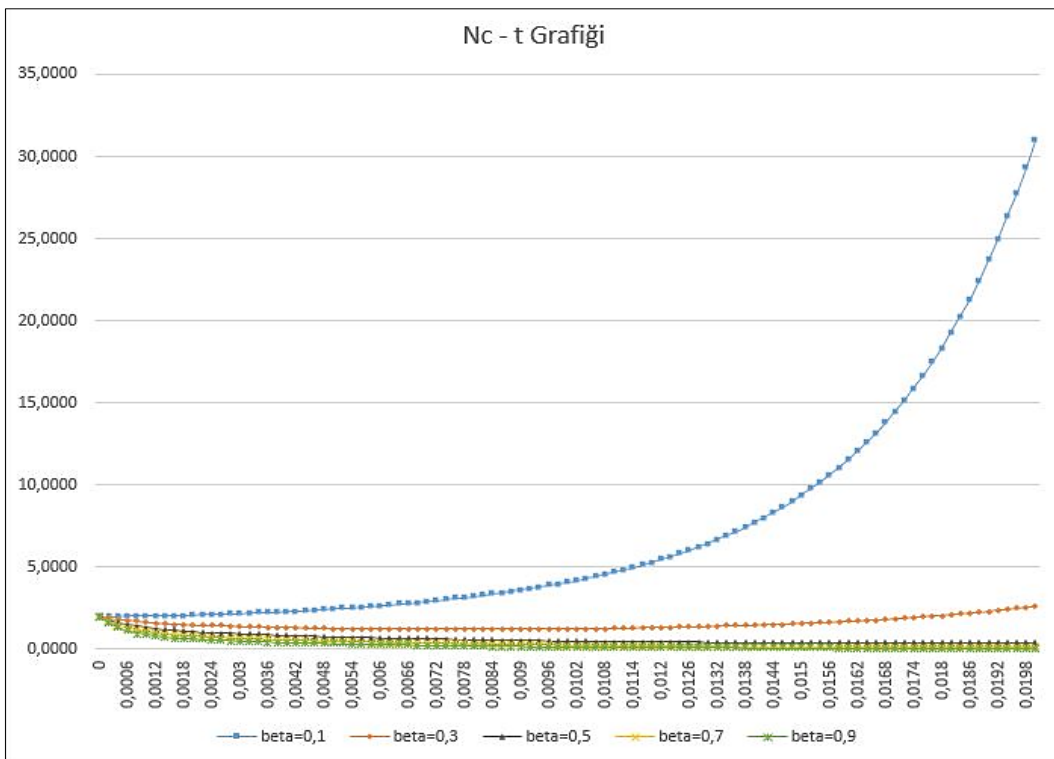
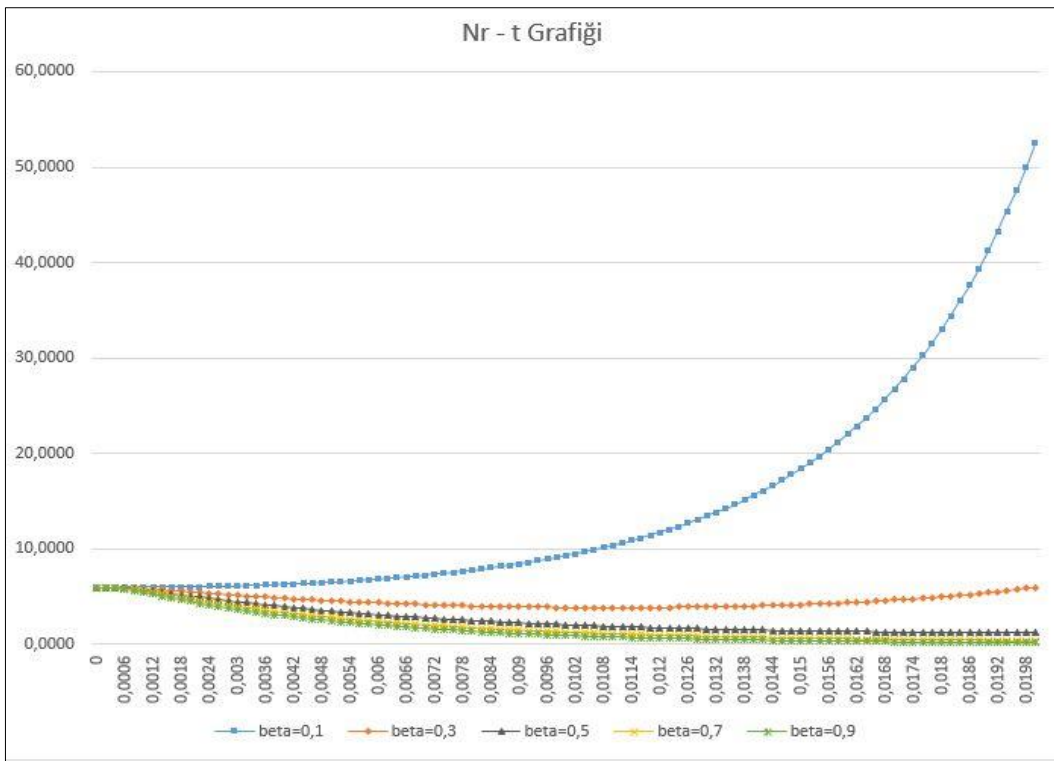
İkinci olarak  $\beta < 0.1$  olmak üzere artan  $\beta$  değerleri ile  $C$ 'nin aldığı değerlerde üstel artış eğilimi göstermektedir. Ancak, incelenen zaman dilimi içerisinde bu üstel artış eğilimi  $\beta \approx 0.1$ ' de değişmeye başlar ve  $\beta = 0.5$  değerinde üstel artış giderek lineer artışa dönüşmektedir. Yine grafik 3.5' de  $C$ 'nin  $\beta > 0.5$  değerlerinde ise sıfırdan farklı bir değere asimptotik olarak yakınsadığı görülmektedir.

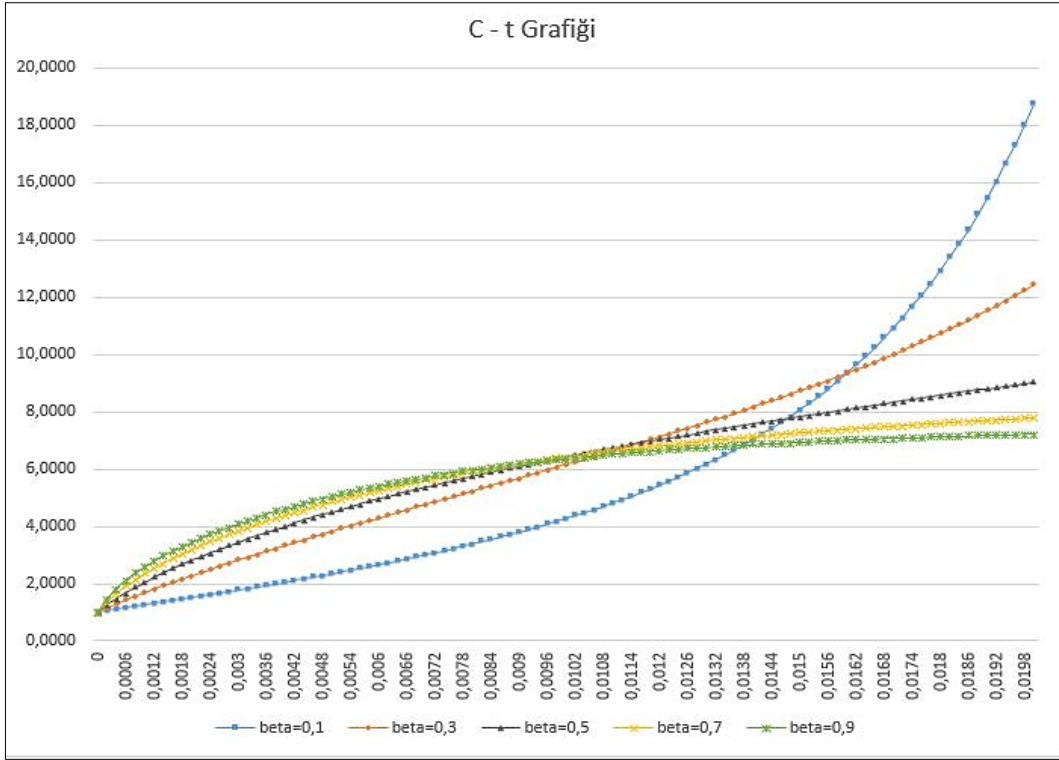
Elde edilen sonuçların  $\rho = 0.1 + 20t$ ,  $A_C = 0.4$  ms,  $l_r = 4$  ms,  $\lambda = 0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc} = 0.5$ ,  $a_{cr} = 0.8$  ve  $N_c(0) = 4$ ,  $N_r(0) = 1$ ,  $C(0) = 2$  ile farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişiminin belirlenen ilk değerlere bağlı olup olmadığını test etmek için  $\Lambda_C = 0.8$  ms,  $l_r = 3$  ms ve  $N_c(0) = 2$ ,  $N_r(0) = 6$ ,  $C(0) = 1$  farklı ilk değerleri ile de denklem grubu iterasyon hesaplamaları yapılmıştır. Yeni ve farklı ilk değerler ile oluşan sonuçlar grafik 3.6 ve grafik 3.7'te gösterilmiştir.





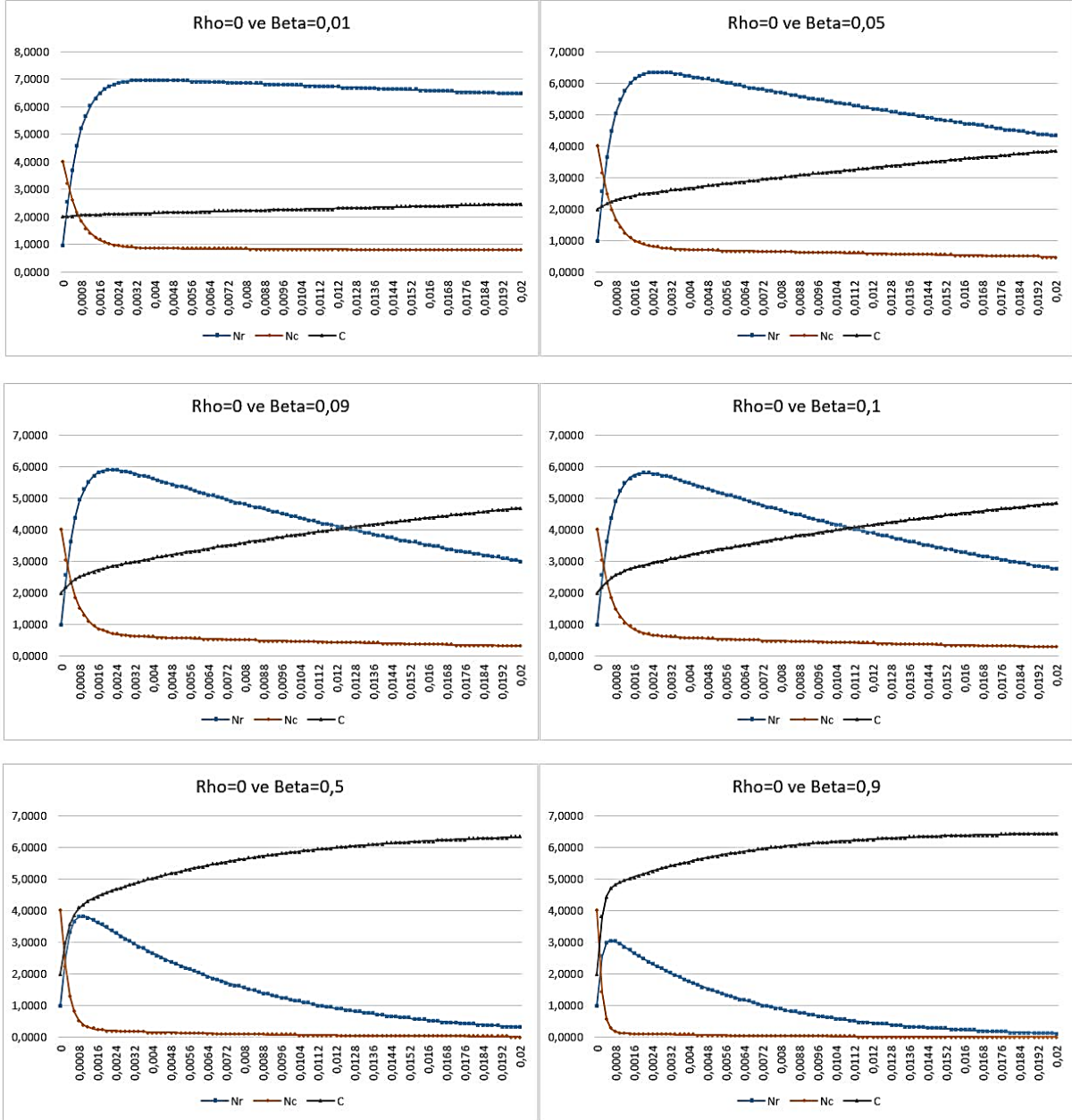
**Grafik 3.6:**  $\rho=0.1+20t$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi





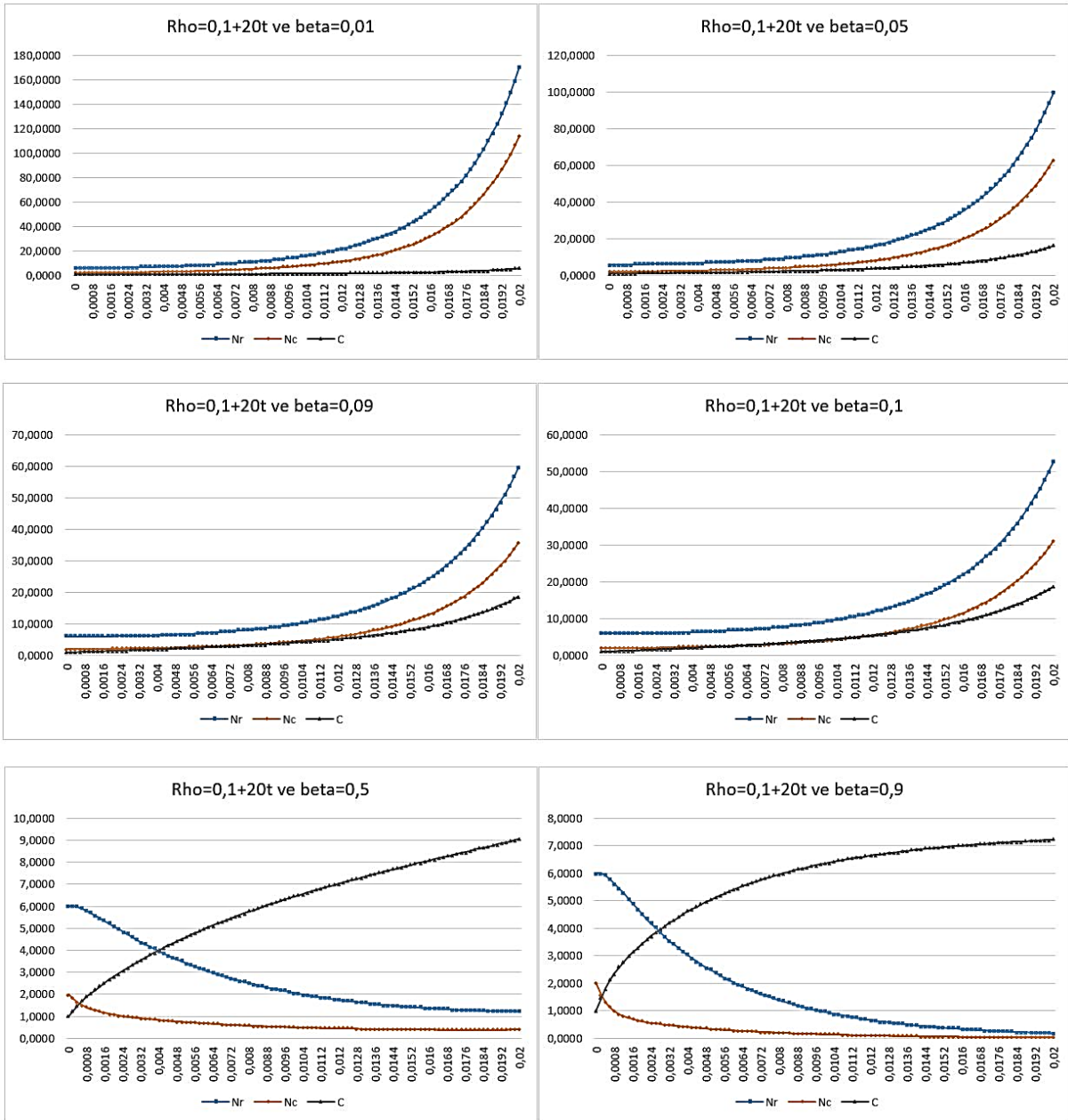
**Grafik 3.7:**  $\rho=0.1+20t$  ve farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimi

Grafik 3.6 ve grafik 3.7'te  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$ 'nin zamana bağlı değişimleri incelendiğinde grafik 3.4 ve grafik 3.5' dekiyle benzerlik göstermektedir. Gözlemleyebildiğimiz fark ise,  $C$ 'nin  $\beta < 0.1$  bölgesindeki artan değerleri için grafik 3.4' ye göre grafik 3.6' teki artışın daha az olmasıdır. Bunun dışında grafik 3.6 ve grafik 3.7 için elde edilen sonuçlar grafik 3.4 ve grafik 3.5 için ulaşılan sonuçlarla aynıdır. Elde edilen *Çabuk*, *geciken* ve *yansıtıcı nötron sayılarının* zamana bağlı değişimlerdeki eğilimler denklem grubunun yapılan iterasyon hesaplamaları sonucunda seçilen ilk değerlerden bağımsızdır.



**Grafik 3.8:**  $\rho=0$ ,  $A_c=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü.

Reaktivitenin sıfır olduğu kritik bir nükleer reaktör için grafik 3.8 'de  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü incelendiğinde,  $\beta$  değerleri artıktıkça  $N_r$  azalan bir artışın ardından giderek azalmakta ve sıfıra yakınsamakta,  $N_c$  ise sıfırdan farklı bir değerde stabilleşmekten asimptotik olarak sıfıra yakınsamaktadır.  $\beta < 0,05$  olduğu durumlarda  $C$  değerleri  $N_r$ ' nin altında kalırken  $0,1 > \beta > 0,05$  olduğunda  $C$  ve  $N_r$  kesişmekte ve  $\beta > 0,1$  olduğunda ise  $C$  değerleri  $N_r$ ' den fazla olmakla birlikte üstel bir artışın ardından stabilleşmektedir. Bu ise kritik nükleer reaktörde zincirleme fisyon reaksiyonunu kontrol ederken reaktivitenin devam etmesini ve sağlar.



**Grafik 3.9:**  $\rho = 0,1+20t$ ,  $\Lambda_c=0.4$  ms,  $l_r=4$  ms,  $\lambda=0.1$  s<sup>-1</sup>,  $a_{rc}=0.5$ ,  $a_{cr}=0.8$  ve  $N_c(0)=4$ ,  $N_r(0)=1$ ,  $C(0)=2$  ilk değerleri ile farklı  $\beta$  değerleri için  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü.

Reaktivitenin zamana bağlı olarak arttığı süperkritik bir nükleer reaktör için ise grafik 3.9 'da  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  nin zamana bağlı değişiminin toplu görünümü incelendiğinde,  $\beta < 01$  değerlerinde  $N_r$ ,  $N_c$  ve  $C$  üstel olarak artarken  $C$ 'nin aldığı değerler  $N_r$  ve  $N_c$ 'nin aldığı değerlerinin altında kalmaktadır.  $\beta > 01$  değerlerinde  $N_r$  ve  $N_c$  giderek azalmakta ve sıfıra yakınsamakta,  $C$ 'nin aldığı değerler ise giderek azalan bir artışın ardından sıfırdan farklı bir değerde stabilleşmektedir. Geciken nötron sayısını belli değerde tutmak reaktivitenin devam etmesini sağlarken zincirleme reaksiyonu önler.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kritik ve süperkritik nükleer reaktör için çekirdek, yansıtıcı ve geciken nötron sayılarının zamana bağlı değişimi iki nokta kinetik modelin iteratif yöntemle numerik olarak çözülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre nükleer reaktör reaktivitesi kritik durumda iken reaktör çekirdeğindeki ve yansıtıcıdaki nötron yoğunluğunu sıfıra yakınsarken geciken nötron oranının sıfırdan farklı değerde stabilleştiği ve nükleer reaktör reaktivitesi zamana bağlı lineer şekilde artarken, çekirdek ve yansıtıcıdaki nötron sayısının üstel artışının durması ve hatta sıfıra indirebilmesi için geciken nötron oranının artırıldığı gösterilmiştir. Geciken nötron sayısı ise kritik ve süperkritik nükleer reaktör durumlarında artan geciken nötron oranıyla zamanla azalan artıştan asimptotik yakınsadığı gösterilmiştir. Bu şekilde, geciken nötron oranını artırarak her iki nükleer reaktör reaktivite durumunda zincirleme reaksiyon oluşumunun önüne geçilebileceği yani fisyon reaksiyonu çığırından çıkmadan reaktörün çalışmaya devam edebileceği gösterilmiştir.

Gelecekte, üzerinde çalışılan geciken nötron öncülerinin nükleer reaktör çalışmasındaki önemi problemi reaktör çekirdeğine bir de nötron kaynağı ekleyerek geciken nötron öncülerinin kritik ve süperkritik reaktörler için etkisinin nasıl gerçekleşeceğinin hesaplanması şeklinde çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKÇA

**Aboanber, A. E.** (2009). Exact solution for the non-linear two-point kinetic model of reflected reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 719-726.

**Aboanber, A. E., & Nahla, A.** (2018). Mathematical treatment for two-point reactor kinetics model of reflected systems. *Progress in Nuclear Energy*, 287-293.

**Aytekin, H.** (2017, 11 20). *Çekirdek Fiziği Ders Notları*. [Erişim: 07.05.2022, <https://cdn2.beun.edu.tr/fizik/a30b9785deb4530895aa3ef5d96fb667/fiz441cekirdekfizigiuyu>]

**Aytekin, H.** (2017, 11 20). *FİZ444 Radyasyon Fiziği Ders Notları*. [Erişim: 07.05.2022, <http://cdn2.beun.edu.tr/fizik/a30b9785deb4530895aa3ef5d96fb667/fiz444radyasyonfizigidersnotlariuyumlulukmodu11.pdf> ]

**Bobat, A., & vd.** (2018). Olmayana Ergi Yöntemiyle Nükleer Güç, Çevre ve Kentsel Yaşam Değerlendirmesi. *7th International Vocational Schools Symposium* (s. 140-148). Baku, Azerbaycan: Akademik Yayınlar.

**Bunn, M., & Heinonen, O.** (2011). Preventing the next Fukushima. *Science*, 1580-1581.

**Cockbame, D. R.** (1966, Nisan). Nükleer Reaktörlerin Kontrolü ve Cihazlandırılması. [Erişim: 07.05.2022, [http://www.emo.org.tr/ekler/7aeec35c9820509\\_ek.pdf?dergi=14](http://www.emo.org.tr/ekler/7aeec35c9820509_ek.pdf?dergi=14) ]

**Çek, N.** (2016). Parçacıklar ve Parçacıkların Enerji Kaynakları Üzerinde. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1.

**Çek, N.** (2016). Parçacıklar ve Parçacıkların Enerji Kaynakları Üzerinde Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1-8.

**Çifci, A., & vd.** (2019). Nükleer Filyon ve Filyon Olayları. *Ortaöğretim Fen Lisesi Fizik 12 Ders Kitabı* (s. 220-224). içinde Ankara: Meb Devlet Kitapları.

**Dai, J., & vd.** (2019). The health risk-benefit feasibility of nuclear power development. *Journal of cleaner production*, 198-206.

**ETKBBM.** (2021, 11 4). *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi*. [Erişim: 07.05.2022, <https://enerji.enerji.gov.tr/Media/Dizin/NUPGM/tr/Belgeler/5161-nukleer3.pdf> ]

**EVTKBBM.** (2021, 4 11). *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi*. [Erişim: 07.05.2022, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> ]

**FizikBilimi, g.** (2017, 04 21). *Atom Altı Parçacıklar*. [Erişim: 07.05.2022, <https://www.fizikbilimi.gen.tr/wp-content/uploads/2017/04/atom-alti-parcaciklar-35.jpg> ]

**Göker, A. İ.** (2021). Küresel Bir Nükleer Reaktör İçin Ana ve Alternatif Bükülmedeki Değişimlerin Kritik Yarıçapa Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 116-124.

**Lewis, E. E., & Miller, J.** (1984). *Computational methods of neutron transport*. New York: John Wiley and Sons.

**Meriç, N.** (2018, 01 12). *Gama ve X Işınları*. [Erişim: 07.05.2022, [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25490/mod\\_resource/content/1/D%284%29\\_GA\\_MMA%20VE%20X-I%2C5%29EINLARI.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25490/mod_resource/content/1/D%284%29_GA_MMA%20VE%20X-I%2C5%29EINLARI.pdf) ]

**Meriç, N.** (2021, 05 25). *Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri*. [Erişim: 07.05.2022, [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/22884/mod\\_resource/content/2/13.Hafta.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/22884/mod_resource/content/2/13.Hafta.pdf) ]

**Meriç, P. D.** (2017, 11 8). *Beta Işınları*. [Erişim: 07.05.2022, [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25481/mod\\_resource/content/1/D%283%29\\_BET\\_A%20I%2C5%29EINLARI.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/25481/mod_resource/content/1/D%283%29_BET_A%20I%2C5%29EINLARI.pdf) ]

**Mitchell, C.** (2016). Momentum is increasing towards a flexible electricity system based on renewables. *Nature*, 1-6.

**NED.** (2021, 11 11). *Nükleer Enerji Dünyası*. [Erişim: 07.05.2022, [http://www.nukleer.web.tr/nukleer\\_santral\\_turleri/nukleer\\_santral\\_turleri.html](http://www.nukleer.web.tr/nukleer_santral_turleri/nukleer_santral_turleri.html) ]

**Nükleer Fizikte Kullanılan Birim Sistemi.** (2016). [Erişim: 07.05.2022, [https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/FZ%20443/630381381\\_nukleer\\_fizik2.pdf](https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/FZ%20443/630381381_nukleer_fizik2.pdf) ]

**Ocak, M. E.** (2015, 4 27). *Proton ve Nötronun Kütleleri*. [Erişim: 07.05.2022, <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/proton-ve-notronun-kutleleri> ]

**Özemre, A. Y.** (1969). *Nötronların Difüzyon Teorisi 1. Cild (2.baskı)* (s. 2-8). içinde İstanbul: İTÜ Nükleer Enerji Ens. Yay.

**Spriggs, G. D., & vd.** (1997). Two-region kinetic model for reflected reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 205-250.

**TNEAE.** (2022). *Bilgi Merkezi*. [Erişim: 07.05.2022, <https://www.tenmak.gov.tr/2016-06-09-00-43-55/135-gunumuzde-nukleer-enerji-rapor/838-bolum-02-nukleer-enerjinin-temel-prensipleri.html> ]

**Van Dam, H.** (1996). Inhour equation and kinetic distortion in a two-point reactor kinetic model. *Annals of Nuclear Energy*, 1127-1142.

**Yıldırım, M., & Örnek, İ.** (2007). Enerjide Son Seçim: Nükleer Enerji . *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 32-44.

**Yücel, H.** (2019, 7 31). *Nötron Taşınımı*. [Erişim: 07.05.2022, [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/111575/mod\\_resource/content/1/102511\\_B%C3%B6l%C3%BCm9a\\_%C4%B0leri%20N%C3%B6tron%20ve%20reakt%C3%B6r%20fizi%C4%9Fi.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/111575/mod_resource/content/1/102511_B%C3%B6l%C3%BCm9a_%C4%B0leri%20N%C3%B6tron%20ve%20reakt%C3%B6r%20fizi%C4%9Fi.pdf) ]