

28556

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * NÜKLEER ENERJİ ENSTİTÜSÜ

TR-2 REAKTÖRÜNDE KONTROL ÇUBUĞU
KALİBRASYONUNUN KARŞILAŞTIRILMALI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Elk. Müh. Gülfem BAHÇECİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21 Haziran 1993

Tezin Savunulduğu Tarih : 6 Temmuz 1993

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasbi YAVUZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Şevket ERK

Yrd. Doç. Dr. Akif ATALAY

TEMMUZ 1993

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖNSÖZ

Reaktörlerde güç veya nötron yoğunluğunun değişimini kontrol altına almak amacıyla kullanılan kontrol çubuklarının, reaktör kalbinde bulundukları pozisyonlara göre reaktivite değerlerinin bilinmesi, reaktörlerin güvenli çalışması açısından önem taşımaktadır.

Kontrol çubuklarının reaktör kalbine indirilmesi veya çıkartılmasıyla, ortama pozitif veya negatif reaktivite verilerek, reaktörlerin çalıştırılmaya başlatılması, belli bir güçte güvenli olarak işletilmesi ve istendiğinde reaktörün çok kısa bir süre içinde durdurulması için gerekli olan kontrol sağlanır.

Bu çalışmada, kontrol çubuklarının konumlarına bağlı olarak reaktivite değerlerinin belirlenmesi için kullanılan metotlar tanıtılmış ve bunlardan ikisi deneysel olarak yapılmıştır.

Yaptığım tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana her konudaki yardımlarından, yakın ilgisinden ve desteğinden dolayı İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü Müdürü Sayın Hocam Dr. Hasbi YAVUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarında bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen İTÜ NEE Araştırma görevlisi Sayın Tayfun BÜKE'ye teşekkür ederim.

ÇNAEM Reaktör Bölümünde deneylerin yapılmasındaki yardımlarından ve değerli katkılarından dolayı Sayın Hakan ANAÇ'a ve çalışmalarında bana destek olan ÇNAEM Teknoloji Bölümler Md. Yardımcısı Sayın Yaşar ÖZAL'a, ÇNAEM Reaktör Bölüm Başkanı Sayın Dr. Sinan TAYLAN'a ve diğer Reaktör Bölümü arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Gülfem BAHÇECİ

İÇİNDEKİLER

SEMBOLLER.....	IV
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VII
BÖLÜM 1. Giriş.....	1
BÖLÜM 2. KONTROL ÇUBUĞU KALİBRASYONUNDA KULLANILAN METODLARIN TANITILMASI.....	5
2.1. Pozitif Peryod Metodu.....	6
2.2. Çubuk Düşürme Metodu.....	8
2.3. Kaynak Çekme Metodu.....	16
2.4. Çubuk Salınma Metodu	21
2.5. Rossi Alpha Ve Ortalamaya Göre Değişim Metodu.....	23
2.6. Nötron Darbesi Metodu.....	28
2.7. Yakıt Yerine Zehir Koyma Metodu	35
BÖLÜM 3. METODLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	37
BÖLÜM 4. TR-2 REAKTÖRÜNÜN KONTROL ÇUBUKLARININ KALİBRASYONUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	40
4.1. Nokta kinetik Denklemlerinin Çıkarılması... ..	41
4.2. TR-2 Reaktöründe Pozitif Peryod Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonu Deneyi.....	56
4.3. Pozitif Peryod Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonunda Meydana Gelen Hatalar.....	74
4.4. TR-2 Reaktöründe Çubuk Düşürme Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonu Deneyi.....	85
4.5. Çubuk Düşürme Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonunda Meydana Gelen Hatalar.....	92
BÖLÜM.5. SONUÇ.....	94
EKLER.....	97
REFERANSLAR.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SEMBOLLER

C_{i0}	= Sürekli rejimde i. grup gecikmiş nötron öncüsü yoğunluğu (n/cm ³)
C_i	= i. grup gecikmiş nötron öncüsü yoğunluğu (n/cm ³)
D	= Difüzyon katsayısı (cm.)
k_0	= Sürekli rejimde etkin çoğaltma katsayısı
$k(k_1)$	= Etkin çoğaltma katsayısı
k_{p0}	= Sürekli rejimde ani nötron çoğaltma katsayısı
k_{p1}	= Ani nötron çoğaltma katsayısı
k_{∞}	= Sonsuz ortam çoğaltma katsayısı
	= Ani nötron ömrü (s.)
M_0	= Sürekli rejimde kaynak çoğaltma katsayısı
M_T	= Kaynak çoğaltma katsayısı
n_0	= Sürekli rejimde nötron yoğunluğu (n/cm ³)
$n(n_1)$	= Nötron yoğunluğu (n/cm ³)
Q_0	= Enerjiye göre ortalama ek akı (n/cm ³ .s.)
Q	= Ek akı (n/cm ³ .s.)
S	= Kaynak şiddeti (n/cm ³ .s.)
t_0	= Reaktör gücünün iki katına çıkıncaya kadar geçen süre (s.)
t	= Zaman (s.)
dt	= Zaman aralığı (s.)
T	= Peryod (s.)
v	= Nötron hızı (cm./s.)
$W(j\omega)$	= Reaktör transfer fonksiyonu
X	= Enerjiye göre ortalama nötron enerji spektrumu
$\alpha(\alpha_0)$	= Ani kritiklikteki bozunum sabiti (s.)
α	= Gecikmiş kritiklikteki bozunum sabiti (s.-1)
β_i	= i. grup gecikmiş nötron kesri
τ	= Gecikmiş nötronların ani nötronlara etkinliği
δk	= Çoğaltma katsayısındaki değişim
λ_{i0}	= Sürekli rejimde i. grup gecikmiş nötron öncüsü bozunum sabiti (s.-1)
λ_i	= i. grup gecikmiş nötron öncüsü bozunum sabiti (s.-1)
$\checkmark$	= Her fisyon başına ortaya çıkan nötron sayısı
ρ	= Reaktivite
Σ_a	= Makroskopik yutma tesir kesiti (cm.-1)
Σ_f	= Makroskopik fisyon yutma tesir kesiti (cm.-1)
ϕ	= Nötron akısı (n/cm ² .s.)
$\wedge$	= Nötron jenerasyon zamanı (s.)

ÖZET

Reaktivite ve reaktivite değişimi, reaktör dizaynında, kontrolünde ve güvenliğinde kullanılan önemli bir kavramdır. Bir reaktörün işletilmesi ve kontrolü genellikle kontrol çubukları vasıtasıyla reaktöre pozitif ve negatif reaktivite verilmek suretiyle sağlanır.

Kontrol çubuklarının reaktör kalbinde bulundukları pozisyonlara göre reaktivite değerlerinin bulunması, kontrol çubuk kalibrasyonu olarak adlandırılır. Bu amaçla kullanılan reaktivite ölçme metodlarından başlıcaları pozitif peryod, çubuk düşürme, kaynak çekme, çubuk salınma, rossi alpha ve ortalamaya göre değişim, nötron darbesi, yakıt yerine zehir koyma metodlarıdır.

Bu tekniklerden en yaygın olarak kullanılan pozitif peryod ve çubuk düşürme metodu, TR-2 Reaktörünün kontrol çubuklarına uygulanmıştır.

Pozitif peryod metodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmada reaktöre verilen pozitif adım reaktivite;

1- Gücün iki kat olma zamanından hesaplanan kararlı peryodun inhour eşitliğinde yerine konulmasıyla,

2- Deney sırasında bilgisayara kaydedilen nötron yoğunluğu-zaman verilerine göre çizilen eğri yardımıyla bulunan inhour denkleminin kökünün, ilgili bilgisayar programına veri olarak girilmesiyle bulunmuştur.

Pozitif peryod metodunda kontrol çubuğunun her yukarı çekilişinde reaktöre verilen adım şeklindeki reaktivite değeri 30-300 pcm değerleri arasında sınırlı olup, çubuğun tümünün yukarı çekilmesine kadar bu işlem devam ettiğinden, bu metodun uygulanması uzun zaman gerektirmektedir.

Bu metot alçak bir güç seviyesinde uygulanır. Çünkü yüksek güç sebebiyle artan reaktör sıcaklığı, reaktivite hesabında hataya sebep olur.

Çubukların gölgeleme etkilerinin azaltmak için kalibrasyonu yapılan çubuğun dışındakiler, reaktörün her kritik olması sırasında aynı seviyelere çekilmelidir.

Kararlı peryodun hesabı, geçici rejim hareketinin sönümlenmesinden sonra, yapılmalıdır. Ancak reaktör güç artışından dolayı sıcaklık artışının reaktiviteyi değiştirebileceği göz önüne alınarak, çok uzun bekleme zamanı sakıncalıdır.

Çubuk düşürme deneyinde bir kontrol çubuğunun en üst konumundan reaktör kalbine düşürülmesiyle ortama verilen negatif reaktivite, bilgisayara kaydedilen nötron yoğunluğunun bozunum eğrisinden hesaplanmıştır.

Çubuk düşürme metodunun uygulanması basit olmakla birlikte analizi karışıktır. Çubuk düştükten ve ani geçici rejim hareketinden sonraki nötron akı seviyesinin doğru tesbiti zordur. Bu da reaktivite hesabında hata kaynağıdır. Bu metotla bir kaç bin pcm mertebesinde reaktivite ölçmek mümkündür.

TR-2 Reaktörünün kontrol çubuklarına uygulanan pozitif peryod ve çubuk düşürme deneyleri sonucunda bulunan reaktivite değerleri birbirine yakın olup, her iki metodun birbiriyle uyumlu olduğu söylenebilir.

A COMPARATIVE STUDY ON CONTROL ROD CALIBRATION IN THE TR-2 REACTOR

SUMMARY

Reactivity and reactivity change is an important concept in the design, control and safe operation of the reactor. Operating and controlling of a reactor is usually provided by giving positive or negative reactivity to the reactor with control rods.

If we consider the reactivity as a measure of the deviation of a reactor from the critical state, it can be shown that the decay of neutron density will be a function of reactivity. After additive positive or negative reactivity to the critical reactor, the reactivity worth can be found by observing the time behaviour of neutron density.

The knowledge of the reactivity of control rods is important for safety and practical purpose. Control rods are used for start up, steady-state operation and shut down of the reactor. Therefore, their reactivity worths must be known accurately before the reactor start-up. It is necessary to know the total worth of a rod. Also, it is desirable to know the reactivity worth of a control rod at any of its position in the reactor.

The practical purpose of rod calibration is to detect reactivity changes that occur in the reactor. Normal reactivity changes can occur from effects such as temperature, fuel burnup, fission product poisoning and poison burnup. The magnitude of the change can be determined from the calibration of the rods and the critical rod setting.

The rod calibration curves are determined by measuring the value of reactivity corresponding to a control rod withdrawal distance. They give important data for safe operation and management of the reactor.

Before the initial reactor start up, it is required that the reactor be loaded to critical. Then, a desired reactivity amount is inserted into the reactor core by adding further fuel assemblies to supply the reactivity necessary for the routine operation of the reactor. The excess reactivity should always be considerably less than that which can be suppressed by the control rods.

Obtaining reactivity values of the control rods in different position of the reactor core is called control rod calibration. Applied the reactivity measuring methods in use for this purpose are mainly positive period, rod drop, source jerk, rod oscillator, rossi alpha and variance to mean, pulsed neutron, fuel poison substitution methods.

The most common methods, positive period and rod drop are carried out for TR-2 Reactor in this thesis study.

In the positive period method, reactivity changes are measured by observing positive asymptotic periods of the reactor. These asymptotic periods are related to reactivity by the Reactor Kinetic Equations and the Inhour Equation.

When a control rod is withdrawn a certain distance from the critical position, the positive reactivity corresponding to the withdrawal length is added to the reactor approximately stepwise. After a transient excursion, the reactor-power increases exponentially with the stable period corresponding to the added positive reactivity.

In the experiment with positive period method, the value of the positive step reactivity given to the reactor is found by;

1- Measuring the doubling time of the reactor power to find stable period and using this in the Inhour Equation.

2- Recording and plotting change of neutron concentration in time by a data acquisition system and finding the root of Inhour Equation. And then using this root in a computer code.

If there is a neutron source in the reactor, the k in the critical state is slightly smaller than unity. The effect of the neutron source on the measurement must be negligible. Therefore, the power level in the critical state should be set.

For the positive period method, the reactivity given with every withdrawal of control rod is limited between 30-300 pcm. Since all the length must scanned, the method requires a lot of steps and time.

This method must be applied at low power levels. Because the temperature of the reactor increases with the increasing power, this causes error in the reactivity measurements.

For the value of the stable period, one has to wait until transients become negligible. But also long waiting times must be avoided for the temperature effects on reactivity arising with the power increase.

If the reactivity given to the reactor at one time in the calibration is too large, the reactor power increase too fast. A large error in the measurement of the doubling time arises and operation of reactor may not be controlled.

On the other hand if too small reactivity is added to the reactor, the difference of k from unity at the initial state causes error in the measurement and also a long time is needed to measure the doubling time. Therefore the amount of reactivity to be added at one time for the measurement must be determined so that the reactor period becomes in the range of 20 s. and 30 s.

The effectiveness of a control rod depends upon the value of the neutron flux at the point of insertion of the rod. A single control rod is most effective at the center of a reactor and less effective at the outer edge or in the reflector.

When the control rod pattern is changed, the neutron flux distribution in the reactor changes. Then the reactivity worth of a material located in the reactor also changes even if its position does not change.

To avoid shadowing effects of other control rods, these must be held on the same level with respect to each other.

Control rods must be placed symmetrically in a reactor core in order to prevent excessive distortion of the thermal neutron flux and to minimize thermal stresses.

The neutron flux is low at the outer part of a reactor core, so the absorption of thermal neutrons are small. As the beginning part of a control rod is inserted into the reactor core, the negative reactivity per unit length is small. After a certain length of control rod is inserted, the change in reactivity is about linear. When the end part of control rod is almost inserted, the negative reactivity per unit length again becomes small.

For safe operation of a reactor, the rod calibration curves must be prepared ready. This curves display the reactivity worth of the rods as a function of position.

If the critical rod positions are known, the calibration curves can be used to determine the reactivity in the reactor, also they are required some experimental work.

In same cases it is desirable to know the amount of rod motion which will provide a certain period.

The rod drop method is based upon subcritical measurements. When the rod which is to be calibrated is dropped into the core, the reactor is shut down by the insertion of step negative reactivity. The resulting decay of the neutron flux is observed and related to the reactivity.

For the measurements, a dedector which has a fast response is necessary. The neutron detector must be located where its response will be proportional to total neutron flux in the assembly both before and after the drop.

The equations used in this method are derived for the condition of no external neutron source. Therefore, the source must be withdrawn before the rod is dropped. This is more important in this method as compared to the period method, since one requires to avoid the subcritical multiplication of the source neutrons.

In the rod drop experiment, the negative reactivity given to the system is calculated from recording and plotting decay of neutron concentration data.

Although it is easy to make the rod drop experiment, its analysis is complex. Determination of the neutron flux just after the transient time is difficult and this causes error in the reactivity.

With this method it is possible to measure reactivities such as a few thousand pcm.

Results of rod drop and positive period experiments on TR-2 Reactor are in good agreement with each other, in terms of reactivities obtained.

BÖLÜM.1

GİRİŞ

Bir reaktörün işletilmesiyle ilgili önemli bir işlev sistemin güvenli bir şekilde kontrol edilebilme kabiliyetidir. Reaktörlerde nötron yoğunluğuna bağlı olarak gücün artması veya azalması, reaktör kalbine ithal edilen pozitif veya negatif reaktivite ile sağlanır. Gücün zamana değişimi ile orantılı olan reaktivite değiştirilmek suretiyle, reaktörlerde kontrol mümkün olur. [1]

Gücü dolayısıyla nötron akısını kontrol etmek için reaktörlerde çeşitli kontrol mekanizmaları kullanılır. Bir reaktör için hesaplanmış olan k çoğaltma katsayısı her zaman 1'e eşit olsaydı, reaktörlerde akı oranı yani güç daima sabit kalacaktı. Fakat çoğaltma katsayısı, sıcaklık değişimleri, yakıt yanması, fisyon ürünlerinin meydana getirdiği zehir etkisiyle zamanla değişir. Buna ilaveten istenilen güç seviyesine ulaşılabilmesi için reaktörlerde $k > 1$ olmalıdır. Bu nedenlerle reaktörler k değerini 1'den büyük yapabilen pozitif bir reaktivite oluşturabilecek şekilde dizayn edilirler. Aynı zamanda kontrol mekanizması reaktörü durdurmak amacıyla k 'nın 1'den küçük olmasına sebebiyet veren negatif bir reaktivite sağlayacak biçimde tasarlanmalıdır.

Reaktörlerde kontrol amacıyla gerekli reaktivite değişiklikleri, yakıt elemanları, yavaşlatıcı, reflektör veya nötron yutucu kontrol çubuklarının hareket ettirilmesi yoluyla sağlanabilir. Ayrıca yavaşlatıcıya zehir eklenmesi veya yavaşlatıcıdan zehir çekilmesi yoluyla da reaktivite değiştirilerek kontrol yapmak mümkündür. Bunlardan en çok kullanılanı kontrol çubuklarıdır.

Kontrol çubukları nötron yutma tesir kesitleri yüksek olan malzemelerden yapılmış olup, reaktör ortamındaki fisyon nötronlarını istenilen oranda yutarak kontrol sağlarlar. En çok kullanılan kontrol çubuk malzemeleri Bor, Kadmiyum ve Hafniyum'dur. Bunların yüksek sıcaklıklardaki işletme şartlarında çalıştırabilmeleri için çubuk veya ince levha şeklinde paslanmaz çelik veya alüminyum bir kılıf ile zarflandırılmış olmaları gerekir. Kontrol çubukları reaktörün içine veya dışına gruplar halinde veya tek tek sokulurlar veya çıkarılırlar.

Genel olarak kontrol çubukları olarak adlandırılan bu çubuklar ince ayar çubuğu, güvenlik çubuğu ve ayar çubuğu olmak üzere üçe ayrılırlar.

İnce ayar çubuğu sabit bir güç seviyesini, ufak reaktivite değişiklikleri ile sağlayarak reaktör kontrolünde ince ayarı gerçekleştirir. Bu çubuk aynı zamanda bir güç seviyesinden diğer bir güç seviyesine geçilirken de kullanılabilir. Kontrol çubuğunun reaktivite değeri gecikmiş nötron yüzde değerini aşamaz. Bunun reaktöre giriş ve çıkış hızı reaktöre daha çabuk tesir edecek şekilde diğer çubuklardan süratlidir.

Güvenlik çubukları "scram" veya ani durdurmalar için tasarlanmıştır. Hızları içeri sokulma durumunda çok yüksek olmalıdır. Güvenlik çubuklarının reaktivite değeri reaktördeki toplam reaktivite fazlasından (excess reactivity) oldukça fazla olmalıdır.

Ayar çubukları kontrol çubuklarından daha büyük reaktivite değişiklikleri yapacak şekilde dizayn edilmişlerdir. Süratleri daha az olan bu çubukların reaktivite değerleri daha büyük olup, reaktörü istenilen güç seviyesine getirmek amacıyla kullanılırlar.

Her üç çubuğun kendi işlevlerini uygun bir şekilde yerine getirme kabiliyetleri güvenlik açısından çok önemlidir. Çubukların kalbe sokulma ve kalpten çekilme hızları, bu nedenle doğru bir biçimde bilinmelidir.

Her üç çubuğun görevleri bazı reaktörlerde ayrı olmakla beraber birtakım reaktörlerde aynıdır. Reaktörün çalıştırılması sırasında bu çubuklar, reaktörü tam kritik yapana kadar çekilirler. Bu pozisyondan itibaren de istenilen güç seviyesine ulaşıncaya kadar, reaktörü üst kritik yapmak için çekilirler. Reaktörün durdurulması amacıyla da kontrol çubukları kalbe gönderilerek reaktör alt kritik yapılır.

Reaktörün işletilmesi sırasında kontrol çubuklarından bazıları, reaktivitenin değişmesine sebebiyet veren etkileri karşılamak amacıyla bulundukları pozisyonları değiştirirler. Reaktörlerde Kontrol çubuklarının görevleri şu şekilde sıralanabilir.

- 1-Reaktörü işletileceği güce çıkarmak
- 2-Reaktörün istenilen güç seviyesinde işletilmesini sağlamak
- 3-Gerektiğinde reaktörü çok kısa bir sürede durdurabilmek

Zamanla reaktivitenin azalmasına yol açan sebeplerden dolayı, reaktör kalbine reaktörü çalıştırabilecek nükleer yakıttan daha fazlasını yerleştirmek gerekir. Bu şekilde reaktör kalbinde reaktivite fazlalığı elde edilir.

Kontrol çubuklarının bu reaktivite fazlalığını karşılayacak şekilde bir anti-reaktiviteye sahip olmaları gerekir. Böylece kontrol çubuklarının reaktivite değişimini karşılamaları yanında reaktörü durdurmaları da mümkün olur.

Sıcaklığın artmasıyla nötron sıcaklığının yani enerjisinin artmasının reaktiviteye doğrudan etkisi önemsiz olmakla birlikte, bu enerji değişiminin bazı çekirdeklerin rezonans tepelerinde tesir kesitlerini pozitif yönde artırmasıyla, nötron enerjisindeki artışın reaktiviteye verdiği değişim önemli olmaktadır.

Reaktörlerde fisyon olayında büyük termal nötron yutma tesir kesitine sahip fisyon ürünleri oluşur. Bunlar ortamdaki nötronları yutarak k 'nın azalmasına, yani reaktivitenin azalmasına sebebiyet verirler.

Reaktörde herhangi bir madde miktarının yok olmasıyla veya onun yerinde bir boşluğun oluşmasıyla boşluk etkisi ortaya çıkar. Bu da reaktiviteyi değiştirir.

Bir reaktör işletildikçe yakıt miktarı yavaş yavaş devamlı bir şekilde azalır. Fisyon olayı ile çekirdekler bölünerek birim hacimde fisyon ürünleri oluşur. Bu çekirdekleri azalarak, çoğaltma katsayısı k , dolayısıyla reaktivite azalır.

Kontrol çubukları bu şekilde reaktivitenin değişmesine sebebiyet veren parametrelere karşı dengeleyici bir eleman durumundadır. Kontrol çubuklarının işlevi reaktörü belli bir güç seviyesinde işletilmesini sağlamak, bu seviyeyi artırmak veya eksiltmek olduğundan, çubukların pozisyonu reaktiviteyi değiştiren unsurları dengelemek için devamlı değişecektir.

Kontrol çubukları reaktör güç seviyesini kontrol ederken aynı zamanda da sıcaklık, yakıt yanması, boşluk ve fisyon ürünlerinin zehir etkilerinden oluşan reaktivite değişimlerini de karşılayacak şekilde reaktöre reaktivite ithal edeceklerdir. Bu sebeplerle kontrol çubuklarının aksenel yönde hareket ettirilmelerine karşılık gelen, yani reaktör kalbinde sokulmuş oldukları pozisyonlarına karşılık gelen reaktivite değerlerinin bilinmesinin önemi ortaya çıkar.

Reaktivitenin değişmesine yol açan etkenlerden dolayı, belirli bir zaman sonra bir çubuk için yapılan kontrol çubuk kalibrasyonunun tekrarlanması gerekir.

Bir reaktörün işletmeye alınmasından önce, ilk olarak dikkatli bir şekilde nükleer yakıt yüklenerek kritikliğe getirilmesi gerekir. Daha sonra reaktörün normal işletilmesi için gerekli reaktivite, daha fazla yakıtın yüklenmesiyle elde edilir. [2]

Yeni işletmeye alınacak bir reaktörde ilk yükleme kritikliğe yaklaşım deneyi ile yapılır. Aynı zamanda reaktörlerde her yeni yüklemeye bu deney uygulanmalıdır.

Bir reaktörde kritik kütle zamandan bağımsız olarak zincirleme fisyon reaksiyonunun devam ettirilebilmesi için gerekli ve belirli bir nükleer yakıtın minimum miktarının oluşturur. Kritik kütle hesaplanması için uygulanan kritikliğe yaklaşım deneyinden sonra bulunan kritik kütleden daha fazla miktarda yakıt kütlesi reaktöre eklenir. Bundan amaç, reaktör çalıştıkça nükleer yakıtın yanması, ortamda oluşan fisyon ürünlerinin zehir etkisi, sıcaklık artması, boşluk oluşması ve deneysel yapı malzemelerinden gelen zehirlenmelerin yol açtığı reaktivite değişimlerinin, eklenen fazla yakıt miktarıyla karşılanarak, reaktörde zincirleme fisyon reaksiyonunun devamını sağlamaktır.

Kritik kütle, nükleer yakıt, reaktör malzemeleri ve bunların kalpteki yerleştirilme şekillerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla reaktörlerde kalp değişiminden sonra kritik kütle ve buna bağlı olarak reaktivite değişir.

Reaktöre kritik kütleden daha fazla yakıt yüklenmesiyle oluşturulan fazla reaktivite (excess reactivity) reaktör kalbine kontrol çubuğu sokulmasıyla karşılanır.

Bir reaktörün toplam reaktivitesi, kontrol çubuklarının bu değeri karşılayabileceği reaktiviteden önemli bir miktarda az olmalıdır.

Bu sebeplerle bir nükleer reaktörde kontrol çubuğu kalibrasyonu, yakıt yanmasının etkileri, kalp değişikliği, ve yakıt yüklenmesinden dolayı belirli aralıklarla yapılmalıdır.

BÖLÜM. 2

KONTROL ÇUBUĞU KALİBRASYONUNDA KULLANILAN METOTLARIN TANITILMASI

Bir araştırma reaktörünün etkili ve güvenli çalışmasının birçok safhası, reaktivitenin doğru ölçümüne bağlıdır. Reaktivite ölçümleriyle elde edilen bilgiler genellikle reaktörü kapatma sistemlerinin yeterliliğinin saptanmasında, reaktöre dahil edilen reaktivitenin bulunmasında, sıcaklık ve zehirlenme katsayılarının hesaplanmasında kullanılır.

Reaktör işletmeciliğinde, bir reaktör kalbini farklı güç seviyelerinde kritikliğe getirmek ve gerektiği zaman reaktörü kapatmak için genellikle kontrol çubuklarının kullanımı tercih edilir.

Kontrol çubuğu kalibrasyonu, reaktörlerde reaktivite değişiminin çubuk durumlarına göre belirtilmesini ifade eder. Çubukların reaktivite değerlerini, pozisyonlarının bir fonksiyonu olarak gösteren çubuk kalibrasyon eğrilerinin çizilmesi reaktörün güvenli işletilmesi için gereklidir. Kritik çubuk pozisyonları bilinirse, kalibrasyon eğrileri, reaktördeki reaktiviteyi saptamakta kullanılabilir. Aynı zamanda bu eğriler deneysel çalışmalar için gerekli olabilir. Verilen bir periyodu sağlamak için gerekli çubuk hareketinin miktarının saptanması istendiğinde, bu eğrilerden faydalanılır.

Kontrol çubuğu kalibrasyonuna uygulanabilecek çeşitli reaktivite ölçme metodları vardır. Bunlar aşağıda belirtildiği şekilde sıralanabilir.

- 1- Pozitif periyod metodu
- 2- Çubuk düşürme metodu
- 3- kaynak çekme metodu
- 4- Çubuk salınma metodu
- 5- Rossi alpha ve ortalamaya göre değişim metodları
- 6- Nötron darbesi metodu
- 7- Yakıt yerine zehir koyma metodu

2.1. Pozitif Peryod Metodu

Bu metod reaktivitenin bir adım girişinden sonra, reaktör periyodunun veya reaktör gücünün iki kat olma zamanının, nötron yoğunluğundaki exponansiyel artışın ölçülmesinden yararlanılarak bulunması prensibine dayanır. Adım reaktivite girildikten sonra, nötron yoğunluğu, kısa bir ani sıçramadan sonra verilen reaktivite değeriyle tayin edilen sabit bir periyod ile exponansiyel olarak artacaktır. Nötron yoğunluğunun zamanla değişimini gösteren eğriden periyod kolaylıkla bulunabilir. Veya çıkılan gücün iki kat olma zamanının hesaplanmasıyla periyod bulunabilir.

Deney sonucunda elde edilen bilgilerle reaktörün yönetimi ve güvenli işletilmesi için önemli verileri veren kontrol çubuk kalibrasyon eğrileri bulunur. Diferansiyel ve integral kalibrasyon eğrileri bir kontrol çubuğunun sokulduğu mesafeye karşılık gelen reaktivite değerinin ölçülmesiyle saptanır.

Pozitif periyod metodunda kalibrasyonu yapılacak kontrol çubuğu kritik pozisyondan bir miktar çekildiğinde, çekilen uzunluğun yerini tutan pozitif bir reaktivite, yaklaşık olarak adım şeklinde reaktöre eklenir. Ani nötronlara bağlı bir geçici rejim hareketinden sonra reaktör gücü, eklenen pozitif reaktiviteye karşılık gelen kararlı bir reaktör periyodu ile exponansiyel olarak artar. Sonuçta oluşan periyod ölçülüp, bu periyoda karşılık gelen adım reaktivite (2.1.1) denklemiyle ifade edilen inhour eşitliği ile bulunur. [3]

$$\rho = \frac{\ell}{T.k} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i.T} \quad (2.1.1)$$

Bu metodda reaktör alçak bir güç seviyesinde kritik yapılarak deney yapılır. Yüksek bir güç seviyesi, gücün artması nedeniyle yükselen sıcaklığın reaktiviteyi değiştirmesinden dolayı ve ayrıca deney sırasında pozitif periyod verilmesiyle gücün iki kat olma zamanının bulunmasında, çıkılan güç seviyesinin, reaktörün en üst güç seviyesini aşabilecek bir değere gelebilmesi nedeniyle sakıncalıdır.

Birbirini izleyen peryod ölçümleri arasında, gecikmiş nötron öncülerinin dengeye ulaşmasına olanak verebilecek kadar uzun bir süre olmalıdır. Bu durum, reaktörün kritiklikte belli bir süre tutulmasıyla sağlanır. Hafif sulu veya grafit reaktörler için 5-10 dakika uygundur. Ağır sulu reaktörler için bu süre daha uzun olmalıdır. [3]

iki kat olma zamanının ölçümü için uygun güç kademesi, bekleme zamanı ve güç artışına bağlı olarak reaktör sıcaklığının artışı göz önüne alınarak seçilmelidir. Bekleme zamanı, ani nötronlara bağlı geçici rejim etkilerinin ihmal edilir olmaya başladığı zamandan sonra ölçülmeye başlanmalıdır. Uygun ölçüm için uzun bekleme zamanı tercih edilir. Diğer taraftan oldukça uzun bekleme zamanı güç artışına bağlı reaktör sıcaklık artışına sebep olur. Bu da ölçme hatalarının meydana gelmesine olanak verir. Bu nedenle ölçüm için güç kademesi, bu iki şart göz önüne alınarak seçilmelidir.

Reaktör kalbinde kontrol çubuklarının pozisyonları değiştiğinde, nötron akı dağılımı da değişir. Bulunduğu konum değiştirilmese bile bir kontrol çubuğunun değeri, diğer kontrol çubuklarının pozisyonlarının değiştirilmesinden dolayı değişir. Çubukların birbiri üzerlerine yaptıkları gölge tesiri, kalibrasyonu yapılan çubuğun kalp içindeki durumuna bağlı olarak değişecektir. Bu şekilde kontrol çubuğunun çeşitli konumlarına karşılık gelen reaktivite değerleri arasında bir süreksizlik olacaktır.

Kalibrasyonu yapılan çubuğun konumuna karşılık, reaktörü tekrar kritikliğe getirmek için diğer çubukların karşılama sayısının az olması, gölgeleme sayısının da az olmasını sağlar. Yani çizilecek eğri için alınacak nokta ne kadar az ise gölgeleme sayısı ve etkisi o kadar az olur. Diğer taraftan bir kontrol çubuğunun kalibrasyonu yapılırken, reaktörü tekrar kritikliğe getirmek için çekilen diğer kontrol çubuklarının seviyeleri de birbirlerinin aynı olmalıdır.

Bu metot'ta kontrol çubuğunun küçük bir miktar çekilmesiyle oluşturulan küçük peryodlarla reaktivite hesaplanmakta olup, küçük reaktivite değişimlerine karşı daha hassas bir ölçüm yapmak mümkün olabilmektedir. Bu nedenle pozitif peryod metodu ile çubuk kalibrasyonu diğer metotlara göre daha hassas bir teknik durumundadır.

2.2. Çubuk Düşürme Metodu

Reaktöre negatif reaktivite ithal etmek suretiyle kontrol çubuğu kalibrasyonu tayininde kullanılan tekniklerden biri çubuk düşürme metodudur. Bu deneyin veri analizi bir geçici rejim sırasında akı zaman eğrisinin belirlenmesini gerektirir.

Çubuk düşürme ölçümleri, ölçülecek negatif reaktivitenin, gecikmiş nötron gruplarının bozunum zamanlarına kıyasla kısa bir zamanda sokulabildiği durumlarda uygulanabilir. Kritik bir reaktöre aniden negatif bir reaktivite sokulur ve onun büyüklüğü uygun bir dedektörün geçici rejim sırasındaki ölçümünden anlaşılır.

Çubuk düşürme metodu öncelikle 1 dolardan daha büyük çubuk değerlerinde doğru ve tutarlı sonuçlar elde etmek için dedektörün uygun yerleşimini gerektirir.

Kritik bir reaktöre bir kontrol çubuğu tamamen veya seri adımlarla indirilir ve bu sırada meydana gelen ani atlama geçici rejim davranışı gözlenerek reaktivite saptanır. Bir adım negatif reaktivite girişi oluşturacak olan pratik ani çubuk giriş zamanı 0.2 saniye civarında olmalıdır. Böylece ani atlama rejimi reaktivite girişi sırasında olur. Bu süre içinde gecikmiş nötron kaynağının hala değişmediği göz önüne alınarak nötron akı genliği bulunabilir.

Kritik bir reaktörde bir kontrol çubuğunun düşürülmesiyle çoğaltma katsayısında δk kadar ani bir düşmeyle birlikte nötron yoğunluğu (2.2.1) eşitliğine göre azalmaya başlar. [3]

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{1}{1 + (\delta k / \beta)} \quad (2.2.1)$$

Bu ilişki yerden bağımsız kinetik eşitliklerinin çözümünden çıkar. Daha sonra nötron yoğunluğu gecikmiş nötron öncü grup bozunumuna bağlı olarak bozunur ve en sonunda en büyük gecikmiş nötron periyoduna ulaşır. Bu metotta çubuğun ani girişinden evvel nötron seviyesi n_0 kaydedilir.

Nötron yoğunluğu çubuk düşürme esnasında ve çubuk düştükten sonra belli bir müddet kaydedilir. Zamana göre nötron yoğunluğunu veren eğride üç bağımsız zaman aralığı bulunur.

- 1- Kararlı durumdaki nötron yoğunluğu
- 2- Nötron yoğunluğunun nı seviyesine ulaşmasına kadar geçen geçici rejim aralığı
- 3- Gecikmiş nötronların bozunumu

Negatif reaktivite girişinin adım olarak yapıldığı idaal şartlarda geçici rejim aralığı yeteri derece kısa olduğundan nı değeri kolaylıkla saptanır. Ama pratikte durum böyle değildir. Çünkü dedektör, çubuk hareketi nedeniyle geçici rejim hareketlerini yansıtacaktır. Bu nedenle geçici nötron bozunumunun izi kullanılmalı ve düşme anında extrapolasyon yapılmalıdır. Bu extrapolasyon gecikmiş nötron sabitleri kullanılarak matematiksel olarak yapılabilir. Reaktivite tayini için grafiksel extrapolasyon da yapmak mümkündür.

Belirli bir güç seviyesinde çalışan bir reaktörün kontrol çubuğunu düşürerek, reaktöre aniden negatif bir reaktivite verelim. Çubuk düşürmeden önce var olan denge şartları için harici kaynağı olmayan ve $k_0=1$ olan durum için aşağıdaki kinetik eşitlikleri yazılabilir. [4]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_0 - 1}{\ell} n_0 + \sum_i \lambda_i \cdot C_{i0} = 0 \quad (2.2.2)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\sum \tau_i \beta_i \cdot n_0}{\ell} - \sum_i \lambda_i \cdot C_{i0} = 0 \quad (2.2.3)$$

Kinetik denklemlerinin sürekli rejimdeki çözümünden, n_0 aşağıdaki gibi bulunur.

$$n_0 = \frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_{i0}}{1 - k_0} = \frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_{i0}}{\sum_i \tau_i \beta_i}$$

Burada $\tau.\beta_i$, gecikmiş nötronlarla birlikte ortamda bulunan fotonötronlara bağlı toplam etkin gecikme kesrini ifade eder.

Çubuk düştükten birkaç ani nötron ömrü içinde, $k_{p1} < k_{p0}$ olup, sistem başlangıçta sadece ani nötronlar tarafından belirlenen daha alçak bir nötron seviyesine iner. Bu durum, gecikmiş nötron bozunumuyla sistemin bu yarı kararlı halden uzaklaşmasına kadar devam eder. Bu yarı kararlı halde bir müddet sabit kalan sistemde i . grup gecikmiş nötron öncü yoğunluğu C_{i0} hala değişmeden kalır ve bu durumda $dn/dt = 0$ olur. Bu nedenle çubuk düştükten sonraki nötron akı yoğunluğu n_1 'in değeri;

$$n_1 \approx \frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_{i0}}{1 - k_{p1}} \quad \text{dır.}$$

Çubuk düştükten sonraki ve düşmeden önceki nötron akı yoğunlukları oranı ise;

$$\frac{n_1}{n_0} \approx \frac{\frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_i}{1 - k_{p1}}}{\frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_i}{1 - k_{p0}}} \approx \frac{1 - k_{p0}}{1 - k_{p1}} \quad \text{bulunur.}$$

Veya;

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{\frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_i}{1 - k_{p1}}}{\frac{\ell \cdot \sum_i \lambda_i \cdot C_i}{\tau \cdot \beta}} = \frac{\tau \cdot \beta}{1 - k_{p1}}$$

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{\tau \cdot \beta}{1 - k_1(1 - \tau \cdot \beta)} = \frac{\tau \cdot \beta}{1 - k_1 + k_1 \cdot \tau \cdot \beta}$$

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{1}{\frac{1}{\tau \cdot \beta} - \frac{k_1}{\tau \cdot \beta} + k_1} = \frac{\frac{1}{k_1}}{\frac{1}{\tau \cdot \beta \cdot k_1} - \frac{1}{\tau \cdot \beta} + 1}$$

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{\frac{1}{k_1}}{1 + \frac{1}{\tau \cdot \beta} \left(\frac{1}{k_1} - 1 \right)} = \frac{\frac{1}{k_1}}{1 + \frac{1}{\tau \cdot \beta} \left(\frac{1 - k_1}{k_1} \right)}$$

Yaklaşık olarak $1 / k_1 = 1$ ve $1 - k_1 = \delta k$ olarak alınırsa aşağıdaki ifade bulunur.

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{1}{1 + \frac{\delta k}{k_1 \cdot \tau \cdot \beta}} = \frac{1}{1} + \frac{1}{\frac{\delta k}{k_1 \cdot \tau \cdot \beta}}$$

$$\frac{n_1}{n_0} = 1 + \frac{k_1 \cdot \tau \cdot \beta}{\delta k}$$

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{\delta k}{k_1 \cdot \tau \cdot \beta}$$

$$\frac{n_0}{n_1} - 1 = \frac{\delta k}{k_1 \cdot \tau \cdot \beta}$$

Bu şekilde dolar olarak çubuk düşürmeye karşılık gelen reaktivite değeri gözlenen güç oranından doğrudan bulunabilir.

$$\text{Dolar olarak reaktivite değeri} = \frac{\delta k}{k_1 \cdot \tau \cdot \beta} = \frac{n_0}{n_1} - 1 \quad (2.2.4)$$

Çubuk düştükten sonraki nötron seviyesi n_1 , düşmeyi izleyen nötron bozunum eğrisinden geri extraplasyonla saptanabilir.

Çubuk düşürme metodu reaktörün altkriticlik derecesini saptamakta da kullanılabilir. [5]

$$\frac{\beta_0}{\beta} = \frac{n_0}{n_2} \frac{\beta_1}{\beta}$$

Adım reaktivite girişiyle, n_0 başlangıç akı seviyesi, ani olarak n_1 seviyesine düşer. Ani sıçramadan sonra nötron akısı en son akı seviyesi n_2 'ye yaklaşır. Bu yöntemdeki problem, geçici nötron akı seviyesi n_1 'in doğru olarak saptanmasının zorluğudur.

Reaktivite ölçümleri ile ilgili olarak kullanılan çubuk düşürme metodu, aynı zamanda ele alınan bir reaktörde yeterli bir toparlanma zamanından sonra, fotonötronların efektif katkılarını ölçmek için deneysel bir teknik sağlar. Çubuk düşürme deneyinde reaktivite ansızın sabit bir değere düşürülür. Gecikmiş nötronların ve fotonötronların bozunumu, güç seviyesindeki ani düşmeyi takiben $(n_0 - n_1) / n_1$ bağıntısına göre gözlenir. Analog metod olan güç düşürme metodunda ise, aynı negatif reaktivite adımına bağlı olarak, aynı $(n_0 - n_1) / n_1$ bağıntısına göre güç seviyesi tekrar düşürülür. Fakat bu durumda güç seviyesi, negatif reaktivitenin uygun azalımıyla alçak bir seviyede sabit tutulur.

Özet olarak çubuk düşürme durumunda en son reaktivite sabit tutulup nötron seviyesinin eksponansiyel bozunumu gözlenirken, güç düşürme metodunda en son güç seviyesi sabit tutulup altkritik reaktivitenin eksponansiyel bozunumu gözlenir.

Güç düşürme metodunda no başlangıç seviyesinden n_1 seviyesine inilmesini takiben, $dn / dt = 0$ eşitliğini sağlamak üzere reaktivite ayarlanır. (2.2.2) bağıntısından aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{k_p - 1}{\ell} n_1 = - \sum_i \lambda_i . C_i \quad (2.2.5)$$

i.grup öncü konsantrasyonu, başlangıç no seviyesinde C_{i0} ve en son n_1 seviyesinde C_{i1} olacak şekilde eksponansiyel olarak aşağıdaki şekilde bozunur.

$$C_i(t) = (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i . t} + C_{i1} \quad (2.2.6)$$

$$k_p - 1 = \delta k - k . \beta \quad (2.2.7)$$

(2.2.6) ve (2.2.7) ifadeleri (2.2.5) eşitliğinde yerine konursa;

$$\frac{\delta k - k . \beta}{\ell} n_1 = - \sum_i \lambda_i . C_{i1} - \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i . t} \quad (2.2.8)$$

Başlangıç ve en son denge şartları için (2.2.3) bağıntısından aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\frac{n_0 . \beta}{\ell} \approx \sum_i \lambda_i . C_{i0} \quad (2.2.9)$$

$$\frac{n_1 \cdot \beta}{\ell} \approx \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} \quad (2.2.10)$$

$$\frac{\delta k}{\ell} n_1 - \frac{k \cdot \beta}{\ell} n_1 = - \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} - \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t}$$

$$\frac{k \cdot n_1 \cdot \beta}{\ell} \left(\frac{\delta k}{k \cdot \beta} - 1 \right) = - \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} - \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t} \quad (2.2.11)$$

(2.2.10) ifadesi (2.2.11)' da yerine konursa;

$$\sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} \left(\frac{\delta k}{k \cdot \beta} - 1 \right) \approx - \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} - \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t}$$

$$\frac{\delta k}{k \cdot \beta} \approx \frac{1}{\sum_i \lambda_i \cdot C_{i1}} \left(- \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} - \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t} \right) + 1$$

$$\frac{-\delta k}{k \cdot \beta} \approx \frac{\sum_i \lambda_i \cdot C_{i1} + \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t} - \sum_i \lambda_i \cdot C_{i1}}{\sum_i \lambda_i \cdot C_{i1}}$$

$$\frac{-\delta k}{k \cdot \beta} \approx \frac{1}{\sum_i \lambda_i \cdot C_{i1}} \sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i \cdot t}$$

$$\text{Altkritiklik } (\$) \approx \frac{n_0 - n_1}{n_1} = \frac{\sum_i \lambda_i (C_{i0} - C_{i1}) e^{-\lambda_i t}}{\sum_i \lambda_i C_{i1}} \quad (2.2.12)$$

(2.2.12) eşitliği beklenen başlangıç altkritikliğini gösterir.

Çubuk düşürme deneylerinin yerine getirilmesi, alçak seviye n_1 'de uygun hassasiyet için, hassas bir nötron sayım dedektörünü ve reaktivite ayarlamakta kullanılan kontrol çubuklarının dikkatli kalibrasyonunu gerektirir. Her iki metotta da gözlenen bozunum eğrilerinden, prensip olarak bileşimde bulunan gecikmiş nötron ve fotonötron grup sabitleri analiz edilebilir.

Çubuk düşürme metodunun uygulanmasında, dedektörün akının uzaysal dağılımında bir değişiklik algılamadığı şartlarda, yerden bağımsız kinetik eşitlikleri geçerlidir. Bundan çıkan sonuç, dedektörün, akıdaki değişiminin negatif reaktivite girişiyle meydana gelen uzaysal değişikliklere değil, çoğaltma katsayısındaki değişikliklere bağlı olduğu bir yere konması gerektiğidir.

2.3. Kaynak Çekme Metodu

Bu metot reaktöre negatif reaktivite verilmek suretiyle kontrol çubuğu kalibrasyonunu sağlayan bir teknik durumundadır.

Altkritik bir reaktörde nötron kaynak değerinin ani bir değişiminden sonra, nötron yoğunluğundaki değişim gözlenir. Harici kaynağı olan altkritik bir reaktörde nötronlar kaynaktan çoğalırlar. Nötron yoğunluğu, kaynak şiddetiyle orantılı bir değere ulaşacak şekilde çoğalırken, altkritik ortamın çoğaltma katsayısındaki değişim (δk) ile ters orantılı olarak değişir. Nötron kaynak yoğunluğu değiştiği zaman, ortamın nötron yoğunluğu yeni bir değere ulaşır. Nötron yoğunluğundaki değişim miktarı, sistemin δk değerine bağlıdır.

Kaynak çekme metodunda, içinde nötron kaynağı bulunan alt kritik bir reaktörden kaynak aniden kaldırılır ve dedektörün geçici cevabı negatif reaktivitenin ölçüsünü verir.

Bu metod çubuk düşürme metodunda olduğu gibi verilen negatif reaktivitenin ardındaki ani sıçramayı takip eden nötron akı seviyesinin gözlenmesine dayanır. Her iki metotta da reaktivite saptamak için kullanılan formüller aynıdır. Tek fark nötron akı değişiminin işaretidir.

Harici bir kaynağı bulunan alt kritik bir reaktörden kaynağın aniden kaldırıldığını düşünelim. Kaynak çekilmeden önceki denge şartları için kinetik eşitlikleri şu şekilde yazılabilir. [4]

$$\frac{dn_0}{dt} = \frac{k_{p0} - 1}{\ell} n_0 + \sum \lambda_i \tau_i C_{i0} + S = 0 \quad (2.3.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i k_0 n_0}{\ell} - \lambda_i C_{i0} = 0 \quad (2.3.2)$$

(2.3.1) denkleminde n_0 çekilirse;

$$n_0 = \frac{\ell (\sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0} + S)}{1 - k_{p0}} \quad \text{elde edilir. (2.3.3)}$$

Kaynak kaldırıldıktan bir kaç ani nötron ömrü içinde sistem gecikmiş nötron şiddetinin artmasıyla, daha alçak bir n_1 nötron seviyesine gelecektir. Bunun değeri;

$$n_1 = \frac{\ell \cdot \sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_i}{1 - k_{p0}} \quad \text{olacaktır. (2.3.4)}$$

Başlangıçtaki nötron seviyesi n_0 'in, en son denge seviyesi olan n_1 ' oranı;

$$\frac{n_0}{n_1} = \frac{\frac{\ell (\sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0} + S)}{1 - k_{p0}}}{\frac{\sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0}}{1 - k_{p0}}}$$

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{S}{\sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0}} \quad \text{bulunur. (2.3.5)}$$

M_T kaynak çoğaltma katsayısı olup, her kaynak nötronu başına meydana gelen nötronların sayısıdır ve S kaynağı ve tüm oluşan fisyon üretimlerindeki toplam nötron sayılarının kaynak şiddetine bölünmesi ile ifade edilir.

$$M_T = \frac{S + S_k + S_k^2 + \dots}{S} = \frac{1}{1 - k}, \quad k < 1$$

Çoğaltma katsayısı olan k , 1'e yaklaşıırken M_r değeri $(1 - k)^{-1}$ 'e yaklaşır.

Başlangıçtaki kaynak çoğaltma katsayısı M_0 'ın değeri;

$$M_0 = (1 - k_0)^{-1} = (\delta k_0)^{-1} \text{ olur.}$$

Denge durumunda kaynak şiddetindeki çoğalma, nötronların yok olma derecesine eşittir.

$$M_{0s} = \frac{S}{1 - k_0} = \frac{n_0}{\ell} \quad (2.3.6)$$

$$\frac{S}{1 - k_0} = \text{Kaynak şiddetindeki çoğalma}$$

$$\frac{n_0}{\ell} = \text{Nötron azalma derecesi}$$

(2.3.6) denkleminde S çekilirse;

$$S = \frac{1 - k_0}{\ell} \cdot n_0 \text{ bulunur.} \quad (2.3.7)$$

Öncü grup yoğunlukları olan C_{i0} 'in değerleri öncü grupların oluşma oranlarının denge şartlarından saptanır. Bozunma ;

$$\frac{n_0 \cdot k_0 \cdot \tau \cdot \beta}{\ell} = \sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0} \text{ olmalıdır.} \quad (2.3.8)$$

(2.3.7) ifadesi, (2.3.5) denkleminde yerine konursa;

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{\frac{1 - k_0}{\ell} \cdot n_0}{\sum \tau_i \cdot \lambda_i \cdot C_{i0}} \quad \text{bulunur. (2.3.9)}$$

(2.3.8) eşitliğini (2.3.9)' da yerine yerleştirirsek;

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{\frac{1 - k_0}{\ell} \cdot n_0}{\frac{n_0 \cdot k_0 \cdot \tau \cdot \beta}{\ell}} \quad \text{elde edilir.}$$

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{1 - k_0}{k_0 \cdot \tau \cdot \beta}$$

Alt kritik durumda reaktivite değeri;

$$\rho = \frac{1 - k_0}{k_0} \quad \text{olduğundan son denklem aşağıdaki şekli alır.}$$

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 + \frac{\rho}{\tau \cdot \beta}$$

$$\frac{\rho}{\tau \cdot \beta} = \frac{n_0}{n_1} - 1$$

$$\frac{\rho}{\tau \cdot \beta} = \frac{n_0 - n_1}{n_1} \quad (2.3.10)$$

n_1 kaynak çekildikten hemen sonraki negatif ani sıçramanın ardındaki nötron yoğunluğudur. Genellikle ölçülen dedektör cevabının sıfır anına extrapole yapılmasıyla bulunur.

$$\frac{\rho}{\tau \cdot \beta} = \text{Dolar olarak reaktivite}$$

Böylece sistemin dolar cinsinden altkritiklik derecesi olarak reaktivite, kaynak çekmeye bağlı olarak nötron seviyesinde gözlenen oransal değişiklikle bulunabilir.

Kaynak çekme metodunda dedektör kaynak mesafesi akının uzaysal dağılımının sadece temel mod olmasını sağlamaya yetecek kadar büyük olmalıdır.

2.4. Çubuk Salınma Metodu

Çubuk salınma metodu, reaktivitenin herhangi bir periyodik salınımı sonucunda güç seviyesindeki salınım miktarını ölçen ve bununla reaktivite salınım büyüklüğü arasında bağlantı kuran bir tekniktir.

Bu metotta kontrol çubuk salınımından meydana gelen reaktör güç seviyesindeki salınım ölçülür ve δk ile ilişki kurulur. Nötron yoğunluğu n ve nötron yoğunluğunun salınım büyüklüğü δn olarak ifade edilirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir. [4]

$$\frac{\delta n}{n} = W(j\omega) \cdot \frac{\delta k}{\beta} \quad (2.4.1)$$

$W(j\omega)$ = Reaktör transfer fonksiyonu

$$\frac{\delta k}{\beta} = \text{Reaktivite salınım büyüklüğü } (\$)$$

Bir reaktörün dinamik davranışı, reaktivite veya harici nötron kaynaklarının meydana getirdiği küçük periyodik düzensizliklere karşı olan cevabı ile açıklanır. Bu cevap, reaktör transfer fonksiyonu olarak adlandırılır. Enstrümantasyon ve analiz kolaylığı için etkili reaktivite değişimleri sinüzoidal yapılır ve reaktörün dinamik davranışı, reaktör gücünün sonuçta meydana gelen sinüzoidal değişiminin genlik ve fazıyla yani reaktör transfer fonksiyonu ile açıklanır. Bu transfer fonksiyonu daha sonra, reaktör gücünün kontrolünde kullanılacak uygun servokontrol sistemlerinin dizaynında kullanılabilir.

$$W(j\omega) = \frac{\tau \cdot \beta}{j\omega[\ell + \tau \cdot \beta \sum_i a_i / (j\omega + \lambda_i)]}$$

$$a_i = \frac{\tau_i \cdot \beta_i}{\tau \cdot \beta}$$

$$j = (-1)^{1/2}$$

$W(j\omega)$ değeri, $k = 1$ durumunda dolar biriminde etkili reaktör titreşim genliğidir.

ω (rad/s.) terimi ise reaktivite titreşim frekansını ifade eder.

$W(j\omega)$ büyüklüğü ve onun faz açısı, farklı ani nötron ömürlerinde, her bir ayrı izotop için, açısal frekans ω 'nın bir fonksiyonu olarak hesap edilip, grafikler halinde çizilir.

$W(j\omega)$ değeri, reaktör parametrelerinin bilinmesi halinde reaktör kinetik eşitliklerinden hesaplanabilir veya bilinen küçük büyüklükteki reaktivite salınımlarına karşılık frekans cevabının ölçülmesiyle deneysel olarak saptanabilir. $W(j\omega)$, $\omega \gg \beta/\ell$ olduğu yüksek frekanslarda daha basit bir forma indirilebilir.

$$W(j\omega) \approx \frac{\delta n}{n} \cdot \frac{\beta}{\delta k} = \frac{\beta}{\omega \cdot \ell}$$

Bu ifadeden δk çekilirse;

$$\delta k = \omega \cdot \ell \frac{\delta n}{n} \quad \text{bulunur.}$$

Ani nötron ömrü teorik hesaplamalarla veya benzer frekans cevap ölçümlerinden saptanabilir. Böylece bilinen bir frekansta $\delta n/n$ ölçülerek buna bağlı olarak δk değeri bulunabilir. Çubuk salınma metodunda reaktivite büyüklüğü δk ve oransal güç salınımı arasındaki ilişki genellikle deneysel olarak bulunur.

2.5. Rossi Alpha Ve Ortalamaya Göre Değişim Metodu

Bu metotta reaktivitenin bulunması için ani nötron bozunum sabiti α kullanılır. [4]

Karakteristik bozunum sabiti α , iki metotla ölçülebilir. Birinci metot, $t = 0$ 'da bir bombardıman veya darbe olarak kütleye giren nötronların sayısal büyüklüğünün, eş zamanlı bozunumunun gözlenmesi ile α 'nın saptandığı, nötron darbesi tekniğini karakterize eder. İkinci metotta ise bir dizideki ayrı ayrı zincirlerin bozunumu gözlenir ve güvenilir bir α ölçümü sağlamak için zincirlemenin sayısının yeterli miktarda gözlenmesine kadar bu işleme devam edilir. Bu metod Rossi- α ve ortalamaya göre değişim metodu adını alır.

Ani nötron bozunum sabiti α , oldukça kullanışlı ve faydalı bir parametre olup temel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\alpha = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{k_p - 1}{\ell} \quad (2.5.1)$$

$$k_p = k(1 - \tau \cdot \beta)$$

$k_p < 1$ durumundaki ani kritiklikte, çoğaltıcı ortama giren nötronlar aşağıdaki gibi bozunurlar.

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\alpha \cdot t} = n_0 \cdot \exp \left(\frac{k_p - 1}{\ell} \right) \cdot t \quad (2.5.2)$$

Reaktör kinetik eşitliklerinin uygulanmasında, (2.5.2) eşitliği nötron fisyon zincirlerinin sayısal büyüklüğünün değişimini ifade eder.

Rossi α tekniğinde, çabuk cevap veren hassas bir nötron dedektörü ve ani nötron yoğunluğunun zamana göre bozunumunu göstermek için bir analizör (Time analyzer with short time channels) kullanılır.

Bu teknik alçak güçte, kütledeki bir zincir reaksiyonunda gözlenen dedektör sayımlarının zamana göre bağımlılığını ifade eder. $t = 0$ anında bir nötron sayımının ortaya çıkmasını takip eden t ve $(t + dt)$ zaman aralığı içinde, bir nötronun dedekte edilme olasılığını ortaya koyar. Herhangi bir anda alçak güçte kütle, yalnızca bir kaç ani nötron zincirini ihtiva eder. Bu durumda hassas bir dedektör aynı zincirden iki veya daha fazla nötronu dedekte edebilir. Örneğin $t = 0$ anında, verilen bir zincirin bir nötron sayımından sonra, sayıcının daha sonraki bir zamanda bir diğer zincirden rastgele bir nötron veya $t = 0$ 'daki ilk sayımda üretilen aynı zincirden, zincirle ilgili bir nötronu dedekte edeceği ihtimali şüphesiz vardır. Rastgele bir nötron dedekte etme ihtimalini $C \cdot dt$ olarak gösterelim. C , ortalama sayım oranı, dt ise gözlenen sayım aralığıdır.

Eşitlik (2.5.2), bir fisyon zincir reaktöründe nötron yoğunluğunun ortalama $e - \alpha \cdot t$ olarak azalmasını ifade eder. Böylece zincirle ilgili bir nötronun dedekte edilme olasılığının azalmasını $e - \alpha \cdot t$ olarak bekleyebiliriz. $t = 0$ anında, dedekte edilmiş bir nötrondan sonra, t ve $t + dt$ zaman aralığı içinde bir nötronun dedekte edilmesinin toplam ihtimali aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P(t) = C \cdot dt + Q \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot dt \quad (2.5.3)$$

Burada Q katsayısı, $e - \alpha \cdot t$ ifadesinin düzeltilmesi için kullanılan bir değerdir.

Rossi alfa deneylerinde (2.5.3) ifadesi bir analiz sistemi ile ölçülür. Rastgele sayım hızı $C \cdot dt$ 'nin çıkartılması ile tek üstel terim $Q \cdot e^{-\alpha \cdot t}$ kalır. Bundan da istenen zincir bağlantılı ani nötron bozunum sabiti α ister grafik metodla ister en küçük kareler metodu ile bilgisayarda kolayca bulunabilir.

Ölçümlerin hemen hepsi uygun bir kontrol parametresi veya reaktivite ile α' nın genel olarak doğrusallığını gösteren birer delil niteliğindedir. Ani nötron bozunum sabiti α' nın tanımından dolayı reaktivite değeri doğrudan bulunabilir. α , dolar cinsinden reaktiviteye basit bir ifadeyle bağlıdır.

$$\alpha = \alpha_{DC} \cdot (1 - \beta) \quad (2.5.4)$$

α_{gc} , gecikmiş kritiklikte α 'nın değeridir. Gecikmiş kritiklik, reaktivitenin sıfır olduğu durumdaki kritikliktir. Gecikmiş kritiklikte veya herhangi bir reaktivitede dolar cinsinden reaktivite değeri tek bir α ölçümüyle bulunabilir. Hassas reaktivite kalibrasyonunda, Rossi- α ölçümlerinin, yalnızca gecikmiş kritiklik değil, fakat aynı zamanda üst kritik durumu da kapsamına alması istenir. Bununla birlikte bunun mümkün olmadığı durumlarda, bazı uygun kontrol parametrelerinin bir fonksiyonu olarak α ölçülebilir.

Gecikmiş kritiklik veya bilinen diğer bir reaktivite noktasının bağımsız olarak saptandığı varsayılırsa, reaktivite skalası $\alpha = 0$ 'daki ani kritikliğe lineer extropolasyonla bulunabilir. Ancak α tam olarak reaktivite ile lineer değildir. Buna sebep ömrün ve etkin gecikme kesirlerinin, reaktör şeklindeki değişim ile değişmesidir. Relatif yakalama (Relative capture) ve fisyon olaylarındaki değişim ve herhangi bir reaktivite değişimi oluşturabilecek kaçak oranlarındaki değişim örnek gösterilebilir. Bununla birlikte α , reaktivitenin bulunmasında uygun bir yöntem sağlar.

Rossi- α tekniğiyle yakından ilgili bir metod olan ortalamaya göre değişim veya Feynman metodunda, kararlaştırılmış bir sayım zaman aralığı içinde nötron sayımlarının değişimi veya istatistiksel olarak değişimi gözlenir. Rossi- α tekniği gibi zincir reaksiyonlu sistemlerde nötron seviyesinin değişiminin genel teoriksel ifadesinden ortaya çıkar.

Eğer sabit güçte veya harici bir kaynağı olan altkritik durumda, çoğaltkan bir sistemde, verilen bir Δt zaman aralığında elde edilen sayımların sayısı tekrar tekrar saptanırsa, her aralıktaki sayımların sayısının değişiminin, ortalama sayıma göre oranı bulunabilir.

$$\frac{S^2}{C} = \frac{\overline{S^2} - \overline{C}^2}{\overline{C}} = 1 + Y \quad (2.5.5)$$

S^2 = Her aralıktaki sayımların sayısının değişimi

C = Ortalama sayım

Y değeri, tesadüfi olarak meydana gelen Poisson Değişimleri için sıfır olup, zincir reaksiyonlu sistemde meydana gelen tesadüfi olmayan ilave değişimlerin bir ölçüsüdür.

$$\frac{\overline{C^2} - \overline{C}^2}{\overline{C}} = 1 + \frac{\epsilon (\overline{v_p^2} - \overline{v_p})}{\overline{v_p}^2} \frac{k_p^2}{(1 - k_p)^2} \left(1 + \frac{1 - e^{-\alpha \cdot t}}{\alpha \cdot t} \right)$$

(2.5.6)

ϵ = Sayma etkinliği (Sayım/Fisyon)

v_p = Fisyonunda yayımlanan ani nötronların gerçek sayısı

$\overline{v_p^2} - \overline{v_p}$ = Her fisyonunda yayımlanan ani nötron sayılarının dağılımının uygun ortalaması

Ortalamaya göre değişim metodunda diğer bir yaklaşım, sabit k_p değerleri ile farklı zaman aralıkları için Y' yi ölçmektir. Böylece nümerik eğri uydurma teknikleri ile eşitlik (2.5.6)'dan α bulunur.

İstatistik ve cihaz sınırlamaları nedeniyle, alçak güçte işletilen kritikliğe yakın bir kütlede, yüksek etkinlikli bir dedektörle, t' nin 10 s.'ye kadar olan aralıklarında ölçümü yapıldığında, $t \leq 0.1$ s. sayma aralıkları için ani nötron davranışının hakim olduğu saptanmıştır.

0.1 saniyeden fazla zaman aralıklarında gecikmiş nötronların önemli bir katkı sağladıkları görülmüştür. [4] Bu sebeple gecikmiş nötronların etkileri Y ifadesinde göz önüne alınmalıdır.

Gecikmiş nötronlar dikkate alındığı zaman bir nötron zincirinin ortalama bozunum zamanı, biri ani nötron bozunumu α 'ya diğerleri ise gecikmiş nötron gruplarının herbirine bağlı olarak exponansiyel bir toplam ile ifade edilir.

$$W(s) = \sum_{j=0}^6 \frac{b_j}{s - w_j}$$

$$s = \sqrt{-1} \omega \text{ rad/s.}$$

Alt kritik bir reaktör için ω_j sıfır güç transfer fonksiyonu $W(s)$ 'nin polleridir. $W(s)$ 'nin polleri ifadesi, $W(s)$ 'in s düzleminde analitik olmadığı noktaları belirtir. b_j kısmi kesir açılımında bir katsayıdır. Sıfır güç transfer fonksiyonu esas itibarıyla Inhour Eşitliğinin tersi olduğundan, transfer fonksiyonunun polleri inhour eşitliğinin aynen ω_j kökleridir.

Reaktörün durgun ve geçici peryodları olan ω_{j-1} değerleri hesaplanıp, reaktivitenin bir fonksiyonu olarak çizildiğinde, çok yavaş sistemler hariç ani terim α 'nın, diğer geçici köklerden oldukça uzak olduğu görülmüştür. [4]

Cebirsel olarak en büyük kök olan ω_8 Rossi- α değeridir.

$$\omega_8 \approx - \left(\frac{\beta - \delta k_0}{\ell} \right) \approx \frac{k_p - 1}{\ell} = \alpha$$

2.5. Nötron Darbesi Metodu

Nötron darbesi metodu, çalışan bir ortama verilen nötronların, bir darbesini veya patlamasını takip eden nötron yoğunluğunun geçici rejim davranışının gözlenmesinden ibarettir. Çoğalan veya çoğalmayan ortamda yapılan gözlem ve analiz, çalışılan fiziksel özelliklere bağlı olarak değişim derecesini verir.

Bu metotta yüksek yoğunluklu nötron darbe kaynakları için etkili bir alet düzeneği gereklidir. Nötron kaynağı ile birlikte yüksek rezolüsyonlu dedektörler ve çok kanallı zaman analiz sistemleri, ölçümlerin geniş bir aralığı için gerekli bütün donanımı sağlarlar.

Nötron darbesi deneyleri için nötron bombardımanları, parçacık akseleratörleri tarafından üretilir. Elektron lineer akseleratörlerinden fotofisyon nötronları veya pozitif iyon darbe akseleratörlerinden $D(D,n)He^3$ ve $T(D,n)He^4$ nötronları kullanılır.

Nötron darbesi tekniği reaktivite ölçümleri yanında birçok önemli reaktör parametrelerinin incelenmesinde de kullanılır.

Reaktöre bir nötron darbesi gönderilmesi sonucu oluşan nötron akısının bozunum hızı ölçülür. Ölçülen bozunum oranı fisyonundan açığa çıkan ani nötronları ifade eder ve reaktörün ani kritiklikteki reaktivitesiyle orantılıdır. Ölçümler, alt kritik durumlarda ve gecikmiş kritiklikteki reaktör şartlarında yapılır. Gecikmiş kritiklikteki bozunum hızı, nötron akısının bozunum hızı ve dolar biriminde reaktivite arasında bir bağıntı ile gösterilebilir. Nötron akısının bozunum hızı, etkin gecikmiş nötron kesrinin ani nötron ömrü oranına eşittir. [6]

$$\alpha_{DC} = \frac{\alpha_0}{1 - \beta} \quad (2.5.1)$$

$$\alpha_0 = \frac{\beta}{\ell} \quad \text{veya}$$

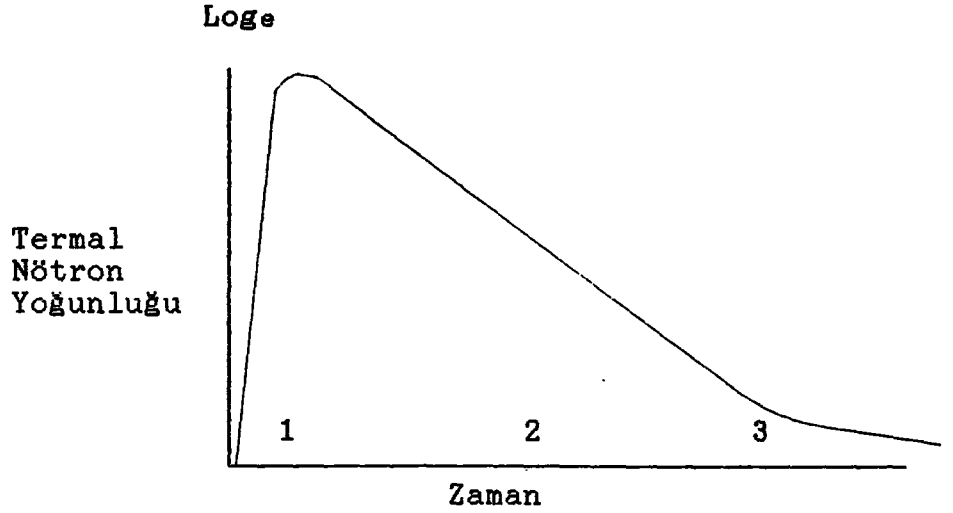
$$\alpha_0 = \frac{\beta}{\Lambda} \quad (2.5.2)$$

Nötron darbe metodunda nötronların bir bombardımanı altkritik çoğaltıcı bir sisteme gönderilir. Zamanın bir fonksiyonu olarak nötron yoğunluğunun bozunumu gözlenir. Nötron termalizasyonu ve daha yüksek akı şeklinin bozunumundan sonra temel bozunum sabiti α_0 ölçülebilir.

Sisteme gönderilen nötronlarla oluşan ve ortama eklenen fisyon zincirleri, nötron akısının aniden artmasına sebep olurlar. Bu fisyon zincirleri sonucunda elde edilen akının azalması, ani periyod hakkında bilgi elde etmek için kullanılır.

Nötron bombardımanı sırasında nötronların tamamı, bir kaç mikro saniye periyodlarla ortama girerler. Hızlı nötronlar kalbin içine yayılıp ilk olarak gidiş yolları üzerindeki atomlarla elastik çarpışmalar yaparak yavaşlarlar. Nötronların termal bölgeye yavaşlamaları için gereken zaman, nötron enerjilerine ve reaktörün yavaşlama enerjisine bağlıdır. Sonuç olarak meydana gelen termal nötron yoğunluğu maksimum bir değere yükselir. Bu yükselme zamanı, kaynak nötronlarının ortalama yavaşlama zamanlarına ve nötron bombardımanının süresine bağlıdır. Bu durum, yalnızca eğer ortamın yavaşlama zamanı difüzyon zamanından yani termal nötron zamanından küçükse doğrudur.

Meydana gelen termal nötronlar kalbin içinde yayılıp sonunda yutulacaklar veya sistemden kaçacaklardır. Bu nötronların yakıt tarafından yutulması fisyonla sebep olacak ve daha hızlı fisyon nötronları üreyecektir. Konu edilen fisyon nötronları ani nötronlardır. Gecikmiş nötronlar deney süresi boyunca, oldukça az bozunum olasılıkları olan kendi öncü gruplarında saklı bulunurlar. Fisyon nötronları bu aşamada kaynak nötronları gibi hareket ederler. Aynı şekilde termalize edilirler ve daha sonra yutulur veya sistemden kaçarlar. Reaktördeki termal nötron yoğunluğu, reaktör alt kritik olduğundan ve sisteme giren gecikmiş nötronların sayıları ihmal edilir olduğundan zamanla azalacaktır. Nötron yoğunluğu exponansiyel olarak bozunacak ve bozunum derecesi ani kritiklikte ölçülen sistemin reaktivitesine bağlı olacaktır.



Şekil-1

Şekil-1 reaktörün içine nötronların bir bombardımanı gönderildikten sonra, nötron yoğunluğunun zaman davranışını açıklar. Birinci bölge kaynak nötronlarının yavaşlaması olarak reaktördeki nötron yoğunluğunu verir.

İlgilenilen esas bölge olan ikinci bölge, sonuçta oluşan nötron yoğunluğunun üstel bozunumudur. Bu bozunum ani nötronlara bağlıdır. Bundan dolayı göz önüne alınan jenerasyon zamanı ani nötron ömrüdür.

Üçüncü bölümde nötron yoğunluğu relatif olarak alçak bir seviyeye ulaşır ve sisteme giren gecikmiş nötronlar, bozunumun gidişini belirlerler. Bu bölgede nötron yoğunluğunun bozunumu ilk olarak gecikmiş nötronların ortalama ömürlerine ve daha sonra da sistemin reaktivitesine bağlıdır. Oysa ikinci bölgede bozunum zamanı bir kaç milisaniye civarındadır ve nötron yoğunluğunun bozunumu exponansiyeldir. [6]

Kaynak nötronlarının uzay, enerji ve açısal dağılımı var olan nötron yoğunluğunun denge halindeki akısından çok farklıdır. Kafi derecede fazla çarpışma sayısından sonra, eklenen fisyonlardan gelen nötronlar, hali hazırda var olan nötron yoğunluğuna yakın bir dağılım ile eklenen akıyı gösterirler. Eklenen akının yavaş yavaş ortadan kalkması aşağıdaki denklemle tanımlanır. [3]

$$\delta\rho(t) = \delta\rho_0 \exp\left(\frac{\beta - \rho_0}{\Lambda} t\right)$$

Nötron ilave edilmesiyle ortama verilen peryod sırasında akı artar. Daha sonra eklenen akı ani peryodun azalmasıyla yavaş yavaş ortadan kalkar. Akının bu artma ve azalımının logaritmik bir kağıda çizilmiş eğrisinden ani peryod (ani nötron bozunum sabiti) bulunur.

α_0 ve reaktivite arasındaki ilişki reaktör kinetik eşitliklerinden bulunabilir. [4]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(k - 1) / k - \tau \cdot \beta}{\Lambda} \cdot n + \sum_i \lambda_i \cdot C_i \quad (2.5.3)$$

$$\Lambda = \frac{\ell}{k} \approx \ell$$

Ani nötron bozunumu ile ilgilendiğimizden gecikmiş nötron öncülerinin dağılımını ihmal edebiliriz.

Birim zamanda nötron yoğunluğunun kesri değişimi olan bozunum sabiti α_0 ' ın genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\alpha_0 = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{\frac{(k - 1)}{k} - \tau \cdot \beta}{\Lambda} \quad (2.5.4)$$

Dolar biriminde reaktivite değeri;

$$\$ = (k - 1) / k \cdot \tau \cdot \beta \quad \text{şeklindedir.} \quad (2.5.5)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = \frac{\frac{(k - 1) \cdot \tau \cdot \beta}{k \cdot \tau \cdot \beta} - \tau \cdot \beta}{\Lambda}$$

$$\alpha_0 = \frac{\$ \cdot \tau \cdot \beta - \tau \cdot \beta}{\Lambda}$$

$$\alpha_0 = \frac{\tau \cdot \beta}{\Lambda} (\$ - 1) \quad (2.5.6)$$

Gecikmiş kritiklikte $\$ = 0$ olup bozunum sabitinin değeri;

$$\alpha_{DC} = - \frac{\tau \cdot \beta}{\Lambda} \quad \text{olarak verilir.} \quad (2.5.7)$$

(2.5.7) ifadesi, (2.5.6) eşitliğinde yerine konursa;

$$\alpha_0 = \alpha_{DC} \cdot (1 - \$) \quad \text{elde edilir.} \quad (2.5.8)$$

Böylece ölçülecek olan bozunum sabiti α_0 'ın dolar biriminde reaktivite ile orantılı olduğu bulunur.

Gecikmiş kritiklikte bir darbe bozunum ölçümüyle basit olarak bir orantı sabiti bulunabilir. Eğer reaktivite biliniyorsa, nötron darbesi metodu, etkin gecikme kesrinin, reaktör kinetik ve güvenlik konularında önemli bir büyüklük olan ani nötron jenerasyon zamanına oranının tam ölçümünü verir.

Ani nötron ömrü ve etkin gecikme kesri, enerji spektrumuna ve akı şekline bağlı olup, yakıt yanması, zehir ve kaçaklar nedeniyle oluşan reaktivite değişimlerinden dolayı değişmeye meyillidir. Ancak (2.5.6) ve (2.5.8) denklemlerinde bu değişim dikkate alınmayabilir. Reaktivite değişimlerinin büyük olmadığı ($\rho \leq \$ 0.1$) durumlarda, Λ 'nın ve $\tau \cdot \beta$ 'nin reaktivite ile değişimi ihmal edilebilir.

Çok büyük reaktivite değişimlerini (Birkaç dolar) ölçmek gerekli olduğu zaman, nötron ömrünün değişiminin düzeltilmesi hesaba katılmalıdır. Gecikmiş ve ani nötronların kaçmama olasılık hesaplamaları göstermiştir ki etkin gecikme kesirlerindeki değişim, nötron ömrünün değişimiyle karşılaştırıldığında önemsizdir. [4]

Λ ve $\tau\beta$ değişikliğe uğramadığı zaman, eşitlik (2.5.7) ve (2.5.8) hassas reaktivite saptanması için oldukça uygundur. Ancak temel tarz bozunumunun gözlenmiş olması önemlidir. Kritiklik civarında fisyon kaynağı ile temel tarz değiştirilir. Oldukça fazla altkritik kütlelerde, şekle ait ve sıcaklık-zaman etkileri darbe metodu ile reaktivite ölçümlerinde 10%-15% seviyesinde bir alt sınır çizer.

Bu deneyde yapılan reaktivite ölçümü, seçilen teoriksel modelde var olan harmonik etkilere yüksek oranda hassasiyet gösterir. Deney bütün yüksek değerlerin yok olmaya başlamalarından sonra bozunum sabitinin ölçümünün yapılmış olmasını gerektirir. Bu şartlar en fazla reaktör kritikliğe yakın olduğu zaman kolaylıkla saptanabilir. Reaktör çok fazla alt kritik olursa nötron yoğunluğunun yüksek değerleri yavaş bozunur, oran düşer ve bu şekilde, bir bozunum ölçümüne karışır. Nötron yoğunluğunun bozunumunun harmonik etkilerinin analizi, reaktörde farklı pozisyonlarda nötron bombardımanının bozunumunun ölçümüyle yapılabilir.

Sistemin büyüklüğü ile karşılaştırıldığında küçük bir dedektörün kullanımı, kaynak ve nokta dedektörün akıllı yerleşimiyle akı dağılımının yüksek harmoniklerine karşı ayırım yapmaya imkan sağlar. Örneğin uygunsuz harmonikler bir merkezi kaynak kullanılarak yok edilebilir.

Şekle ait hassaslık derecesi çeşitli uzay noktalarında ölçülmüş bozunum sabitinin aynı değerde olmasının kontrol edilmesiyle ve yer-zaman bozunum eğrisinin şekil veya harmoniklere göre en küçük kareler metoduyla araştırılmasıyla yapılabilir. Harmonik problemlere pratik bir yaklaşım iki dedektör kullanmaktır. Biri çalışma altındaki kritik kütlenin kaynak tarafına uygun bir şekilde yerleştirilir. Diğeri ise kaynağın karşısında uzak bir yere yerleştirilir. Kaynak tarafındaki dedektörde gözlenen bozunum, daha uzağa yerleştirilen dedektörde görünen bozunumdan çok daha hızlı olacaktır. Gözlenen bozunum sabitinin zamana göre grafiği, başlangıçta her bir bozunum için iki farklı α_0 değeri gösterir. Birkaç ortalama ömür sonra bulunan iki α değeri, asimtotik bozunum sabiti α_0 ile aynı değerde olacaktır.

Bu metotta kullanılan darbe kaynak değerinin, dedektörler ve dalga analizörleri ile ölçümünün aynı anda olma kabiliyeti önemli olup, kritikliğe yaklaşım veya reaktörün çalışmaya başlaması sırasında bilinmeyen veya zamanla değişen bir kaynağın gözlenmesi açısından faydalı olmaktadır.

Farklı kontrol çubuk konumları için yapılan ölçümlerde sıcaklık değişiklikleri veya dedektör pozisyonu değişiklikleri nedeniyle oluşabilecek reaktivite değişimlerinin olmamasının sağlanması önemlidir.

Negatif reaktivite ölçmekte kullanılan bu metotta iyi istatistiksel doğruluk elde etmek için reaktörün yeterli bir süre darbelenmesi gerekir.

Sonuç olarak bu metot'ta bir kontrol çubuğunun çeşitli pozisyonlarındaki reaktivite değerleri hesaplanarak, çubuk pozisyonu-reaktivite eğrisi çizilebilir. Kontrol çubuğunun toplam reaktivite değeri bulunabilir. Reaktör kapatma reaktivitesi hesaplanabilir. β bilindiğine göre, ölçülen bozunum sabitinden reaktör ani nötron ömrü (2.5.1) eşitliğine göre bulunabilir. Reaktivite hesapları (2.5.8) formülüne göre belirli reaktör şartlarında ölçülmüş bozunum sabitlerinden saptanabilir.

2.7. Yakıt Yerine Zehir Koyma Tekniği

Termal ve orta seviyeli sistemlerde reaktivite yakıt yerine zehir koyma tekniği ile saptanabilir. Yakıtın küçük bir miktarının yerine yerleştirilen zehir, reaktivite değişimine sebep olur. Bunun değeri $\delta k/k$ biriminde olmak üzere, tek gruplu 1.mertebe perturbasyon teorisi ile hesaplanabilir. [4]

Kullanılan nötron zehirinin, yakıt ile aynı yutma ve saçılma tesir kesitlerine sahip olduğunu düşünelim. Reaktör kritik iken, yakıt yerine bununla aynı miktarda zehir konulmasıyla meydana gelen reaktivite değişimi, integrasyonun bütün enerji gruplarında alınmasıyla ve zehirlenme hacmi PV ve toplam kalp hacmi CV olarak ele alınarak, perturbasyon teorisiyle bulunabilir.

$$\frac{\delta k}{k} = - \frac{\int_{PV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV}{\int_{CV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV - \int_{PV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV}$$

(2.7.1)

Yukarıda yazılan eşitlikteki her bir terim nötron üretim oranını göstermektedir. Dolayısıyla reaktivite değişikliği olarak yukarıdaki $\delta k/k$ ifadesi, perturbe edilmiş sistemde nötron üretimindeki değişikliğin toplam nötron üretimine olan oranını ifade eder.

Ancak hesaplarımızda var saydığımız gibi U^{235} ile aynı enerjilerde, aynı yutma ve saçılma tesir kesitlerine sahip zehir malzemesi yoktur. Bir çok durumda saçılma tesir kesitindeki farklılık, yutma tesir kesitindekiyle karşılaştırıldığında oldukça küçüktür ve ihmal edilebilir.

Σ_{ap} zehir malzemesinin makroskopik yutma tesir kesitini, Σ_{af} ise yakıtın makroskopik yutma tesir kesitini gösterirse ve bu iki büyüklük birbirine eşit değilse yukarıdaki eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\delta k}{k} = - \frac{\int_{PV} \int_E [\sqrt{\Sigma_f \cdot X \cdot Q_0} - (\Sigma_{af} - \Sigma_{ap}) \cdot Q_0] \cdot Q \cdot dE \cdot dV}{\int_{CV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV - \int_{PV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV}$$

$(\Sigma_{af} - \Sigma_{ap}) \cdot Q_0 < \sqrt{\Sigma_f \cdot X \cdot Q_0}$ ise yukarıdaki eşitlik için yapılan genelleştirmede, makroskopik tesir kesitinde görülen farklılığın sonuca etkisi oldukça küçüktür.

$$\frac{\delta k}{k} \approx - \frac{\int_{PV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV}{\int_{CV} \int_E \sqrt{\Sigma_f \cdot Q \cdot X \cdot Q_0} \cdot dE \cdot dV} \quad (2.7.2)$$

Bu metodun kontrol çubuğu kalibrasyonunda uygulanmasında, örneğin verilen bir çubuk hareketinin nötron ekonomisine etkisi uygun bir miktar dağılmış zehirin ilavesiyle dengelenebilir ve buna karşılık gelen $\delta k/k$ değeri eşitlik (2.7.2)'den hesaplanabilir. Yakıt ve zehir malzemelerinin yutma tesir kesirlerindeki gerçekte var olan farklılığın ihmal edildiği durumlarda, fisyon yapan maddenin uygun ağırlıklı $\delta v/v$ oranının zehir ile yer değiştirmesi, $\delta v/v$ 'ya karşılık gelen $\delta k/k$ gibi bir reaktivite değişimi meydana getirecektir.

BÖLÜM.3

METOTLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Çubuk kalibrasyonu için reaktivite tayininde pozitif peryod metodu en doğru sonuç verebilen ve en çok kullanılan bir teknik olmasına rağmen, geçici rejimlerin yok olması ve asimtotik peryodun gözlenmesinin temini için uzun zaman beklemek gerektiğinden uygulanması bir hayli zaman almaktadır.

Pozitif peryod metodu kritik bir reaktörde, küçük pozitif ve negatif reaktivite ölçümleri için en güvenilir metod durumundadır. Bu metodun doğrulukla uygulanabilmesi $\rho \leq 30$ cent değeriyle sınırlıdır. Bu metodla reaktivite saptanması, en uzun gecikmiş nötron peryodu, kaynak ve öncü grup geçici rejim etkileriyle negatif bölgede şiddetli bir şekilde sınırlı olup, pozitif reaktivite bölgesinde etkisini gösterir. Peryod ölçümünü yapmadan önce geçici rejimlerin yok olması için yeterli zaman bırakıldığı sürece bu metod doğru sonuçlar verir. Ancak yüksek reaktivite değerine sahip kontrol çubuklarının diferansiyel değerlerinin saptanması için uzun zaman gerektiğinden, bu durumda çubuk düşürme metodu tercih edilir. Pozitif peryod metodun dezavantajı, uygulanmasının diğer metotlara nazaran daha uzun zaman gerektirmesidir. Ayrıca çubukların gölgeleme etkileri olmaktadır.

Çubuk düşürme metodunda çubuk düştükten sonraki nötron akı seviyesinin doğru olarak saptanmasında problemler vardır. Pratikte çubuğun düşme süresi, gözlenen ani atlama geçici rejim aralığını aşmaktadır. Bu nedenle geçici nötron bozunumunun izi kullanılmakta ve düşme anında extrapolasyon yapılmaktadır. Bu da ani atlama geçici rejim hareketinden sonraki nötron akı seviyesinin bulunmasında hataya sebep olabilir. Bu problem pozitif peryod metodunda meydana gelmez. Ama her iki metod, farklı uygulamalarından dolayı birbirlerinin yerine geçemezler.

Çubuk düşürme metodu pozitif peryod metoduna nazaran daha büyük reaktivite aralığı ölçümüne olanak verir. En üst limit hata kaynaklarıyla belirlenir. % 10'dan büyük olmayan bir hata ile bir kaç bin pcm ölçülebilir. 10.000 pcm'den büyük kademelerde başarılı ölçümler kaydedilmiştir.

Genel olarak iyi bir doğruluk yeteneğine sahip olan çubuk düşürme metodu, altkritik durumlarda, büyük çubuk değerleri için şekil etkilerine karşı hassastır.

Ağır kontrol çubukları olan büyük reaktörlerde hemen hemen ani çubuk düşürme pratik olarak imkansız olup kaynak çekme metodu kullanmak uygun olmaktadır. Bu metotta şekle ait etkiler, çubuk gölgelemesi ve dedektör yerleşimi gibi sebeplerin problem yaratma ihtimali diğerlerine nazaran daha azdır. Bu metotla elde edilen sonuçlar genel olarak % 10'luk bir hataya sebep olabilirler. Uygulanabilirlik sınırı çubuk düşürme metodu ile aynıdır.

Ancak çubuk düşürme ve kaynak çekme metotlarında dedektörün geçici cevaplarının yeteri derecede doğru ölçümünü yapmak zordur. Bu zorluk kaynak çekme metodunda daha büyüktür. Çünkü alt kritik bir reaktörde düşük akı seviyesinde dedektör çıkışı çok düzensiz olabilir.

Çubuk düşürme ve kaynak çekme metotlarının her ikisi de, meydana gelen hızlı geçici rejimleri ölçebilen bir dedeksiyon sistemine gereksinim duyarlar. Hem analitik çalışma hem de gereken extrapolasyondan dolayı büyük yanlışlıklar olabilir.

Rossi- α metodu hassaslık derecesi olarak nötron darbesi metodu ile benzerlik gösterir. Fakat hızlı ve orta seviyeli sistemlerde, gecikmiş kritiklik civarında sınırlıdır. Yavaş sistemler veya altkritik durumlar için, fisyon zincirlerinin üst üste gelmesi ve geri kaynak problemleri Rossi- α metodunda ciddi olabilir. Hızlı sistemler için nötron darbesi metodu ve Rossi- α metodu tamamlayıcı teknikler olarak düşünülebilir. Nötron darbesi metodu altkritik metal sistemlerde, Rossi- α metodu ise gecikmiş kritiklik civarında ve ilerisinde kendi güçlerini sergilerler. Nötron darbesi bozunumu ve Rossi- α verileri çok gruplu transport hesaplamaları için önemli veriler sağlayabilirler. Homojen reaktörlerde büyük reaktivite değişikliklerinin ölçümleri için darbe metodu diğer tekniklere göre önemli bir avantaj sunar. Rossi- α metodu özellikle gecikmiş kritikliğe yakın hızlı sistemlerde çok iyi uygulanabilir.

Nötron darbesi metodu kavramsal olarak basit olup, Rossi- α ve ortalamaya göre değişim metotlarına kıyasla daha doğru sonuçlar verir.

Nötron darbesi metodu diğerlerine nazaran iki avantaj sağlar. Birincisi büyük negatif reaktiviteler hassas bir şekilde doğru olarak ölçülebilir. İkinci olarak bu metod, gecikmiş kritiklikte kendi kalibrasyonunu sağlar. Bu kalibrasyon, sistemin reaktivitesiyle ani nötron bozunum sabitinin ilişkisine dayanır.

Pozitif peryod ve çubuk düşürme ölçümlerinin nötron darbe tekniği ile detaylı karşılaştırmaları, bir doların altındaki yani gecikmiş kritikliğin altındaki reaktiviteler için iyi bir uyum (yüzde birkaç) göstermiştir. Altkritikliğin daha büyük değerleri için darbe metodunun kesinlikle daha üstün olduğu anlaşılmıştır ve hemen hemen bütün durumlar için daha uygun, hızlı ve doğru sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Yakıt yerine zehir koyma tekniği, çubuk düşürme ve nötron salınım tekniği ile karşılaştırıldığında alınan sonuçlara göre her üç tekniğin de eşdeğer olduğu gözlenmiştir.

Altkritikliğin artmasıyla bütün metotlar daha büyük belirsizlikler gösterirler.

BÖLÜM. 4

TR-2 REAKTÖRÜNÜN KONTROL ÇUBUKLARININ KALİBRASYONUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Pozitif peryod deneyinin uygulanmasında kullanılan yöntem bir kontrol çubuğunun kısmen çekilmesi ve bunun sonucunda oluşan kararlı peryodun bulunmasıyla, reaktivite değişiminin saptanmasıdır. Bu işlem kalibrasyonu yapılan çubuğun tüm uzunluğu boyunca tekrarlanarak çubuğun toplam reaktivite değeri hesaplanır.

Bu şekilde bir kontrol çubuğunun tamamen kalb içinde olduğu ve reaktivitenin sıfır olduğu değerden başlamak üzere, çubuğun tümünün reaktör kalbinden çekilmesine karşılık gelen maksimum reaktivite değerlerine kadar, çubuğun kalpten her çekilme miktarlarına ait reaktivite değerleri bulunur ve buna bağlı olarak çubuğun kalpte bulunduğu pozisyonlara göre reaktivite değerleri göz önüne alınarak integral kalibrasyon eğrisi çizilir.

Çubuk düşürme deneyinde bir kontrol çubuğu reaktör kalbine aniden düşürülür ve çubuğun düşmesi sırasında kaydedilen nötron bozunum eğrisi yardımıyla çubuğun reaktivite değeri bulunur.

4.1.1. Nokta Kinetik Denklemlerinin Çıkarılması

Zincir reaksiyonun başladığı bir nükleer sistemde iki fisyon arasındaki zaman süreci bir jenerasyon olarak ele alınır. Bir reaktörde ard arda gelen iki jenerasyondaki nötron sayıları eşit ise reaksiyonlar zamandan bağımsız olacaktır. Bu şekilde davranan bir nükleer sistem kritik demektir. Bir reaktörün k etkin çoğaltma katsayısı, bir jenerasyon sonunda reaktörde kalan ortalama nötron sayılarının, jenerasyon başlangıcında sisteme dahil edilen ortalama termal nötron sayılarına oranıdır. Diğer bir ifadeyle;

$$k = \frac{\text{Üretim}}{\text{Kayıp (Sızma+kayıp)}}$$

Buna göre reaktörün kritik olması $k=1$ durumuna karşılık gelir. $k<1$ için reaktör alt kritik olup, jenerasyon sonunda nötron sayısı azaldığından, reaktörün gücü düşer. $k>1$ olması halinde ise, jenerasyon sonunda nötron sayısı artıp reaktörün gücü fazlalaşır. Ancak zamana bağlı olarak etkin çoğaltma katsayısının değerinin değişmesine sebep olan birçok parametreler vardır. Bunlar sıcaklık değişimleri, boşluk oluşması, yakıt yanmasının etkileri ve ksenon, samaryum gibi büyük termal nötron yutma tesir kesitine sahip fisyon ürünlerinin oluşarak zehir etkisi meydana getirmeleridir. k değeri, reaktivitenin değişmesine sebep olan bu etkileri karşılamak ve gücü istenen değere çıkarabilmek için 1'den büyük olmalıdır. Bu sebeple reaktör dizaynında hesaplar, $k>1$ olacak şekilde yapılır.

Çoğaltma katsayısındaki değişim (reaktivite fazlası) δk , jenerasyon başlangıcında sisteme giren her nötron başına, jenerasyonun sonunda nötronların sayısındaki kazançtır. Yani k değerinin 1'den farklı olma miktarıdır.

$$\delta k = k - 1$$

Reaktivite etkin çoğaltma katsayısı ile bağlantılı bir büyüklük olup, reaktörün kritik olma durumundan ne kadar farklı olduğunun bir ölçüsü olarak ele alınır. Başka bir deyişle reaktivite, etkin çoğaltma katsayısı olan k değerinin, 1'e nazaran fazlalığını ifade eder.

$$\beta = \frac{k - 1}{k} = \frac{\delta k}{k}$$

Fisyon olayında nötronun doğmasından, yutulması veya reaktörden kaçmasına kadar olan ortalama ömrü (ℓ), yavaşlama zamanı ve difüzyon zamanı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Yavaşlama zamanı, fisyonla yayımlanan bir ani nötronun, yavaşlatıcı ortam atomlarıyla çarpışarak termal enerji seviyesine kadar yavaşlaması için geçen zamandır. Difüzyon zamanı ise nötronun termal enerji seviyesine eriştiği andan, nötronun yok olmasına kadar geçen zamandır. Çoğaltkan bir ortamda yavaşlama zamanı difüzyon zamanına oranla çok kısa olduğundan, ortalama nötron ömrü difüzyon zamanına eşit kabul edilir. Difüzyon zamanı termal nötron ömrü olarak da bilinir.

Fisyon olayında açığa çıkan nötronlar enerjileri, meydana geliş şekilleri ve oluşma zamanları açısından ikiye ayrılırlar. Fisyonla çekirdeklerin bölünmesi sırasında yayımlanan nötronlara ani nötronlar denir ve bunlar fisyonla hemen sonra kısa bir zaman süreci içinde meydana gelirler. Örneğin oda sıcaklığında U_{235} ve suyun homojen karışımından meydana gelmiş sonsuz kritik termal bir reaktörün hesaplanan ani nötron ömrü 1.08×10^{-4} saniye olarak bulunmuştur. Hızlı reaktörlerde nötronların termal enerjilere ulaşabilmeleri mümkün olmadığından ani nötron ömrü bu reaktörlerde termal reaktörlere nazaran daha kısadır. Bu değer yaklaşık 10^{-7} saniye olarak hesaplanmıştır. Ani nötronların en olası enerjileri 0.73 Mev. olarak bulunmuştur. [7]

Fisyon sonucu bölünerek meydana gelmiş olan dengesiz durumdaki çekirdekler bozunmaya devam ederler ve bu esnada yine nötron yayımlanır. Bu şekilde fisyon ürünlerinin bozunmaları sonucu meydana gelen nötronlara gecikmiş nötronlar denir. Bunlar fisyon nötronlarının %1'inden daha az bir miktarını oluştururlar ve enerjileri ani nötronlarınkinden daha azdır.

Gecikmiş nötron yayımlayan fisyon ürünleri genel olarak 6 fisyon parçacık grubu olarak ele alınır. Bunlara gecikmiş nötron öncü grupları denir. Gecikmiş nötronların enerjileri, ani nötronların enerjilerinden daha az olduğundan bunların termal enerji seviyesine ulaşmaları daha çabuk olup, fisyon olayına katkıları daha fazladır.

Ayrıca gecikmiş nötronların meydana gelme süreleri, ani nötronlara kıyasla daha uzun bir zaman aralığı içinde olduğundan, bunların fisyon olayını meydana getirmelerini kontrol altına almak daha kolaydır. Bu nedenle gecikmiş nötronlar reaktörün güvenli bir şekilde işletilmesini sağlarlar.

Nükleer fisyon zincir reaksiyonları, nötronların fisyon yoluyla meydana gelme hızı ile ortamda yutulmaları ve dışarı kaçmaları şeklindeki nötron kayıp hızı arasında bir dengenin oluşturulabilmesiyle, sürdürülebilir. Reaktör kinetiği, bir nükleer reaktörde zamana bağlı olarak nötronların yer ve hız dağılımlarının değişimleri ile ilgili bir konu olarak tanımlanabilir.

Reaktör kinetiğinin nokta yaklaşım eşitliklerinde nötronların hız dağılımlarının tek grup olduğu, uzaysal dağılımlarının kararlı durumda bulunduğu ve nötron yoğunluğunun zamanla uniform olarak değiştiği varsayılır.

Bir reaktörde nötron yoğunluğunun zamana bağlı olarak değişimini tanımlayan eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir. [8]

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(r,t) - \Sigma_a \phi(r,t) + (1-\beta) \cdot \lambda_f \cdot \Sigma_f \phi(r,t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(r,t) + S(r,t) \quad (4.1.1)$$

$D \nabla^2 \phi(r,t)$ = t anında, birim zamanda birim hacimde yayınlanan kayıp nötronların sayısı

$\Sigma_a \phi(r,t)$ = Birim zamanda birim hacime giren nötronların sayısı

$(1-\beta) \cdot \lambda_f \cdot \Sigma_f \phi(r,t)$ = Birim zamanda birim hacimde meydana gelen ani nötronların sayısı

$\sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(r,t)$ = Birim zamanda birim hacimde meydana gelen gecikmiş nötronların sayısı

$S(r,t)$ = Birim zamanda birim hacimde nötron kaynaklarından üretilen nötronların sayısı

Gecikmiş nötronlar, öncü grupların radyoaktif parçalanmalarından yayınlandıklarından i. grup öncü yoğunluğunun denge eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial t} = \beta_i \cdot \sqrt{\Sigma_f} \cdot \phi(r,t) - \lambda_i \cdot C_i(r,t), \quad i=1, \dots, 6 \quad (4.1.2)$$

$\beta_i \cdot \sqrt{\Sigma_f} \cdot \phi(r,t)$ = Birim zamanda birim hacimde meydana gelmiş olan i. öncü grup sayısı

$\lambda_i \cdot C_i(r,t)$ = Birim zamanda birim hacimde bozunan i. öncü grup sayısı

(4.1.1) ve (4.1.2) eşitliklerinde nötron hızı v 'nin ve D , Σ_a , Σ_f gibi reaktör parametrelerinin sabit olduğu varsayılır. Böylece bu değerler zamana bağlı olmakla birlikte, yere bağımlı değildir.

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i \text{ değeri, bütün gecikmiş nötron öncüleri için gecikmiş nötron kesridir.}$$

Nötron akısının uzaysal dağılımının kararlı durumda olduğu veya temel mod durumunda bulunduğu varsayılarak akı $\phi(r,t)$ ve i. grup öncü yoğunluğu $C_i(r,t)$ uzaydan ve zamandan ayrı fonksiyonlar olarak yazılabilir.

$$\phi(r,t) = R(r) \cdot T(t)$$

$$C_i(r,t) = R(r) \cdot T_i(t) \quad (4.1.3)$$

En küçük özdeğere karşılık gelen temel mod aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\nabla^2 R(r) + B^2 \cdot R(r) = 0 \quad (4.1.4)$$

Eşitlik (4.1.1) R alanı için integre edilirse aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\frac{1}{v} \int_R R(r) \cdot dV \frac{dT(t)}{dt} = D \cdot T(t) \int_R \nabla^2 \cdot R(r) \cdot dV - \Sigma_a \cdot T(t) \cdot$$

$$\int_R R(r) \cdot dV + (1-\beta) \cdot \sqrt{\Sigma_f} \cdot T(t) \int_R R(r) \cdot dV + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot T_i(t) \cdot$$

$$\int_R R(r) \cdot dV + \int_R S(r, t) \cdot dV \quad (4.1.5)$$

Eşitlik (4.1.2) R alanı için integre edilirse aşağıdaki eşitlik bulunur.

$$\int_R R(r) \cdot dV \frac{dT_i(t)}{dt} = \beta_i \cdot \sqrt{\Sigma_f} \cdot T(t) \int_R R(r) \cdot dV$$

$$-\lambda_i \cdot T_i(t) \int_R R(r) \cdot dV \quad (4.1.6)$$

$n(t)$, $C(t)$ ve $S(t)$ olarak ele alınan yeni değerlerin tanımı aşağıdaki şekilde yapılabilir.

$$\frac{T(t)}{v} \int_R R(r) \cdot dV = n(t) = \text{Reaktördeki toplam nötronların sayısı}$$

$$T_i(t) \int_R R(r) \cdot dV = C_i(t) = i. \text{ gecikmiş nötron öncü gruplarının toplam sayısı}$$

$$\int_R S(r,t) \cdot dV = S(t) = \text{Birim zamanda nötron kaynağından üretilen nötronların sayısı}$$

Bu durumda (4.1.5) ve (4.1.6) eşitliklerinin yeni ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = & D \cdot T(t) \int_R \nabla^2 \cdot R(r) \cdot dV - \Sigma_a \cdot T(t) \int_R R(r) \cdot dV + \\ & + (1-\beta) \cdot \nu \cdot \Sigma_f \cdot T(t) \int_R R(r) \cdot dV + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) + S(t) \end{aligned} \quad (4.1.7)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \nu \cdot \beta_i \cdot \Sigma_f \cdot n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t) \quad (4.1.8)$$

(4.1.7) denklemi tekrar düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = & D \cdot \nu \cdot \nabla^2 \cdot n(t) - \nu \cdot \Sigma_a \cdot n(t) + (1-\beta) \cdot \nu \cdot \Sigma_f \cdot \nu \cdot n(t) \\ & + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) + S(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = & n(t) \cdot v [D \cdot \nabla^2 - \Sigma_a] + (1-\beta) \cdot \lambda \cdot \Sigma_f \cdot v \cdot n(t) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) + S(t) \end{aligned} \quad (4.1.9)$$

Ani nötron ömrü ve çoğaltma katsayısı k 'ya ait eşitlikler yazılırsa;

$$\ell = \frac{\frac{1}{v} \int_R \phi(r,t) \cdot dV}{\int_R [\Sigma_a \cdot \phi(r,t) - D \cdot \nabla^2 \cdot \phi(r,t)] dV} \quad (4.1.10)$$

$$k = \frac{\int_R \lambda \cdot \Sigma_f \cdot \phi(r,t) \cdot dV}{\int_R [\Sigma_a \cdot \phi(r,t) - D \cdot \nabla^2 \cdot \phi(r,t)] dV} \quad (4.1.11)$$

Burada integral alan R bütün reaktör kalbidir.

(4.1.10) denkleminde her iki taraf $\frac{1}{v} \int \phi(r,t) \cdot dV$ ile bölünür.

$$\ell = - \frac{1}{v (D \nabla^2 - \Sigma_a)}$$

$$D \nabla^2 - \Sigma a = - \frac{1}{\ell \cdot v} \quad (4.1.12)$$

(4.1.11) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\int_R [\Sigma a \cdot \phi(r,t) - D \nabla^2 \cdot \phi(r,t)] dV = \frac{1}{k} \int \sqrt{\cdot} \cdot \Sigma f \cdot \phi(r,t) \cdot dV \quad (4.1.13)$$

(4.1.13) ifadesi (4.1.10)'da yerine konur.

$$\ell = \frac{\frac{1}{v} \int_R \phi(r,t) \cdot dV}{\frac{1}{k} \int_R \sqrt{\cdot} \cdot \Sigma f \cdot \phi(r,t) \cdot dV} \quad (4.1.14)$$

(4.1.14) ifadesi $\frac{1}{v} \int_R \phi(r,t) \cdot dV$ ile bölünür.

$$\ell = \frac{k}{v \cdot \sqrt{\cdot} \cdot \Sigma f}$$

$$v \cdot \sqrt{\cdot} \cdot \Sigma f = \frac{k}{\ell} \quad (4.1.15)$$

(4.1.12) ve (4.1.15) eşitlikleri (4.1.9)'da yerine konur.

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\ell} + (1-\beta) \frac{k}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S(t)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{k(1-\beta) - 1}{\ell} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i + S(t)$$

(4.1.16)

Diğer taraftan (4.1.15) eşitliği (4.1.8)'da yerine konur.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i \cdot k}{\ell} n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t) \quad (4.1.17)$$

Ortalama jenerasyon zamanı ve reaktivite şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Lambda = \frac{\frac{1}{v} \int_R \phi(r,t) \cdot dV}{\int_R \Sigma f \cdot \phi(r,t) \cdot dV} \quad (4.1.18)$$

$$\rho = \frac{\int_R \sqrt{\Sigma f \cdot \phi(r,t)} \cdot dV - \int_R [\Sigma a \cdot \phi(r,t) - D \nabla^2 \cdot \phi(r,t)] \cdot dV}{\int_R \sqrt{\Sigma f \cdot \phi(r,t)} \cdot dV}$$

(4.1.19)

(4.1.19) eşitliği $\int_R \phi(r,t).dV$ ile bölünür.

$$\rho = \frac{\sqrt{\Sigma f} - \Sigma a + D \nabla^2}{\sqrt{\Sigma f}}$$

$$D \nabla^2 - \Sigma a = \sqrt{\Sigma f} (\rho - 1) \quad (4.1.20)$$

(4.1.18) eşitliği $\int_R \phi(r,t).dV$ ile bölünür.

$$\Lambda = \frac{1}{v.\sqrt{\Sigma f}}$$

$$\sqrt{\Sigma f} = \frac{1}{\Lambda.v} \quad (4.1.21)$$

(4.1.20) denklemi (4.1.9)'da yerine konur.

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} = & n(t).v.\sqrt{\Sigma f}(\rho-1) + (1-\beta).\sqrt{\Sigma f}.v.n(t) + \\ & + \sum_{i=1}^6 \lambda_i.C_i(t) + S(t) \end{aligned}$$

$$\frac{dn(t)}{d(t)} = n(t).v.\sqrt{\Sigma f}(\rho - \beta) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i.C_i(t) + S(t)$$

$$(4.1.22)$$

(4.1.21) denklemi (4.1.22)'de yerine konur.

$$\frac{dn(t)}{dt} = n(t) \frac{\rho - \beta}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i(t) + S(t) \quad (4.1.23)$$

(4.1.21) denklemi (4.1.8)'de yerine konur.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i \cdot C_i(t) \quad (4.1.24)$$

(4.1.23) ve (4.1.24) denklemleri reaktör kinetiklerinin tek nokta yaklaşımı olarak adlandırılır.

Sabit reaktivite şartları altında gecikmiş nötronlar belli bir zaman gecikmesiyle fisyon zincir reaksiyonlarına katkıda bulunurken, $n(t)$ ve $C_i(t)$ sabit bir oranla exponansiyel olarak artar. Kararlı periyot, $n(t)$ veya $C_i(t)$ değerlerinin e katı artması için gerekli olan T zamanı olarak tanımlanır.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{T} \quad \text{ve} \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{C_i}{T} \quad \text{olarak alınır ve}$$

bu ifadeler (4.1.23) ve (4.1.24) denklemlerine yerleştirilirse aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$\frac{n}{T} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot C_i \quad (4.1.25)$$

$$\frac{C_i}{T} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i \cdot C_i \quad (4.1.26)$$

(4.1.26) denkleminde C_i değeri çekilir.

$$C_i = \frac{\beta_i \cdot n \cdot T}{(1 + \lambda_i \cdot T)} \quad (4.1.27)$$

(4.1.27) eşitliği (4.1.25)'de yerine konur.

$$\frac{n}{T} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i \cdot n \cdot T}{(1 + \lambda_i \cdot T)}$$

Eşitliğin her iki tarafı n ile bölünüp düzenlenirse;

$$\frac{\rho}{\Lambda} = \frac{1}{T} + \frac{\beta}{\Lambda} - \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i \cdot T}{(1 + \lambda_i \cdot T)} \quad \text{bulunur.}$$

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} + \beta - \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \cdot \beta_i \cdot T}{1 + \lambda_i \cdot T}$$

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i + \lambda_i \cdot \beta_i \cdot T - \lambda_i \cdot \beta_i \cdot T}{1 + \lambda_i \cdot T}$$

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T} \quad (4.1.28)$$

(4.1.28) denklemi inhour Eşitliği olarak tanımlanır. Bu denklem bir saatlik kararlı bir reaktör periyodu veren reaktivite miktarını ifade eder. Reaktivite dolar, cent, pcm ve $\delta k/k$ olarak gösterilir.

Dolar, reaktörün yalnızca ani nötronlarla kritik olması halinde gerekli olan reaktivite miktarıdır. Cent doların yüzde birine verilen isimdir. pcm (pour cent mille) ise 1'in yüz binde biridir.

Gecikmiş nötronların enerjileri, ani nötronların enerjilerine oranla daha az olup, bunların fisyonu sebebiyet vermeleri daha fazladır. Bundan dolayı fisyon olayında 1. grup gecikmiş nötron öncülerinin ani nötronlara olan etkinlik derecesini ifade eden τ_i değeri tanımlanır.

$$\tau_i = \frac{\text{1. grup gecikmiş nötronların fisyon olasılığı}}{\text{Ani nötronların fisyon olasılığı}}$$

Fakat gecikmiş nötron öncülerinin her grubunun enerjileri kesin olarak belli değildir. Bu nedenle ortalama τ değeri kullanılır.

(4.1.18) ifadesi $\tau \cdot \beta$ ile bölünürse dolar cinsinden reaktivite bulunur.

$$\frac{\rho}{\tau \cdot \beta} = \frac{\Lambda}{\tau \cdot \beta \cdot T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T} \quad (4.1.29)$$

Bir nötronun, ani bir nötron veya gecikmiş bir nötron doğurmadan önceki ortalama zamanı jenerasyon zamanı ve bir nötron yok olmadan önceki zamanı ise nötron ömrü olarak ifade edilir.

$$\Lambda = \frac{1}{\text{Üretim}}$$

$$\ell = \frac{1}{\text{Tüketim}}$$

Kritik bir reaktörde üretim tüketime eşittir.

$$\Lambda = \ell$$

Bu sebeple (4.1.29) denkleminde yerine yazılabilir.

$$\frac{\rho}{\tau.\beta} = \frac{\ell}{\tau.\beta.T} - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1+\lambda_i.T} \quad (4.1.30)$$

Reaktör kalbine adım reaktivite ithal edildiğinde nötron akısının zamana bağlı olarak ifadesi şu şekildedir.

$$\phi(t) = A_0.e^{s_0.t} + A_1.e^{s_1.t} + \dots + A_6.e^{s_6.t}$$

Bir adım değişiminden hemen önceki kritik haldeki akı seviyesi ise;

$$\phi(0) = A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_6 \quad \text{şeklindedir.}$$

Bu durumda akı oranları;

$$\frac{\phi(t)}{\phi(0)} = \sum_{i=1}^6 \frac{A_i.e^{s_i.t}}{A_i} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Reaktivitede bir adım değişimi için inhour eşitliği şu şekilde yazılabilir. [7]

$$\rho = \frac{s.\ell}{1 + s.\ell} + \frac{s}{1 + s.\ell} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \quad (4.1.31)$$

Bu denklem s'ye göre yedinci dereceden polinom bir eşitliktir. Her bir gecikmiş nötron parametreleri β_i ve λ_i için ve belirli bir anı nötron ömrü için (4.1.31) eşitliği, reaktivitenin her bir nümerik s değeri için 7 ayrı kök verir.

Reaktivitede pozitif bir değişim için inhour denkleminin bir kökü pozitif diğer kökleri negatiftir. Nötron yoğunluğunu veren ifadede negatif terimler bir müddet sonra söner. Geçici rejim ve yoğunluk exponansiyel olarak artarak sonuçta reaktör sabit bir peryoda erişir. Bu durum, reaktörün sabit peryotla gücünün artması durumuna karşılık gelir. Pozitif kökün tersine "reaktörün kararlı peryodu" denir. Bu değer $T = 1/s_0$ olarak ifade edilir. Negatif köklerin tersleri ise "reaktörün geçici peryodları" adını alır.

Reaktivitede negatif bir değişim için inhour denkleminin bütün kökleri negatif olup, ortamda hiç bir nötron kaynağı olmaması halinde nötron yoğunluğu sıfıra yaklaşır. Gecikmiş nötron gruplarına ait ilk kök, diğer geçici peryodların yok olmasından sonra kararlı bir peryod verir. Bu değer $T = 1/s_1$ şeklindedir.

Reaktivitede herhangi bir değişim olmaması durumunda ise denklemin köklerinden biri sıfır, diğerleri negatiftir.

Pozitif peryod metodunda reaktöre verilen adım reaktivitenin ardından geçici terimlerin yok olmasını bekledikten sonra reaktör periyodu $T = 1/s_0$ bulunup inhour denklemine konularak reaktivite değeri hesaplanabilir. Bu metotla reaktivite tayininde akı oran eşitliğinin hakim terimi olan $A_0 \cdot e^{s_0 \cdot t}$ vasıtasıyla akının esas olarak temsil edilmesine kadar beklemek gerekir. Bulunan değerlere göre pozitif reaktivite – çubuk pozisyonu eğrisi çizilebilir.

4.2. TR-2 Reaktöründe Pozitif Peryod Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonu Deneyi

TR-2 Reaktörünün SR1, SR2, CR1, CR2 kontrol çubuklarının pozitif periyot metodu kullanılarak kalibrasyonları yapılmış, ilgili tabloları ve integral eğrileri çıkarılmıştır.

28.12.1992, 25.1.1993, 15.2.1993, 22.2.1993 tarihlerinde yapılan kontrol çubuğu kalibrasyonu deneylerinde takip edilen işlemler aşağıdaki gibidir.

1- Bu deneyde kullanılan yöntem, bir kontrol çubuğunun kısmen çekilmesi ve bunun sonucunda oluşan kararlı periyodun bulunmasıyla, reaktivite değişiminin saptanmasıdır. Kalibrasyonu yapılacak kontrol çubuğu başlangıçta tamamen kalbe sokulur. Diğer kontrol çubuklarının konumları değiştirilmek suretiyle reaktör 2 kW güç seviyesinde kritik yapılır.

2- Üzerinde kalibrasyon yapılan çubuk bir miktar yukarı çekilir. Hakim veya kararlı olana nazaran geçici rejimlerin ihmal edilebilir hale gelmesine kadar yeterli bir zaman geçtikten sonra, 8-16kW, 10-20kW, 12-24kW güçleri arasında gücün iki kat olma zamanları ölçülüp kaydedilir.

3- Kalibrasyonu yapılan kontrol çubuğunun konumu değiştirilmeden, reaktör tekrar diğer kontrol çubuklarının ayarlanması suretiyle, başlangıç güç seviyesi olan 2 kW'da kritikliğe getirilir. Bu durumda bir müddet beklenir. Üzerinde deney yapılan çubuk tekrar bir miktar yukarı çekilerek aynı güçler arasındaki iki kat olma zamanları tesbit edilir.

4- Çubuk tamamen yukarı çekilene kadar yukarıdaki işlemler tekrarlanır ve bu şekilde kontrol çubuğunun kalibrasyonu tamamlanmış olur.

5- 8-16kW, 10-20kW, 12-24kW güçleri arasında kaydedilen iki kat olma zamanlarının ortalaması (t_0) alınır. [9]

$$T = \frac{t_0}{\ln 2} = \frac{t_0}{0.693} \quad (4.2.1)$$

Bulunan τ_0 değeri (4.2.1) denkleminde konularak periyot (T) hesaplanır.

$$\rho = \frac{\ell}{T.k} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i.T} \quad (4.2.2)$$

Hesaplanan periyoda karşılık gelen adım reaktivite, (4.2.2) eşitliği ile ifade edilen inhour denkleminde yerine konularak bulunur. [3]

Bu denkleminde kullanılan parametreler, TR-2 Reaktörünün 12. çevrimi için ANL'de Rebus-3 kodu kullanılarak hesaplanmış parametreler olup, değerleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \ell &= 6.27119 \cdot 10^{-5} \text{ s.} \\ \beta &= \sum \beta_i = 7.73024 \cdot 10^{-3} \\ \beta_1 &= 2.9648 \cdot 10^{-4} \\ \beta_2 &= 1.6483 \cdot 10^{-3} \\ \beta_3 &= 1.4494 \cdot 10^{-3} \\ \beta_4 &= 3.1455 \cdot 10^{-3} \\ \beta_5 &= 9.8949 \cdot 10^{-4} \\ \beta_6 &= 2.0115 \cdot 10^{-4} \\ \lambda_1 &= 1.2720 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_2 &= 3.1738 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_3 &= 1.1603 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_4 &= 3.1104 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_5 &= 1.3999 \text{ s}^{-1} \\ \lambda_6 &= 3.8686 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Bulunan değerlere göre çizilen integral eğrisi, çubuğun çekildiği konumlarına karşılık gelen reaktivite değerlerini gösterir.

TR-2 Reaktöründe gücün iki kat olma zamanı kullanılarak yapılan pozitif periyod metodunda, deneyle ilgili veriler Tablo 4.2.1, Tablo 4.2.2, Tablo 4.2.3, Tablo 4.2.4'de verilmiştir. Kontrol çubuklarının integral kalibrasyon eğrileri ise Şekil 4.2.1, Şekil 4.2.2, Şekil 4.2.3 ve Şekil 4.2.4'de bulunmaktadır.

19.4.1993 ve 10.5.1993 tarihlerinde bilgisayardan yararlanarak pozitif periyod metodu deneyi yapılmıştır. Bu uygulamada aşağıdaki işlemler takip edilmiştir.

1- Kalibrasyonu yapılacak çubuk tamamen kalp içindeyken, diğer kontrol çubukları ile ayarlanmak suretiyle reaktör 2 kW'da kritik yapılır. Bir süre beklenir.

2- Kontrol çubuğu bir miktar yukarı çekilirken gücün yaklaşık 10 kat artmasına kadar, nötron yoğunluğu bilgisayara kaydedilir.

3- Kalibrasyonu yapılan çubuğun bulunduğu seviye değiştirilmeden, reaktör tekrar 2 kW'da kritik yapılır. Aynı çubuk tekrar çekilip aynı güçler arasındaki nötron yoğunluğu bilgisayara kaydedilir.

4- Çubuk kalibrasyonu tamamlanana kadar yukardaki işlemlere devam edilir.

Reaktöre adım reaktivite girildikten sonra, nokta kinetik denklemlerinin çözümünü veren ifadede ilk terim gücün değişimini tayin edeceğinden diğerleri ihmal edilir. Bu durumda gücün değişimini veren denklem (4.2.3) ile ifade edilir.

$$\frac{P(t)}{P(0)} = (A_0 + B_0) e^{s_0 \cdot t} + C \quad (4.2.3)$$

Başlangıç anı olan t_0 'dan itibaren kaydedilen gücün değişimine, (4.2.4) denklemi ile belirtilen bir eğri uyandırulabilir.

$$\frac{P(t)}{P(0)} = K_2 \cdot e^{t/T} + K_3 \quad (4.2.4)$$

Yapılan iki deney için bilgisayara kaydedilen nötron yoğunluğu grafiklerine uydurulan iki örnek Şekil 4.2.5 ve Şekil 4.2.7'de verilmiştir.

(4.2.4) denklemine göre reaktör periyodu T, uydurulan eğri yardımıyla bulunur.

$$s_0 = \frac{1}{T} \quad (4.2.5)$$

(4.2.5) eşitliğine göre inhour denkleminin ilk kökü (s_0) bulunur. "inhour" bilgisayar programına s_0 değeri girilerek, reaktivite hesaplanır.

Yapılan deneylere ait veriler, Tablo 4.2.5 ve Tablo 4.2.6'da görülmektedir. integral kalibrasyon eğrileri ise Şekil 4.2.6 ve Şekil 4.2.8'de yer almaktadır.

TR-2 REAKTORÜ CR-2 KONTROL ÇUBUĞU KALİBRASYONU (2 kW KRİTİK) 28.12.1992

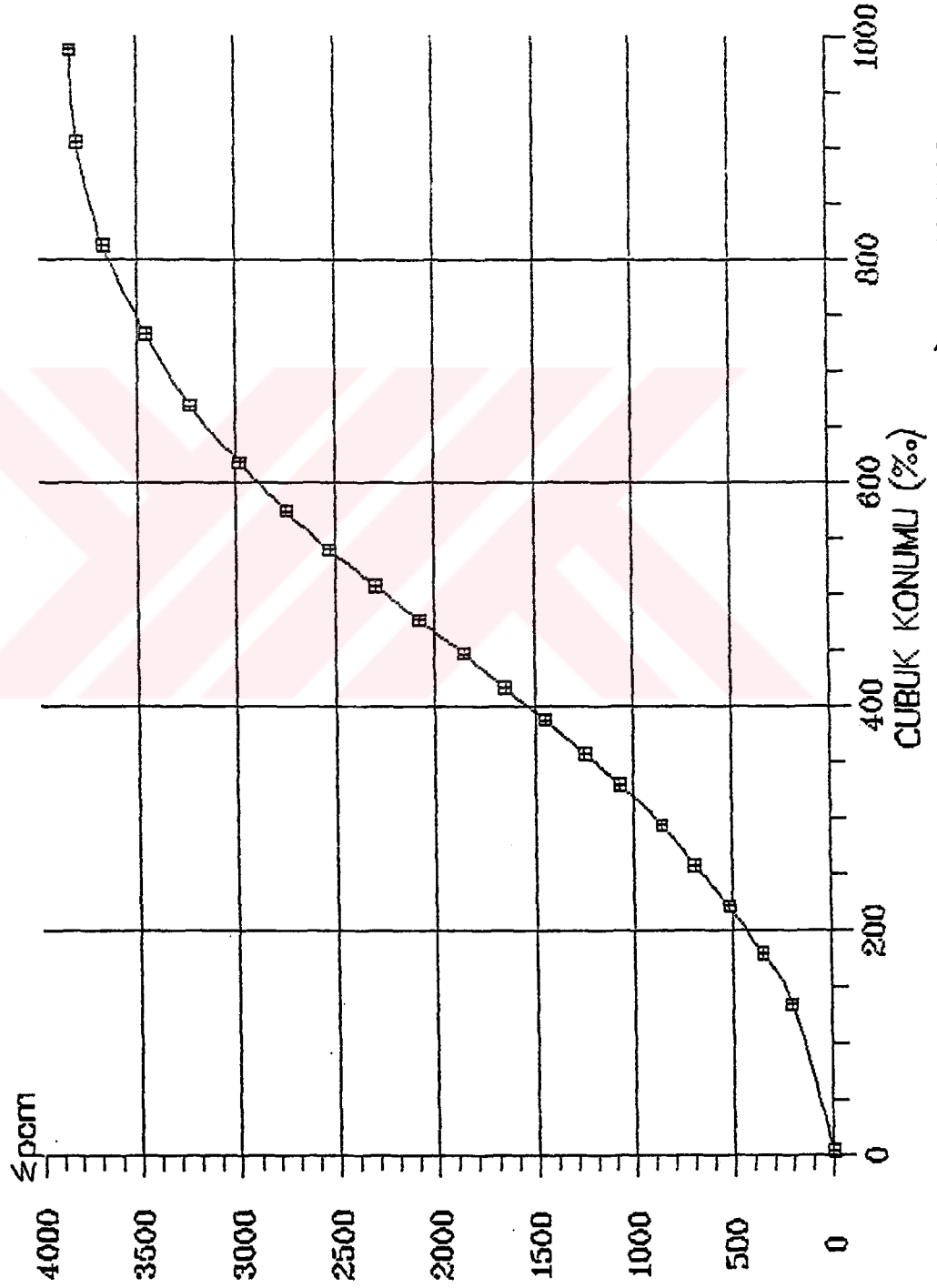
ÇUBUK KONTROLARI				1Kİ KAT ZAMANI (s.)			ORTALAMA 1Kİ KAT ZAMANI (s.)	PERYOD T	REAKTİVİTE Δk/k	REAKTİVİTE pcm	REAKTİVİTE \$
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2	t1 (8-16kW)	t2 (10-20kW)	t3 (12-24kW)					
				OTOMATİK KRİTİK							
863	863	857	04	-	14.80	14.96	14.88	21.47	.0020751	207.51	.2684
831	831	846	135				28.95	41.20	.0014069	140.69	.1820
812	811	826	180	27.90	28.74	29.03	20.99	30.29	.0017039	170.39	.2204
800	799	803	222	20.00	21.61	21.37	20.43	29.48	.0017316	173.16	.2240
775	774	790	258	20.10	20.58	20.61	22.11	31.90	.0016513	165.13	.2136
761	760	760	294	21.20	22.63	22.50	14.62	21.10	.0020951	209.51	.2710
738	736	742	330	14.80	14.46	14.62	18.86	27.22	.0018150	181.50	.2348
722	718	729	398	18.90	18.78	18.91	15.66	22.60	.0020174	201.74	.2610
679	714	725	388	15.60	15.56	15.84	15.68	22.63	.0020160	201.60	.2608
687	683	686	417	15.50	15.82	15.73	15.08	21.76	.0020599	205.99	.2655
672	667	670	447	14.70	15.21	15.34	12.91	18.63	.0022395	223.95	.2897
652	653	656	477	12.70	13.00	13.05	13.47	19.44	.0021897	218.97	.2833
621	645	647	508	13.10	13.82	13.51	12.35	17.82	.0022922	229.22	.2965
622	622	628	540	12.20	12.49	12.38	13.16	18.99	.0022170	221.70	.2868
609	606	610	575	13.00	13.21	13.29	12.30	17.75	.0022970	229.70	.2971
596	592	591	618	12.40	12.24	12.28	10.84	15.64	.0024504	245.04	.3170
579	574	581	669	10.60	11.21	10.72	12.77	18.43	.0022524	225.24	.2914
566	560	563	733	12.50	13.08	12.75	13.66	19.71	.0021734	217.34	.2812
554	547	551	813	-	-	13.66	30.66	44.24	.0013430	134.30	.1737
543	536	552	905	30.10	31.10	30.78	158.56	228.80	.0003040	38.40	.0497
			988	158.56*	-	-					

TOPLAM: .0384029 3040.29 4.9679

* = (3-6kW)

Tablo 4.2.1

TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL ÇUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EĞRİSİ



(Gücün iki kat olma zamanı kullanılarak) 28.12.1992

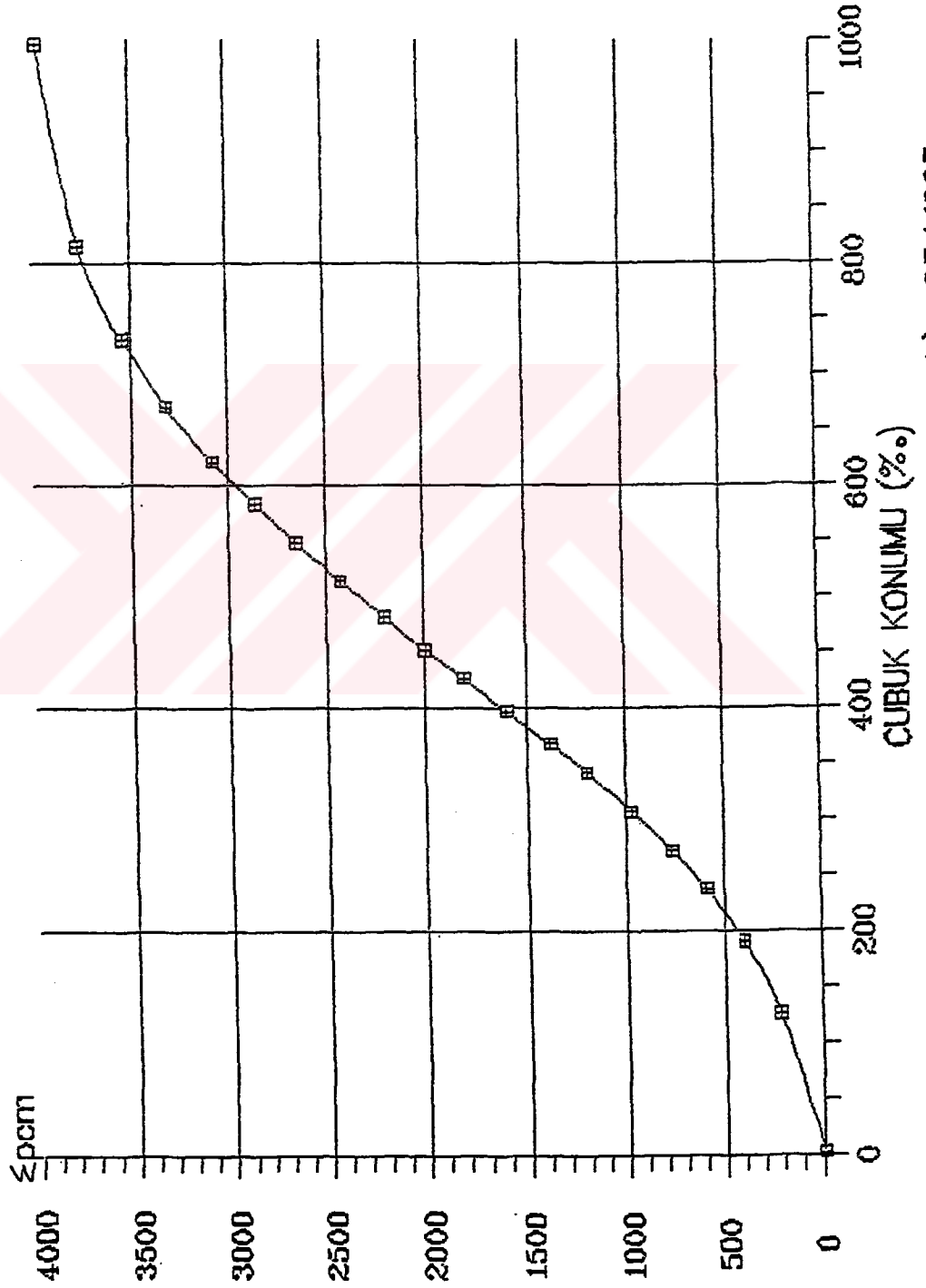
TR-2 REAKTORU CR-1 KONTROL CUBUGU KALIBRASYONU (2 KW KRITİK) 25.1.1993

CUBUK KONTROLARI				IKI KAT ZAMANI (s.)			ORTALAMA IKI KAT ZAMANI (s.)	PERYOD T	REAKTIVITE Δk/k	REAKTIVITE pcm	REAKTIVITE \$
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2	t1 (8-16kW)	t2 (10-20kW)	t3 (12-24kW)					
				OTOMATİK KRITİK							
897	904	003	880	14.09	13.12	13.41	13.54	19.54	.0021837	218.37	.2825
843	849	126	879	18.72	19.28	-	19.00	27.42	.0018073	180.73	.2338
808	813	191	875	17.78	17.26	17.12	17.38	25.08	.0019026	190.26	.2461
803	807	238	806	19.71	20.10	20.19	20.00	28.86	.0017536	175.36	.2269
784	786	272	790	14.09	15.26	-	14.67	21.17	.0020913	209.13	.2705
754	755	307	805	13.15	13.28	13.37	13.26	19.13	.0022081	220.81	.2856
749	750	342	752	18.10	18.57	18.35	18.34	26.46	.0018448	184.48	.2386
731	729	368	742	13.48	13.37	13.46	13.43	19.38	.0021932	219.32	.2837
713	709	397	722	14.11	14.41	-	14.26	20.58	.0021237	212.37	.2747
695	691	427	706	16.50	17.34	17.71	17.18	24.79	.0019152	191.52	.2478
678	672	452	694	15.43	15.85	15.80	15.69	22.64	.0020153	201.53	.2607
668	662	482	666	13.45	13.10	13.37	13.30	19.19	.0022046	220.46	.2852
646	637	514	665	12.23	12.58	12.71	12.50	18.04	.0022785	227.85	.2948
628	617	548	655	-	14.50	14.46	14.48	20.89	.0021062	210.62	.2725
623	609	583	626	13.48	13.34	13.57	13.46	19.42	.0021906	219.06	.2834
600	607	621	609	11.59	11.63	11.70	11.64	16.80	.0023634	236.34	.3057
579	585	671	609	13.03	12.88	12.96	12.95	18.69	.0022359	223.59	.2892
564	569	731	601	13.09	13.17*	13.00	13.08	18.87	.0022242	222.42	.2877
573	569	815	557	15.05	15.39	15.60	15.34	22.14	.0020407	204.07	.2640
566	561	996	545								
TOPLAM:									.0396821	3968.21	5.1334

*(13-26kW)

Tablo 4.2.2

TR-2 REAKTÖRÜ CR-1 KONTROL ÇUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EĞRİSİ



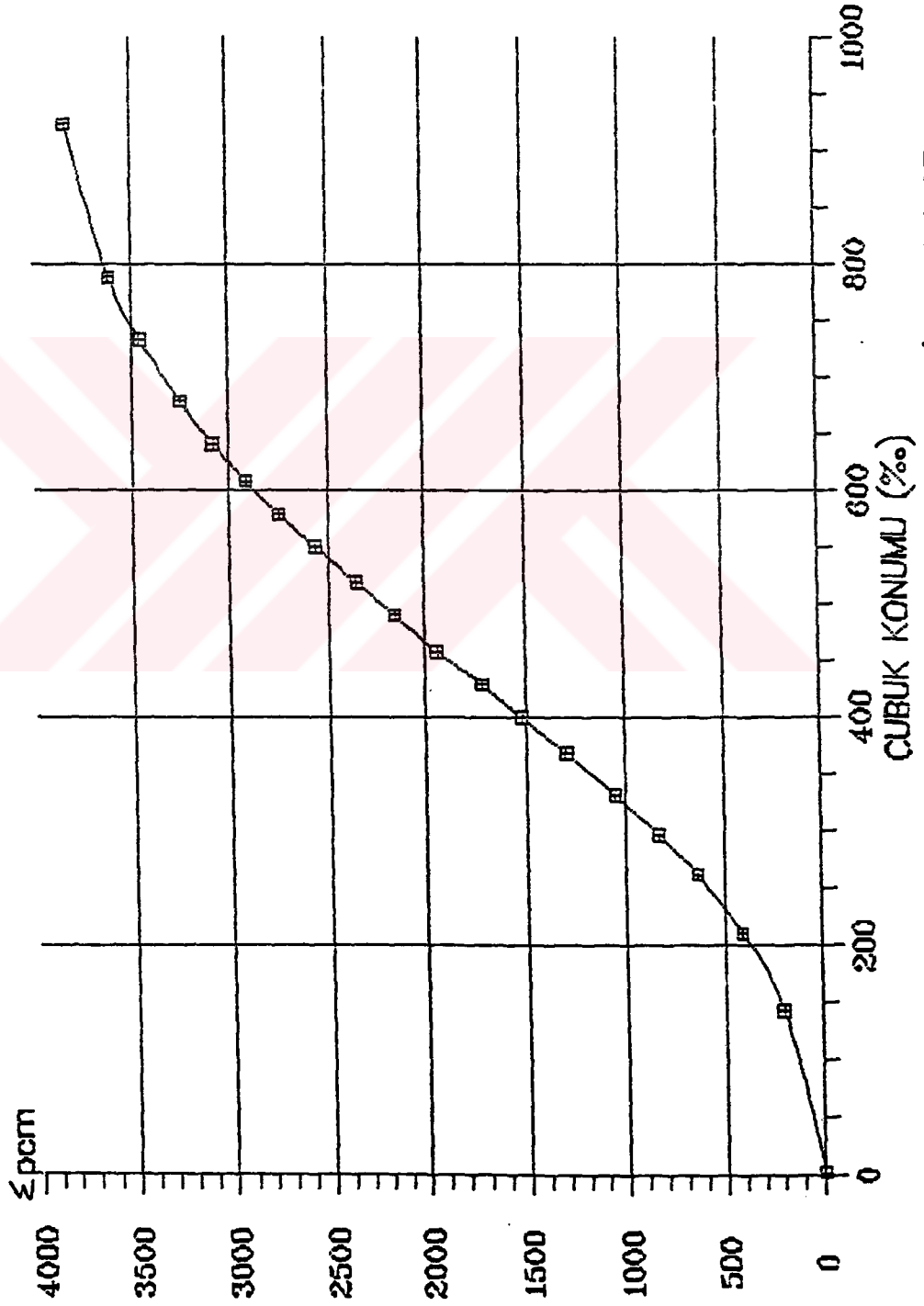
(Gücün iki kat olma zamanı kullanılarak) 25.1.1993

TR-2 REAKTÖRÜ SR-2 KONTROL CUBUGU KALİBRASYONU (2 KW KRİTİK) 15.2.1993

CUBUK KONUMLARI				İKİ KAT ZAMANI (s.)			ORTALAMA İKİ KAT ZAMANI (s.)	PERYOD T	REAKTİVİTE 2k/k	REAKTİVİTE pcm	REAKTİVİTE \$
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2	t1 (8-16kW)	t2 (10-20kW)	t3 (12-24kW)					
				OTOMATİK KRİTİK							
912	003	912	910	15.48	15.62	15.42	15.50	22.37	.0020290	202.90	.2625
872	143	872	885	14.61	15.02	14.88	14.83	21.40	.0020789	207.89	.2689
852	211	854	845	12.55	12.73	12.65	12.64	18.24	.0022646	226.46	.2930
816	262	816	842	16.03	16.25	16.44	16.24	23.43	.0019770	197.70	.2557
801	297	800	806	14.05	14.00	13.25	13.76	19.86	.0021650	216.50	.2801
781	332	781	778	10.59	10.78	10.83	10.73	15.48	.0024630	246.30	.3186
756	369	756	760	13.22	-	13.28	13.25	19.12	.0022090	220.90	.2858
741	400	740	733	16.72	16.46	16.42	16.53	23.85	.0019574	195.74	.2532
716	429	713	731	12.53	12.75	12.91	12.73	18.37	.0022562	225.62	.2919
690	458	687	724	13.53	13.89	13.38	13.60	19.62	.0021786	217.86	.2818
675	490	679	696	15.59	16.11	15.94	15.88	22.91	.0020019	200.19	.2590
665	519	662	678	14.46	14.74	14.78	14.66	21.15	.0020921	209.21	.2706
657	550	653	650	17.75	18.15	18.26	18.05	26.05	.0018618	186.18	.2408
640	579	636	642	22.17	22.63	22.51	22.43	32.37	.0016370	163.70	.2118
629	608	625	632	22.15	22.36	22.39	22.30	32.18	.0016428	164.28	.2125
614	641	614	625	21.90	22.24	21.73	21.95	31.67	.0016586	165.86	.2146
605	679	605	610	14.78	14.88	15.00	14.88	21.47	.0020751	207.51	.2684
594	733	593	597	23.66	23.85	24.00	23.83	34.39	.0015773	157.73	.2040
578	788	577	601	13.03	13.48	-	13.25	19.12	.0022090	220.90	.2858
497	923	495	521								
	1011										
TOPLAM:									.0383343	3833.43	4.9590

Tablo 4.2.3

TR-2 REAKTÖRÜ SR-2 KONTROL CUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EGRİSİ



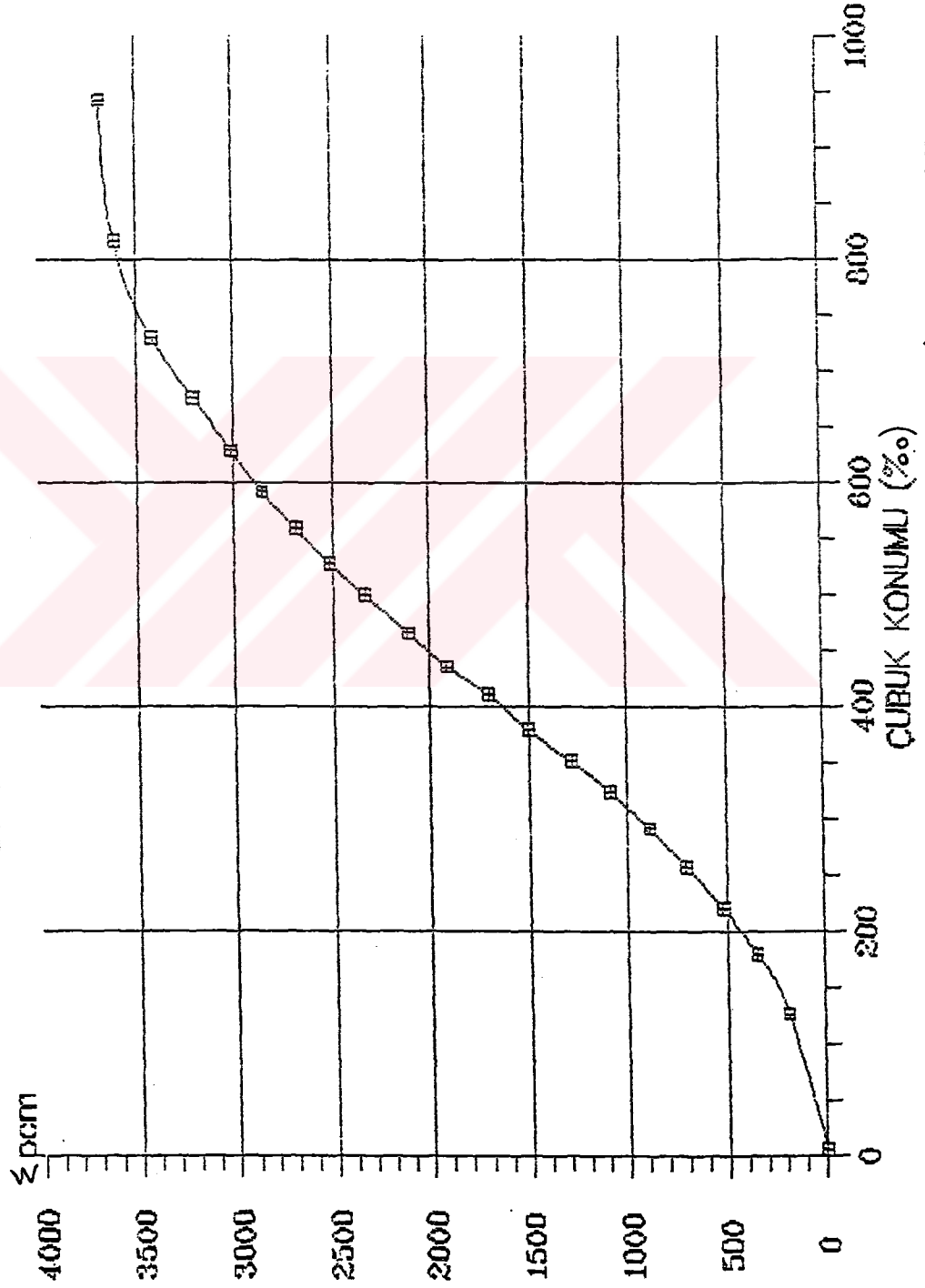
(Gücün iki kat olma zamanı kullanılarak) 15.2.1993

TR-2 REAKTÖRÜ SR-1 KONTROL ÇUBUĞU KALİBRASYONU (2 KW KRİTİK) 22.2.1993

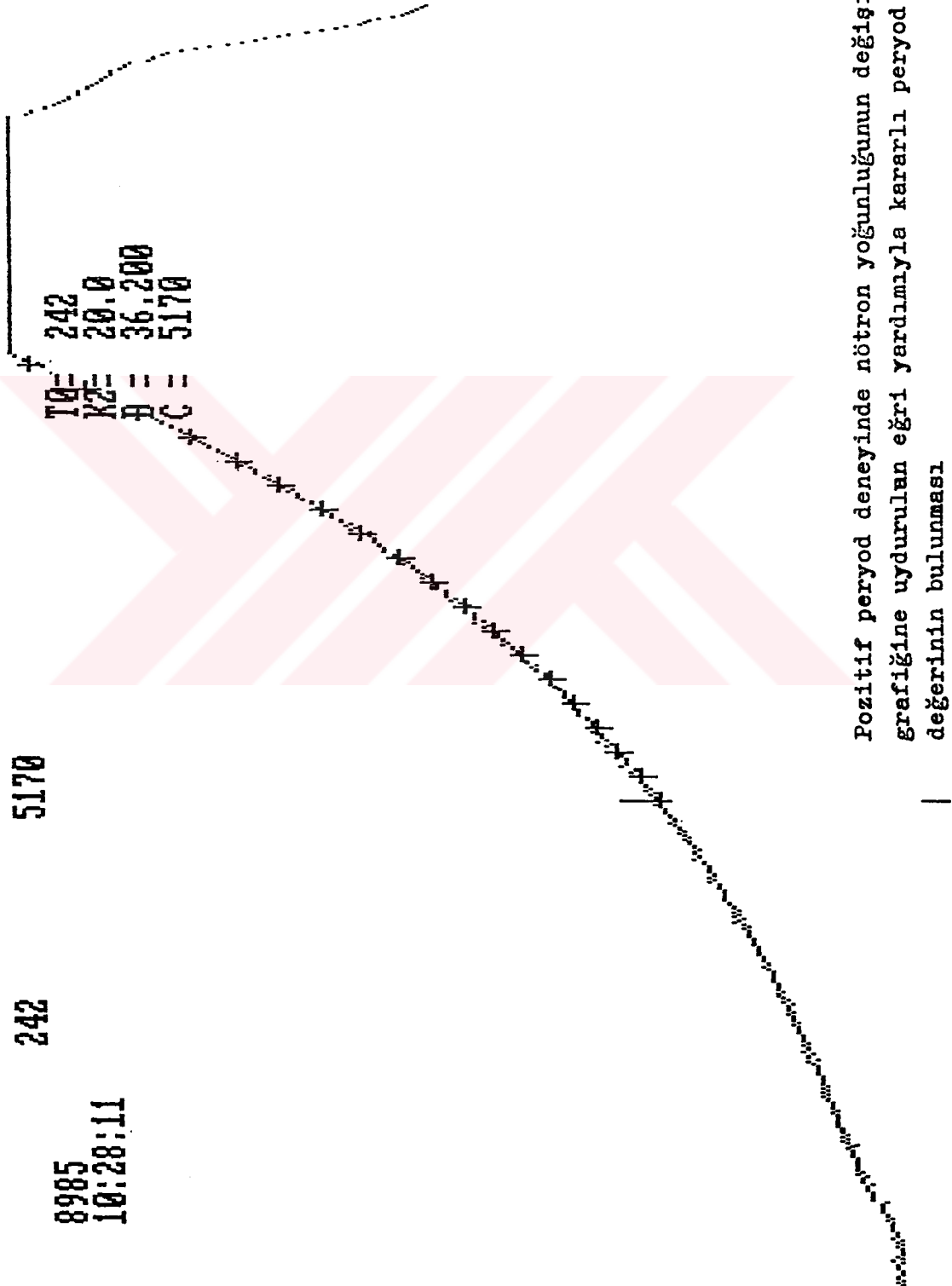
ÇUBUK KONUMLARI				İKİ KAT ZAMANI (s.)			ORTALAMA İKİ KAT ZAMANI (s.)	PERYOD T	REAKTİVİTE Δk/k	REAKTİVİTE pcm	REAKTİVİTE β
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2	t1 (8-16kw)	t2 (10-20kw)	t3 (12-24kw)					
				OTOMATİK KRİTİK							
6	930	930	913	17.07	17.35	17.19	17.20	24.82	.0019139	191.39	.2476
127	908	910	910	23.70	23.66	24.38	23.91	34.50	.0015740	157.40	.2036
180	891	854	866	20.86	20.82	20.76	20.81	30.02	.0017127	171.27	.2216
221	837	838	866	18.79	18.59	18.80	18.72	27.01	.0018230	182.30	.2358
258	800	800	882	-	18.17	18.11	18.14	26.17	.0018565	185.65	.2402
292	766	767	914	16.02	16.34	16.33	16.23	23.41	.0019777	197.77	.2558
324	761	761	840	-	16.71	16.74	16.72	24.12	.0019449	194.49	.2516
352	766	792	757	13.06	13.28	13.26	13.20	19.04	.0022135	221.35	.2863
380	727	726	791	15.03	15.38	15.48	15.29	22.06	.0020443	204.43	.2645
411	700	712	784	14.82	15.03	15.03	14.96	21.58	.0020690	206.90	.2677
436	678	740	722	15.73	15.85	16.02	15.86	22.88	.0020033	200.33	.2592
466	678	679	730	12.40	12.66	12.69	12.58	18.15	.0022703	227.03	.2937
500	657	658	717	19.40	19.69	19.60	19.56	28.22	.0017768	177.68	.2298
528	636	638	716	20.56	20.74	21.18	20.82	30.04	.0017122	171.22	.2215
559	637	641	666	21.20	21.48	21.74	21.47	30.98	.0016809	168.09	.2174
592	603	607	703	23.35	23.71	24.01	23.69	34.18	.0015830	158.30	.2048
629	588	593	703	17.95	19.02	18.19	18.38	26.52	.0018424	184.24	.2383
676	597	629	618	14.16	14.00	14.20	14.12	20.37	.0021351	213.51	.2762
729	580	603	616	16.18	16.34	16.51	16.34	23.57	.0019702	197.02	.2549
816	576	568	612	70.48	-	-	70.48	101.70	.0007368	73.68	.0953
943	526	543	681								
980											
TOPLAM:									.0368405	3684.05	4.7658

Tablo 4.2.4

TR-2 REAKTÖRÜ SR-1 KONTROL CUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EĞRİSİ



(Gücün iki kat olma zamanı kullanılarak) 22.2.1993



TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL CUBUĞU KALİBRASYONU (2 KW KRİTİK)

19.4.1993

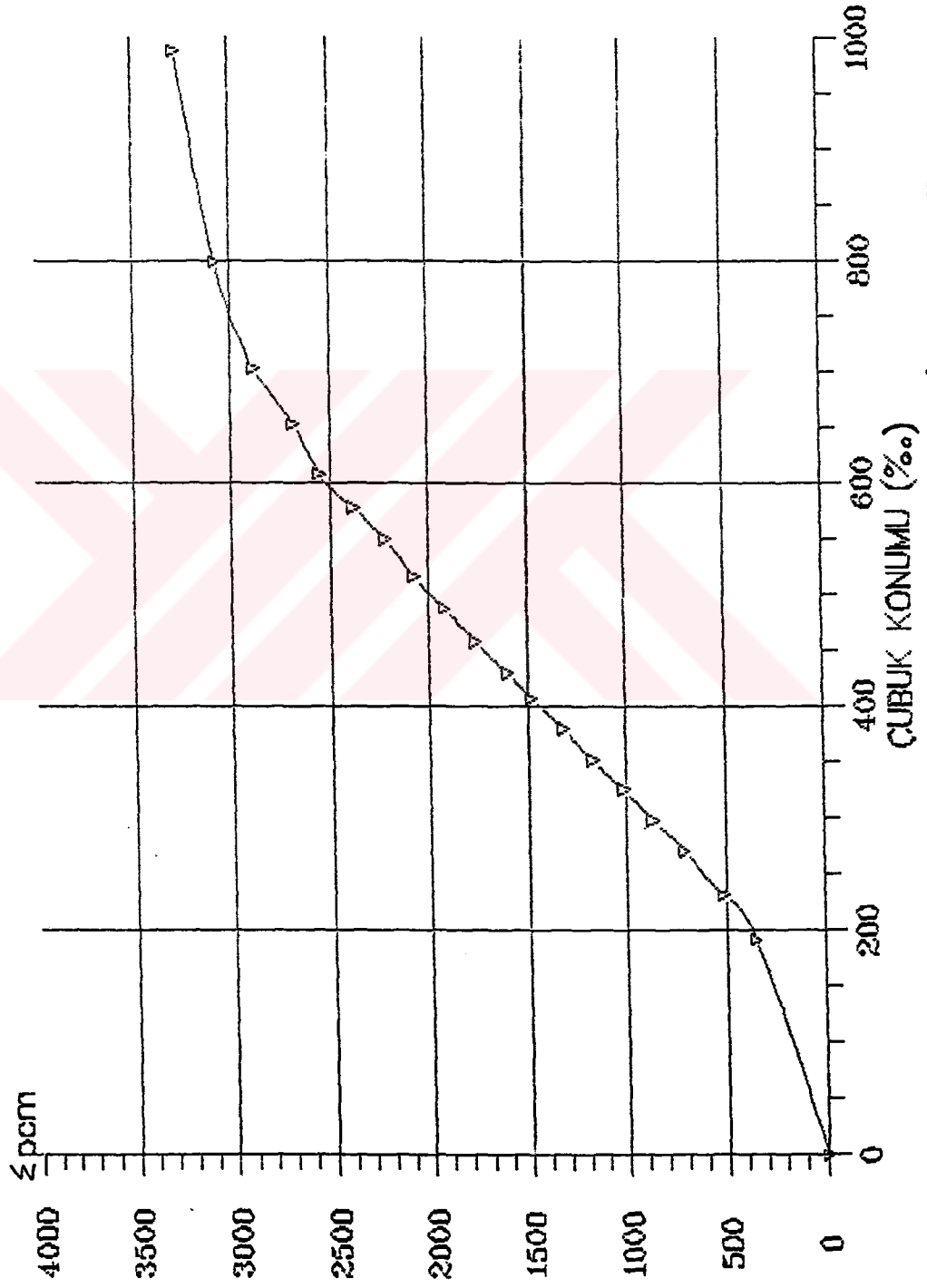
CUBUK KONUMLARI				PERYOD T	INHOUR DENKLEMİNİN KÖKÜ S0	REAKTİVİTE \$	REAKTİVİTE pcm	REAKTİVİTE dk/k
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2					
980	1011	995	192			* .4595	* 355.20	* 0.0035520
980	1011	995	231	33.70	.0297	.2115	163.53	.0016353
978	973	895	271	25.40	.0394	.2501	193.31	.0019331
890	887	927	298	36.50	.0274	.2012	155.55	.0015555
973	849	898	326	39.50	.0253	.1913	147.90	.0014790
816	833	926	352	36.20	.0276	.2021	156.26	.0015626
781	798	960	380	40.10	.0249	.1894	146.40	.0014640
800	807	812	407	34.20	.0292	.2093	161.83	.0016183
767	769	825	430	49.30	.0203	.1656	127.99	.0012799
755	754	798	458	34.50	.0290	.2085	161.14	.0016114
744	740	758	488	37.50	.0267	.1980	153.04	.0015304
727	725	735	516	36.50	.0274	.2012	155.55	.0015555
690	690	750	550	39.00	.0256	.1928	149.01	.0014901
675	681	735	578	34.50	.0290	.2085	161.14	.0016114
668	672	703	608	32.80	.0305	.2150	166.21	.0016621
618	620	763	653	46.90	.0213	.1710	132.18	.0013218
632	631	685	703	24.50	.0408	.2551	197.18	.0019718
597	602	685	799	25.50	.0392	.2493	192.75	.0019275
590	580	665	988	24.80	.0403	.2533	195.81	.0019581

TOPLAM: 4.2327 3271.98 .0327198

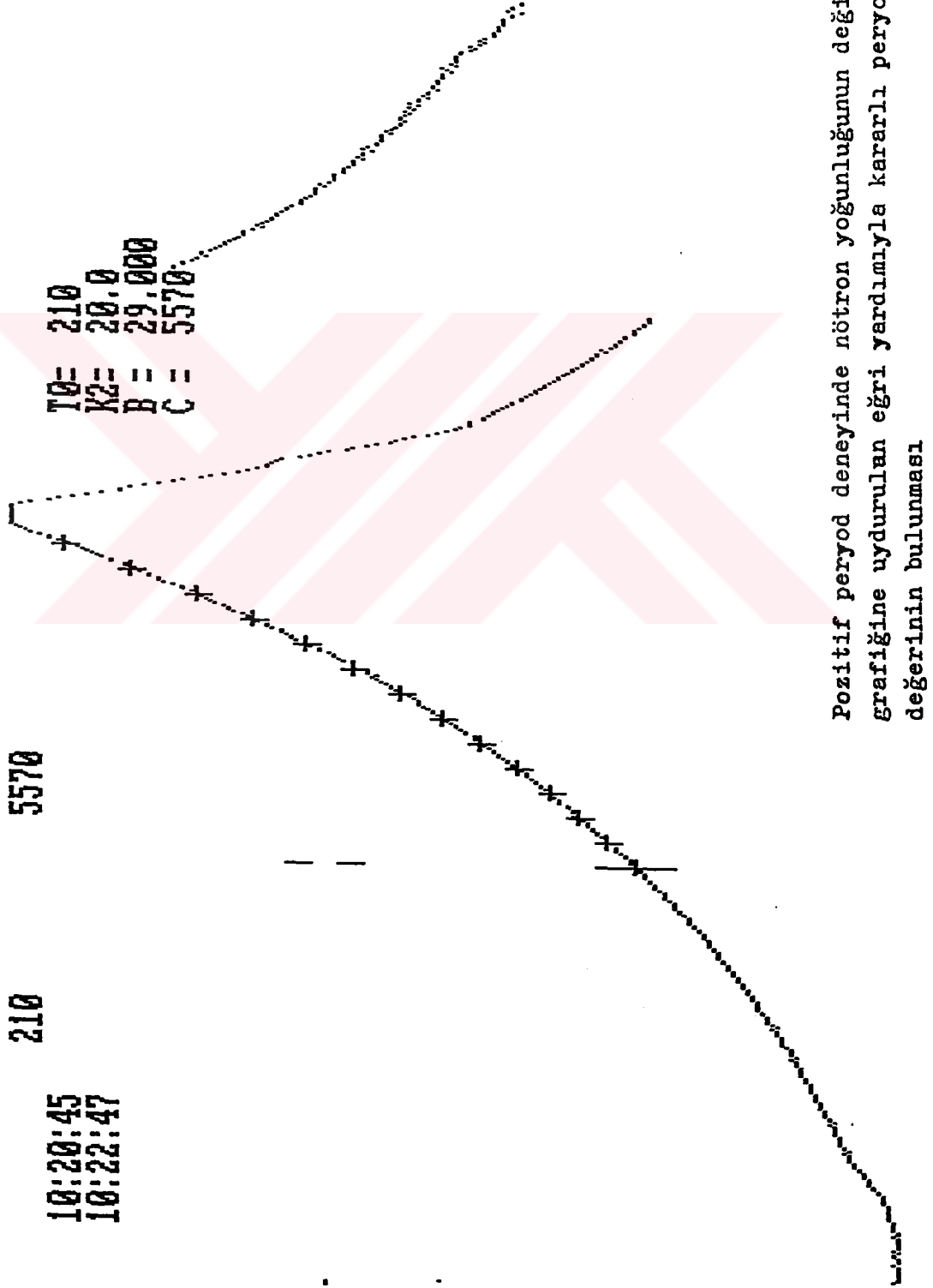
* CR-2 kontrol cubuğu tamamen icerde iken reaktör kritik olamadığından, bu cubuğun 2 kW'da kritik olduğu 192 konumundan önceki reaktivite değeri ilk deneyden alınmıştır.

Tablo 4.2.5

TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL ÇUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EĞRİSİ



(Inhour Denkleminin kökü kullanılarak) 19.4.1993



Pozitif peryod deneyinde nötron yoğunluğunun değişim grafiğine uydurulan eğri yardımıyla kararlı peryod değerinin bulunması

TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL CUBUGU KALİBRASYONU (2 KW KRİTİK)

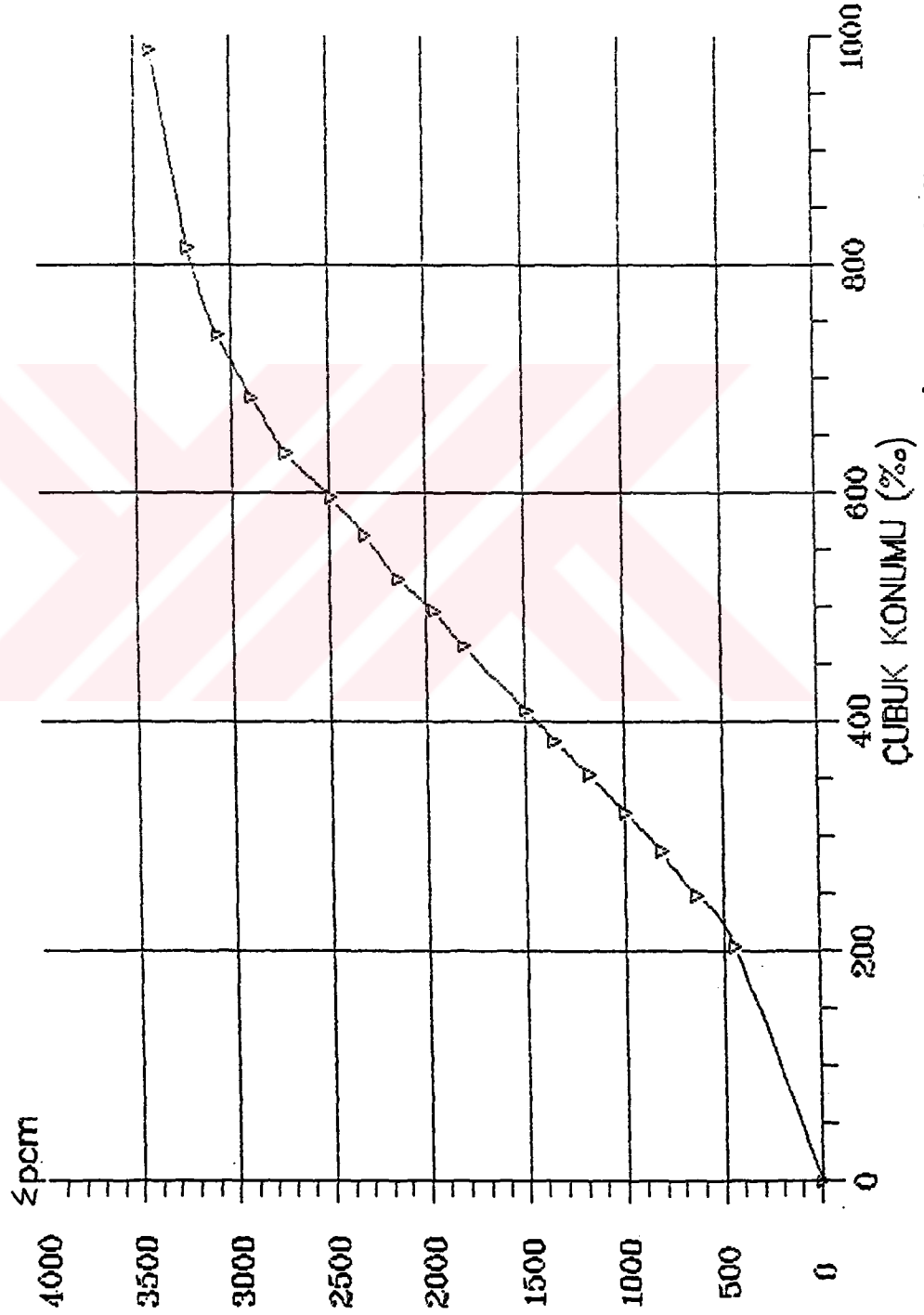
10.5.1993

CUBUK KONUMLARI				PERYOD	INHOUR DENKLEMİNİN KOKU S0	REAKTİVİTE	REAKTİVİTE	REAKTİVİTE
SR-1	SR-2	CR-1	CR-2	T		\$	pcm	dk/k
990	1010	996	204			* .5763	* 445.56	* 0.0044556
980	1010	996	249	26.00	.0385	.2466	190.66	.0019066
946	943	909	287	29.00	.0345	.2315	178.92	.0017892
873	873	956	321	28.70	.0348	.2329	180.02	.0018002
836	831	960	354	29.00	.0345	.2315	178.92	.0017892
820	821	875	383	29.80	.0336	.2277	176.05	.0017605
788	791	862	410	40.20	.0249	.1893	146.30	.0014630
751	755	903	439	36.80	.0272	.2002	154.75	.0015475
743	743	840	466	34.60	.0289	.2080	160.81	.0016081
724	725	800	497	38.40	.0260	.1949	150.64	.0015064
710	715	774	525	29.30	.0341	.2300	177.83	.0017783
687	692	754	563	29.10	.0344	.2310	178.55	.0017855
665	669	752	596	30.10	.0332	.2264	175.01	.0017501
653	649	742	635	19.30	.0518	.2907	224.73	.0022473
631	639	704	684	28.70	.0348	.2329	180.02	.0018002
616	622	688	738	31.40	.0318	.2207	170.62	.0017062
614	608	655	815	39.10	.0256	.1927	148.92	.0014892
583	587	675	988	25.60	.0391	.2488	192.36	.0019236
TOPLAM:						4.4122	3410.70	.0341070

* CR-2 kontrol cubugu tamamen icerde iken reaktör kritik olamadigindan, bu cubugun 2 kW'da kritik oldugu 204 konumundan önceki reaktivite değeri ilk deneyden alınmiştir.

Tablo 4.2.6

TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL ÇUBUĞU INTEGRAL KALİBRASYON EĞRİSİ



(Inhour Denkleminin kökü kullanılarak) 10.5.1993

4.3. Pozitif Peryod Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonunda Meydana Gelen Hatalar

Peryod metodunda hesaplanan periyodun $\ln$ hour Denkleminde yerine konulmasıyla reaktivite bulunuyordu. Bu metotta kullanılan ana felsefe, nötron yoğunluğunun zaman ile üstel olarak değişmesinin göz önüne alınmasıdır.

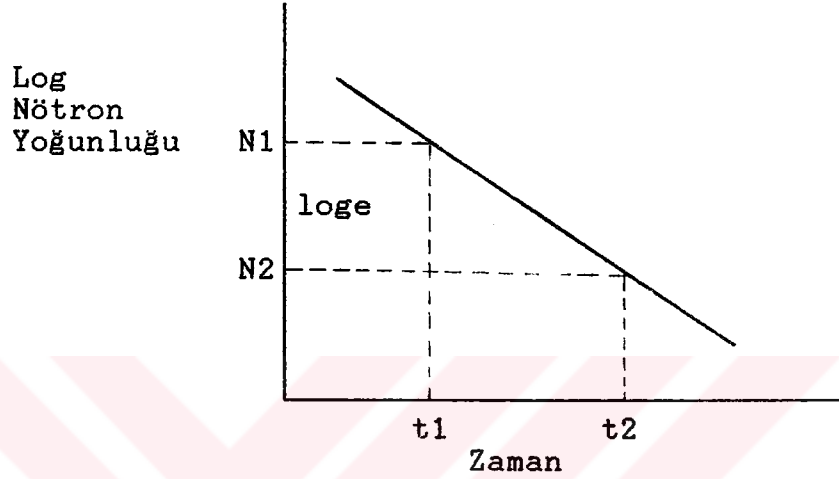
Belirli deneysel koşullarda elde edilen sonuçlar, periyod ölçümünde doğru sonuçlar elde edebilmek için, reaktivitenin pozitif bir adım değişiminden sonra dakikalarca beklemek gerekeceğini göstermiştir. Ayrıca reaktör başlangıçta çok az alt kritik olsa bile, harici kaynak içermesi halinde, periyod ölçümündeki bekleme zamanında önemli bir artış olabilir. Prensip olarak periyod gözlemlerinde pozitif ve negatif reaktivitelerin her ikisi de elde edilirse de, negatif reaktivite durumunda pratikte ciddi zorluklar bulunmaktadır.

Yapılan deney ve hesaplamalara göre, farklı başlangıç k değerlerinde pozitif bir adım değişiminden sonra gözlemlenen periyodun, asimtotik değerden sapması, zamanın fonksiyonu olarak çizildiğinde farklı grafikler elde edilir. Bulunan sonuçlar, verilen pozitif bir adım değişiminden sonra, gözlemlenen periyodun asimtotik değerden aynı oranda sapması için, daha alt kritik durumlarda daha fazla beklemek gerektiğini göstermiştir. [10]

Başka bir deneyde $k=1$ durumunda, pozitif asimtotik periyodun bir fonksiyonu olarak, asimtotik değerin % 1, % 5 ve % 10'u arasında bir periyod gözlenebilmesi için, reaktivitedeki pozitif bir adım değişiminden sonraki bekleme zamanları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre asimtotik değerin % 1'ine kadar olan değerler için bekleme zamanları, % 5 ve % 10'u için gereken bekleme zamanlarından daha fazladır. Aynı şekilde asimtotik değerin % 5'ine kadar olan değerler için bekleme zamanları, % 10'u için gerekli olan bekleme zamanlarından daha uzun bulunmuştur.

Aynı değer negatif reaktivite adımları için tekrarlandığında, benzer sonuçlar bulunur. Ancak negatif adım reaktivite için gereken bekleme zamanları, pozitif adım reaktivite için elde edilen bekleme zamanlarından çok daha fazladır. [10]

Peryod hesaplamak için kullanılan alışıl gelmiş deneysel işlemde, önce nötron yoğunluğu zamanın bir fonksiyonu olarak yarı logaritmik bir kağıda çizilir ve doğrusal değişimi beklenir.



Nötron yoğunluğu ekseninde seçilen N1 noktasından $\log e = 0.43$ azaltılarak N2 noktası elde edilir. Bu iki değere zaman ekseninde karşılık gelen t1 ve t2 noktaları arasındaki fark peryodu verir. [2]

$$\text{Peryod} = t_2 - t_1$$

Ancak böyle bir metotta doğrusallıktan az bir sapmayı anlamamanın zor olduğu görülebilir. Yapılan gözlemler sonunda, hesaplanan noktalardan oldukça düz bir doğru çizilmiş olması halinde bile, bu doğrudan hesaplanan peryodun, asimtotik değerden farklı olduğu bulunmuştur.

Çizilen nötron yoğunluğu zaman eğrilerinde dikkatli bir inceleme yapıldığında, bulunan noktalarda hafif bir kavisliğin olduğu gözlenmiştir. Noktaların istatistik olarak düzensiz değişiminden dolayı, hafif bir kavislenmeyi bile deneysel olarak gözleyebilmek çok zor olmaktadır.

Negatif peryotlardaki hataların reaktiviteye yansiyarak meydana getirdikleri hatalar, aynı mertebeden pozitif peryotların reaktivitede oluşturduğu hatalardan çok daha fazla olmaktadır.

Kendi kendine fisyon veya fotonötron üretimi sebebiyle bir çok sıfır güç reaktörlerinde ihmal edilir olmayan bir sabit harici nötron kaynağı bulunmasından dolayı, yapılan gözlemler bu şekildeki sabit kaynaklı reaktör durumu için de tekrarlanabilir.

$\rho=0$ ve harici kaynağı olmayan limit durumlarda doğruluk elde edebilmede olağanüstü bir bekleme zamanı gerekmiyordu. Ancak sıfır olmayan harici kaynak durumları için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, periyod gözlemlerinde reaktivite adımından sonra periyodun doğrulukla saptanmasında, periyod binlerce saniyeye yükseldiğinde onlarca dakika mertebesinde beklemek gerekmektedir. Bu yüzden tehlike katsayısı denemeleri gibi küçük reaktivite durumlarında periyod ölçümlerinin kullanılıp kullanılmayacağı tartışma konusudur. Uzun bekleme zamanlarının gerekli olması, nötron yoğunluğunun zaman içerisinde üstel olarak artmasından dolayıdır.

Yapılan gözlemlere göre daha kısa nötron ömürleri, reaktivitede adım değişiminden sonra, verilen bir zaman için, daha küçük hatalar verir. Bununla birlikte nötron ömrünün etkisi oldukça önemsizdir. Nötron ömrünün çeşitli parametrelere değişik etkisinden dolayı, bu sonuç beklenir.

Gecikmiş nötron parametrelerinin etkisinin incelenmesinde, 6 gecikmiş nötron parametresi içeren birbirine yakın değerleri olan iki grup ile, 15 gecikmiş nötron parametresinden meydana gelen ve diğer ilk iki gruptan farklı değerlere sahip olan bir üçüncü grup göz önüne alınarak deneyler yapılmıştır. Deneyde, değişik asimtotik periyodlar ve $k=1$ ve $k=0.9999$ için pozitif reaktivite adımından sonra asimtotik değerin % 1, % 5 ve % 10 içinde bir periyod gözleyebilmek için gerekli bekleme zamanları bulunup liste haline getirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, birbirine yakın gecikmiş nötron parametreleri olan iki grup için görülen farklılıklar önemsizdir. Her iki gruptaki parametreler arasındaki değişiklikler çok büyük değilse, bu sonuç beklebilir. Ancak daha fazla ve farklı gecikmiş nötron parametrelerine sahip grubun kullanımında, özellikle büyük periyodlar için $k=1$ 'in sonuçları, diğer birbirine yakın parametreler içeren gruplara nazaran büyük farklılıklar gösterir. 15 gecikmiş nötron parametresi içeren grup için, geçici rejim terimlerinin önemi daha fazla olduğundan, bu farklı grup için daha fazla bekleme zamanları bulunmuştur. [10]

$k < 1$ durumunda değişik gecikmiş nötron parametrelerinin kullanımı, sonuçlar üzerinde nisbeten küçük etkiler olarak görülür. Bunun sebebi ilgilenilen zamanda geçici rejim terimlerinin önemli olmamasındandır. Bu durumda sonuçları belirleyen sabit terimlerin etkileridir. Gecikmiş nötron parametrelerinin sonuca katkısı yoktur. [10]

Sonuç olarak harici kaynaklı bir sistemde reaktivite saptanması için, pozitif peryod gözlenmesinin, negatif peryod gözlemeye nazaran daha avantajlı olduğu anlaşılır. ihmal edilemeyen bir kaynağa sahip bir sistem için negatif reaktivitelerden sakınmak gerektiği sonucu çıkarılır. ihmal edilemez harici kaynağa sahip sistemlerin hepsinde, reaktivite değişimlerinden sonra doğru sonuç alınabilmesi için aynı mertebeye zamana gereksinim duyulduğu gözlenmiştir.

TR-2 Reaktörünün kontrol çubuklarının kalibrasyonu için yapılan deneysel çalışmada meydana gelebilecek hataların tesbiti için, örneğin 19.4.1993 tarihinde yapılan pozitif peryod metodu deneyini göz önüne alalım.

Bu uygulamada bilgisayara kaydedilen eğri yardımıyla bulunan kararlı reaktör peryodunun belirlediği Inhour Denklemine birinci kökünün, ilgili bilgisayar programına veri olarak girilmesiyle reaktivite bulunuyordu. Bu kökün dışında kalan ve ihmal edilen diğer 6 kökün değerleri aslında çok küçük değillerdir. Bu köklerin sönümlenmesi için belli bir müddet geçmelidir. Bu nedenle bilgisayara alınan nötron yoğunluğu grafiğine uydurulmak istenen eğri tesbiti için seçilen nokta, reaktöre reaktivite verildikten belli bir zaman sonra olmalıdır.

Bu deneyde ilk veri olan ve inhour Denklemi'nin pozitif köküne karşılık gelen $s_0 = 0.0297$ kökü ve diğer 6 adet negatif kökler ile, s_0 köküne karşılık gelen reaktivite ve 20 saniye sonra gücün $P(t)/P(0)$ oranları, kullanılan bilgisayar programından görülebilir. Bu değerler aşağıdaki gibidir.

Reaktivite:	0.211544	\$
0. Kök	: 0.029700	1/s.
1. "	: -0.013429	1/s.
2. "	: -0.056854	1/s.
3. "	: -0.179218	1/s.
4. "	: -0.996157	1/s.
5. "	: -2.870017	1/s.
6. "	: -129.060897	1/s.

$t_0 = 20$ s. sonraki $P(t)/P(0)$ değerleri:

0. kök için: 2.945698
 1. " " : -0.029090
 2. " " : -0.061843
 3. " " : -0.002466
 4. " " : -0.000000
 5. " " : -0.000000
 6. " " : 0.000000
 Sabit terim: 0.000000

Bütün kökler ve bir kök kullanılarak güçte meydana gelen hata hesabı yapılmıştır. 20 saniye sonra yalnız bir kök kullanılmasıyla güçte yapılan hata % 3.17 olarak bulunmuştur. Aynı işlemler değişik bekleme zamanları için aşığıdaki sonuçlar bulunur.

Bekleme süresi (s.)	Bir kök kullanılmasıyla güçte yapılan hata (%)
20	3.17
50	0.43
100	0.034
200	0.00042

Bulunan değerlerden görüldüğü gibi bekleme süresi arttıkça, bir kök kullanılmasının güçte meydana getirdiğı hata azalmaktadır.

Bir kök kullanılmasının bekleme süresine bağılı olarak kararlı peryotta meydana getirdiğı hata miktarları aşığıda verilmiştir.

Bekleme süresi (s.)	Bir kök kullanılmasıyla kararlı peryod'da yapılan hata (%)
20	5.255
50	2.891
100	0.011
200	0.002

Görüldüğü gibi bekleme süresi arttıkça bir kök kullanımının kararlı peryod üzerindeki hata oranı düşmektedir.

Kökte meydana gelen hata reaktivite hesabına da yansır. Örneğin $\rho=10$ cent ve $\rho=20$ cent reaktivite değerleri için ilk kökün tesbitinde % 1'den % 20'ye kadar yapılan hatanın, reaktivite hesabında meydana getirdiği hata miktarları şekil 4.3.1 ve 4.3.2'de gösterilmiştir. Çizilen grafiklere göre kökte yapılan hata arttıkça reaktivitede yapılan hata lineer olarak artmaktadır.

Reaktöre her adımda örneğin 10 ¢'lik reaktivite girilerek, bir kontrol çubuğunun bulunan toplam reaktivite değerini, 20 ¢'lik adım reaktivite girilerek bulunan değerle karşılaştıralım. Örneğin bir kök kullanılmasıyla kökte yapılan % 1'lik hata için, 10 ¢'lik reaktivite girişiyle reaktivite hesabında % 0.776 ve 20 ¢'lik reaktivite girişiyle reaktivitede % 0.626 hata yapılmaktadır. Yapılan hata aynı oranda çubuğun toplam reaktivite değerine yansır. Buna göre kökte yapılan % 1'lik hata için, her adımda 20 ¢'lik adım reaktivite girişiyle hesaplanan çubuğun toplam reaktivite değeri, 10 ¢'lik adım reaktivite girişiyle elde edilen değere nazaran % 0.15 daha az hatalı bir sonuç verir.

Kökte yapılan örneğin % 10'luk bir hataya karşılık, değişik reaktivite değerlerinde yapılan hata yüzdeleri şekil 4.3.3'de görülebilir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, hesaplanacak reaktivite değeri küçüldükçe, Inhour Denkleminin kökünde yapılan hatanın reaktivite hesabında meydana getirdiği hata artmaktadır.

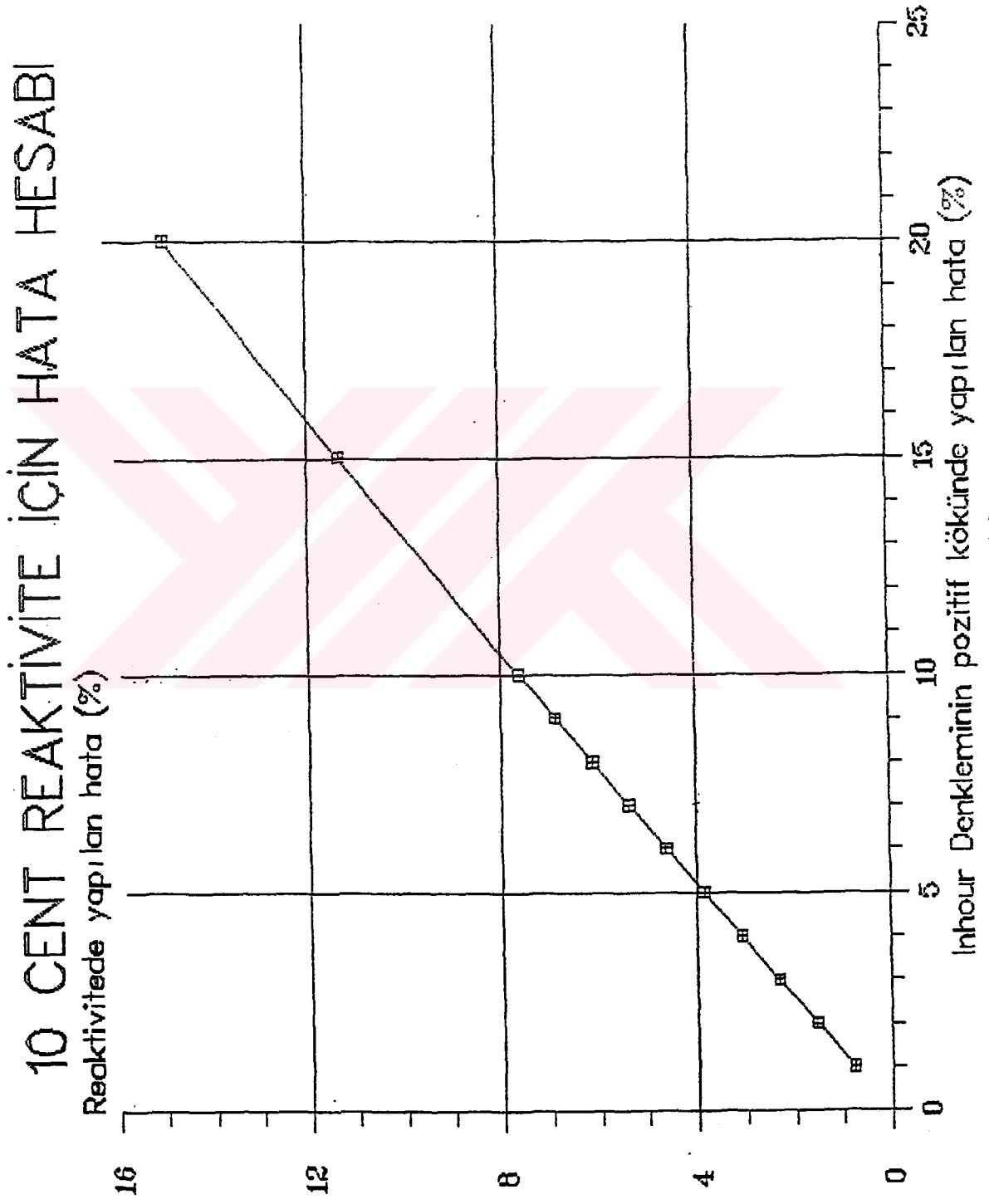
Bir kök kullanılmasıyla yapılan hatanın, bekleme süresine bağlı olarak peryotta ve reaktivitede meydana getirdiği değişim aşağıda verilmiştir.

Bekleme Süresi (s.)	Peryod (s.)	Reaktivite (\$)	Reaktivitede Hata (%)
10	27.316	0.23970	13.376
20	32.016	0.21814	3.178
30	33.132	0.21363	1.045
40	33.478	0.21228	0.406
50	33.603	0.21180	0.179
60	33.654	0.21160	0.085
70	33.677	0.21151	0.042
80	33.687	0.21147	0.023
90	33.693	0.21145	0.014
100	33.696	0.21144	0.009
150	33.699	0.21143	0.004
200	33.699	0.21142	0
250	33.699	0.21142	0

Bulunan değerlere göre reaktivite hata yüzdeleri gözönüne alınarak 50 s.'den sonraki bekleme süreleri uygun kabul edilebilir. Bekleme süresi arttıkça, reaktivite hesabında yapılan hata azalmaktadır. Ancak çok uzun bekleme süresi, g artışının meydana getirdiği sıcaklık artışının reaktiviteyi etkilemesi nedeniyle istenmez. Sonuç olarak yaklaşık 50-200 s. aralığında bekleme süresi uygun olmaktadır. Bekleme süresine bağlı olarak reaktivite değişiminin grafiği şekil 4.3.4'den görülebilir.

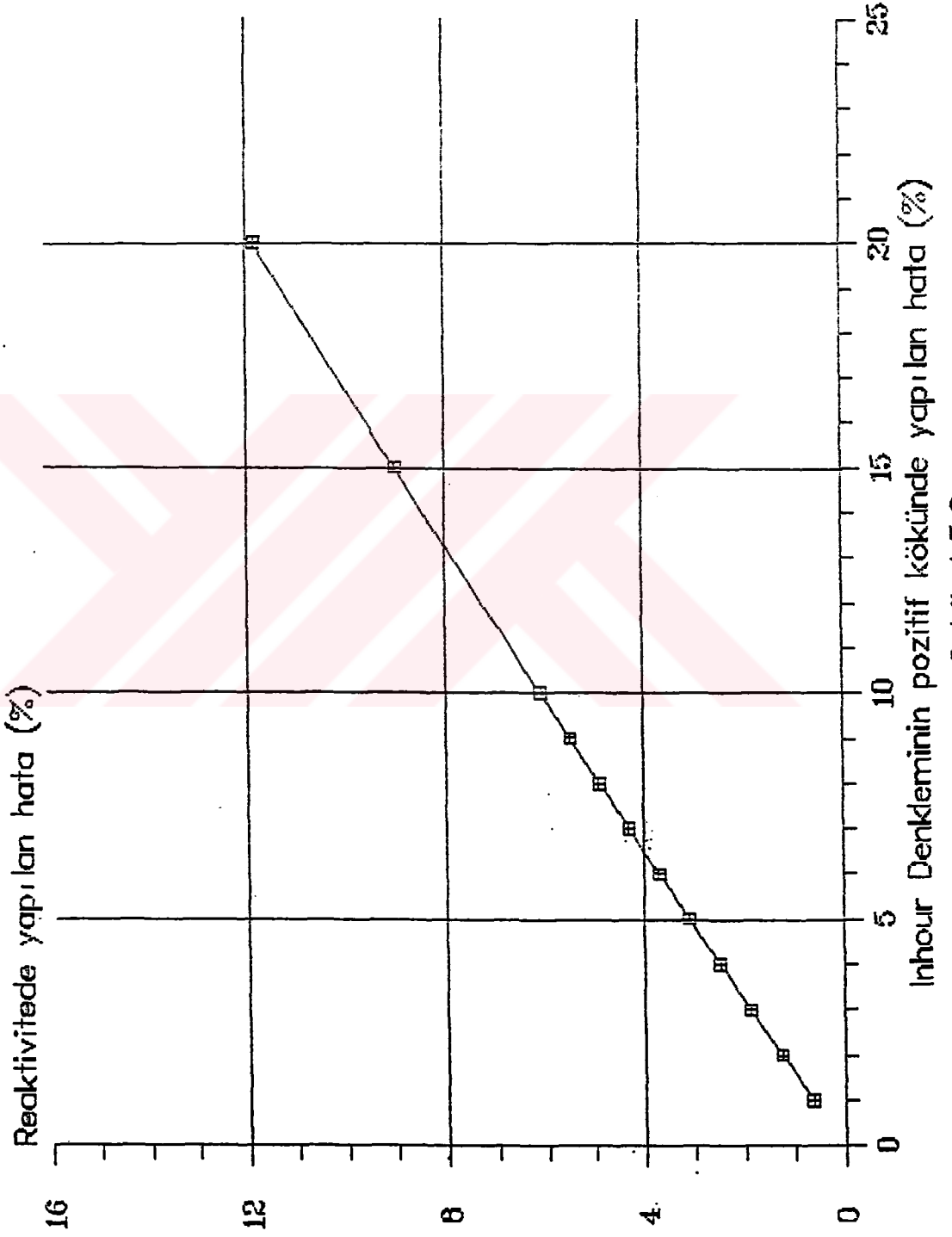
Reaktöre negatif reaktivite verilmesi durumunda Inhour Denkleminin ilk iki kökü birbirine daha yakın olup, bekleme sresinin büyük seçilmesi durumunda bile meydana gelen hata büyük olmaktadır.

içinde kaynak bulunan bir reaktöre negatif reaktivite girilmesi halinde, t_0 bekleme sresinin büyük seçilmesi aksine olarak yapılan hatayı artırır. Negatif reaktivitelerde, kaynağın etkisini azaltmak amacıyla kritik olunan g değeri büyük seçilmeli ve g on kat azalana kadar ölçüm alınmalıdır. Negatif reaktivite girilmesinde, ilk iki kökün birbirinden uzaklaştırılması amacıyla, verilen reaktivite büyük olmalıdır. [11]



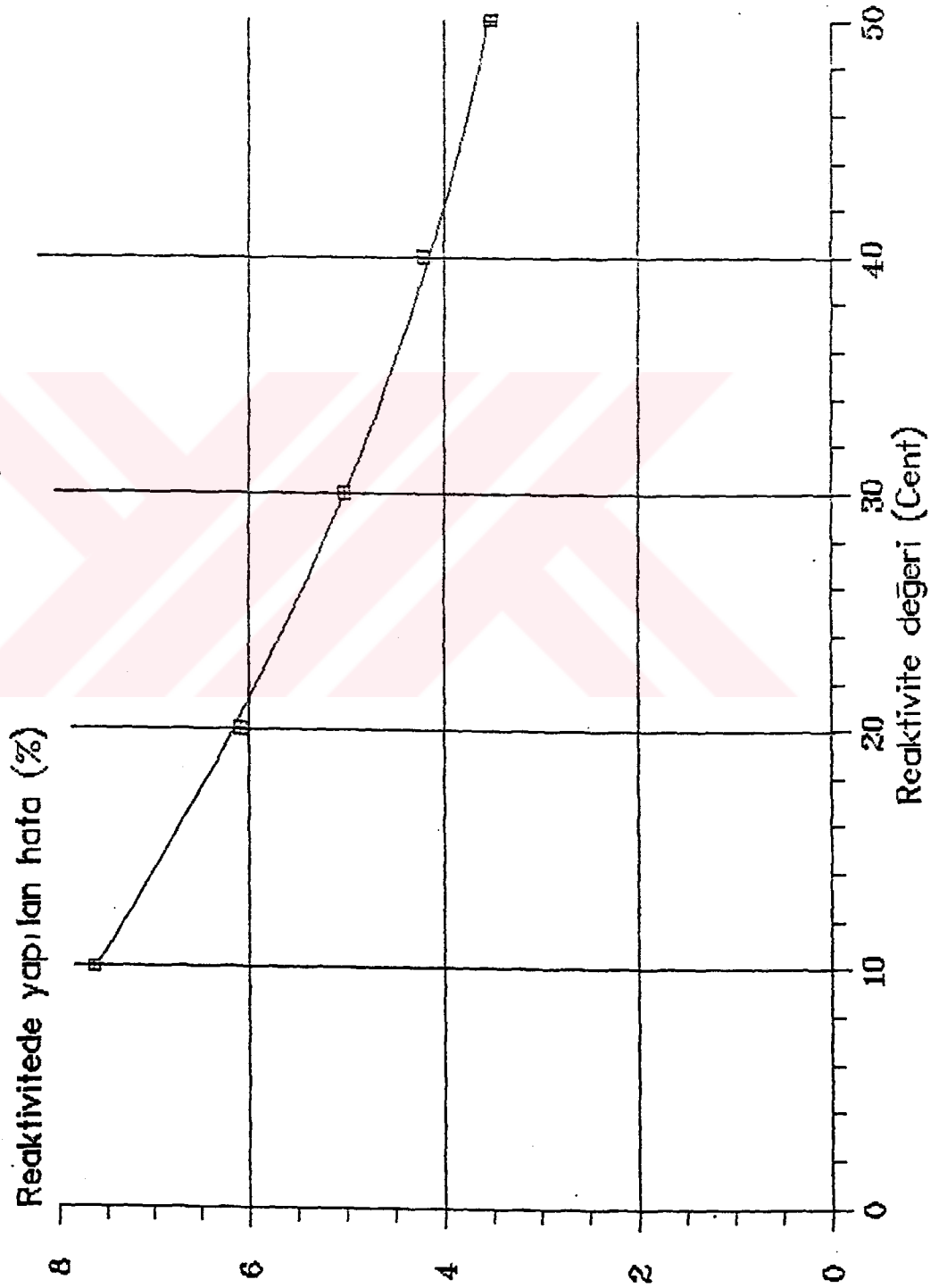
Şekil 4.3.1

20 CENT REAKTİVİTE İÇİN HATA HESABI



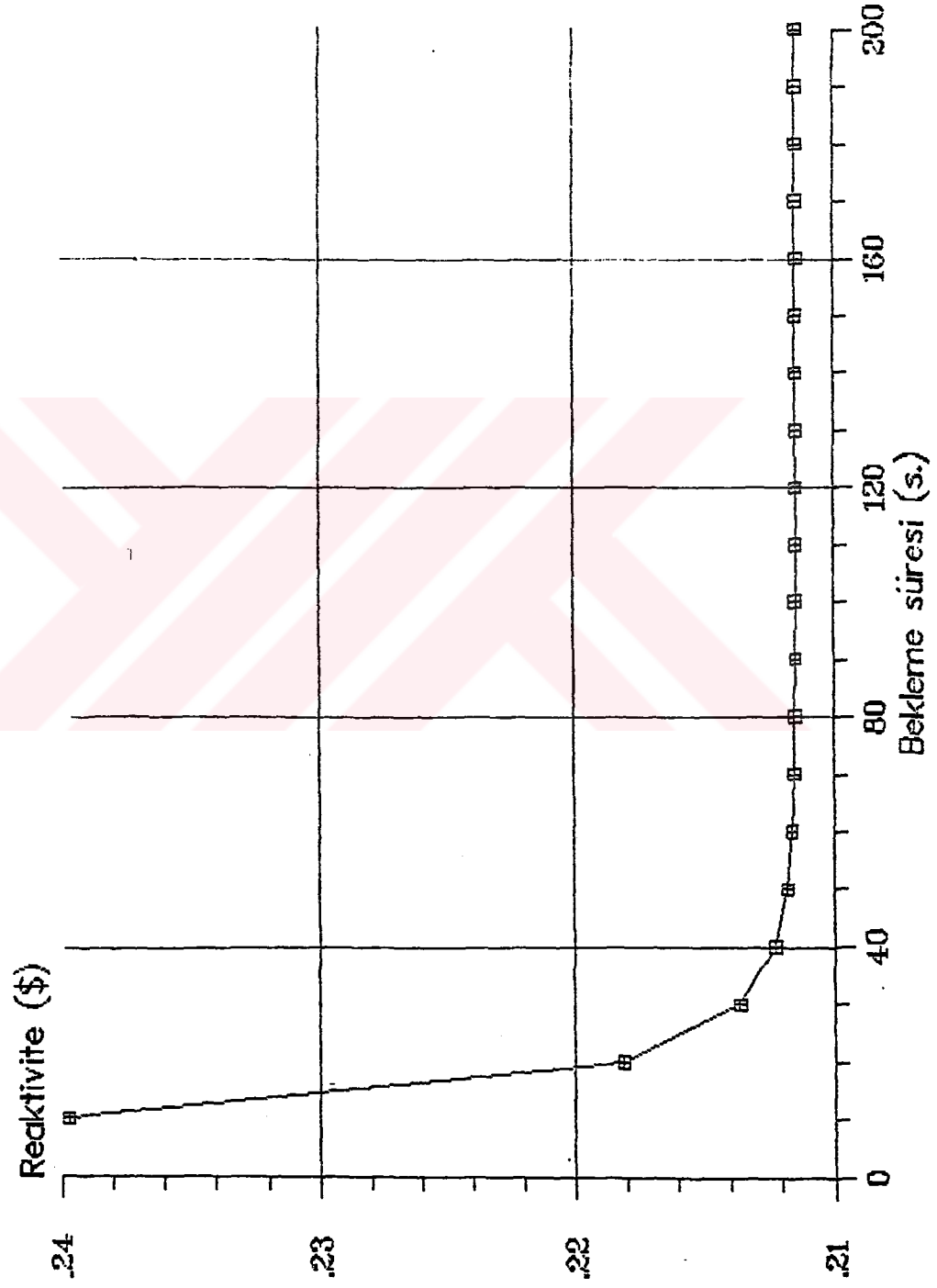
Şekil 4.3.2

İN HOUR DENKLEMİNİN POZİTİF KÖKÜNDE %10 HATA İÇİN



Şekil 4.3.3

BEKLEME SÜRESİNE GÖRE REAKTİVİTE DEĞİŞİMİ



Sekil 4.3.4

4.4. TR-2 Reaktöründe Çubuk Düşürme Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonu Deneyi

TR-2 Reaktörünün CR-1 ve CR-2 kontrol çubuklarının reaktivite değerleri, çubuk düşürme metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu deneyde uygulanan yöntem aşağıda verilmiştir.

1- Toplam reaktivite değeri bulunmak istenen kontrol çubuğu en üst konuma çekilir.

2- Diğer üç çubuk hemen hemen aynı seviyelerde olmak üzere yukarı çekilerek, reaktör 2 kW'da kritik yapılır. Bu durumda bir müddet beklenir.

3- Nötron yoğunluğu bilgisayara kaydedilirken üzerinde deney yapılan çubuk aniden reaktör kalbine düşürülür.

4- Bilgisayara alınan nötron yoğunluğu-zaman grafiği üzerinde, kritik duruma karşılık gelen yaklaşık 15 noktanın ortalaması alınarak başlangıçtaki nötron yoğunluğu (n_0) bulunur.

5- Çubuk düştükten ve ani geçici rejimden sonraki nötron yoğunluğu (n_1), nötron bozunum eğrisinden saptanır.

6-

$$\rho = \frac{n_0 - n_1}{n_1} \quad (4.4.1)$$

(4.4.1) formülüne göre çubuğun toplam reaktivite değeri (ρ) cinsinden bulunur.

Bilgisayara kaydedilen nötron yoğunluğunun bozunum eğrileri Şekil 4.4.1, Şekil 4.4.2, Şekil 4.4.3, Şekil 4.4.4 ve Şekil 4.4.5'de yer almaktadır. Yapılan deneylere ait veriler Tablo 4.4.1 ve Tablo 4.4.2'de verilmektedir.

DAT NO = 150
SAYIM = 10923

P --->
Q <---



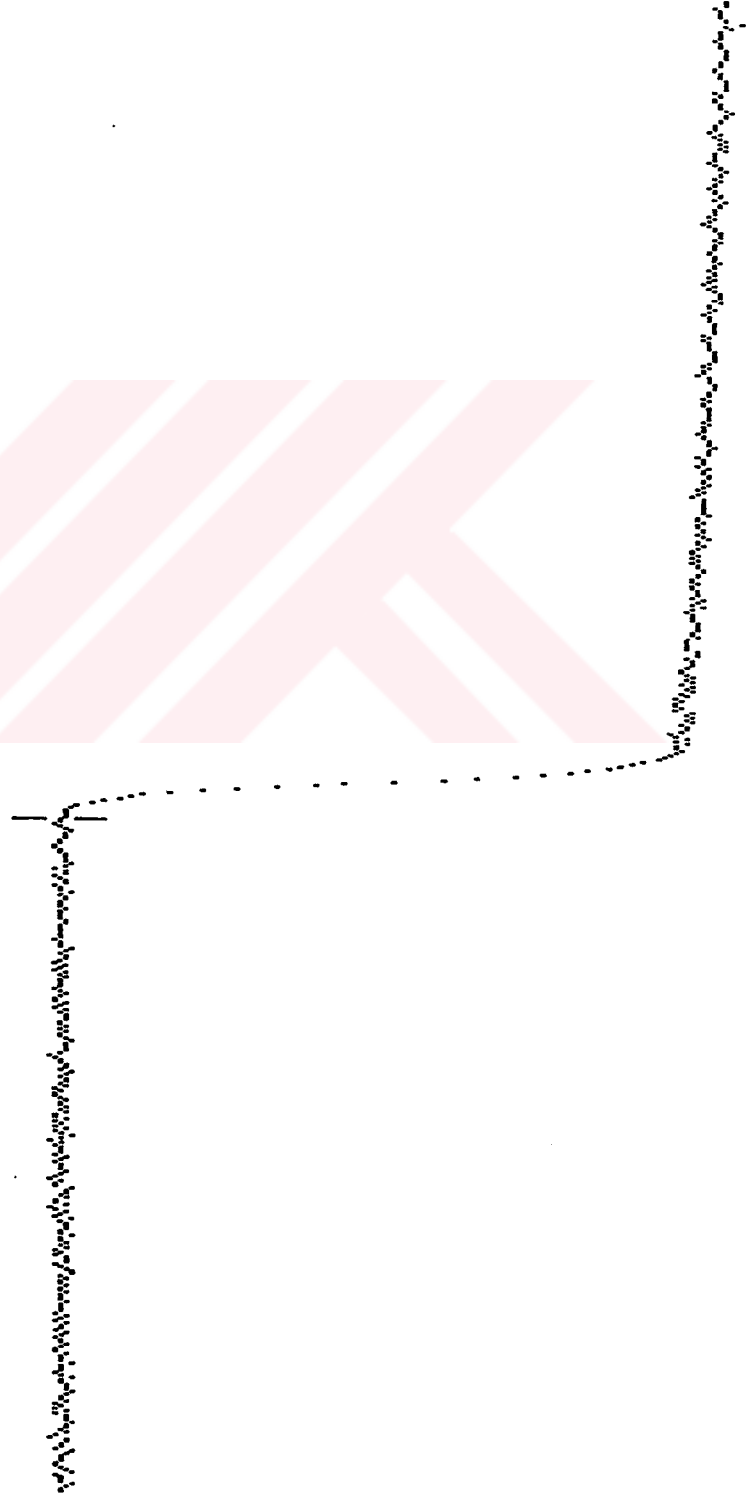
Çubuk düşürme deneyinde nötron yoğunluğunun değişimi

Şekil 4.4.1

Deney 1 (17.5.1993)

DAT NØ = 286
SAYIM = 11002

P --->
Q <---



Çubuk düşürme deneyinde nötron yoğunluğunun değişimi

DAT NO = 231
SAYIM = 10918

P --->
Q <---



Çubuk düşürme deneyinde nötron yoğunluğunun değişimi

DAT NÖ = 196
SAYIM = 11037

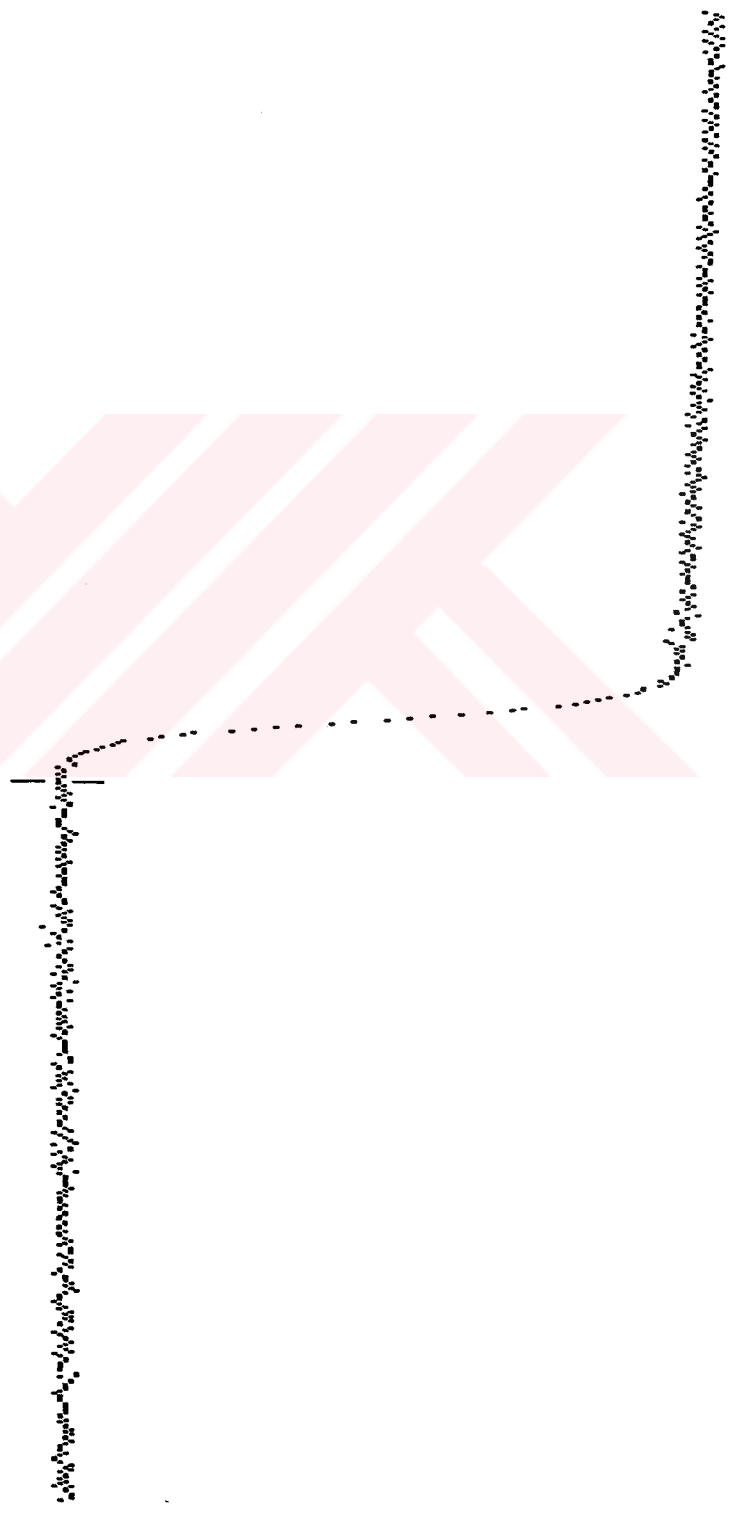
P --->
Q <---



Çubuk düşürme deneyinde nötron yoğunluğunun değişimi

DAT NO = 306
SAYIM = 11030

P --->
Q <---



Çubuk düşürme deneyinde nötron yoğunluğunun değişimi

Deney 4.4.5

Deney 3 (24.5.1993)

TR-2 REAKTÖRÜ CR-2 KONTROL CUBUGU İÇİN CUBUK DÜŞÜRME DENEYİ (2 kW KRİTİK) 17.5.1993

DENEY	CUBUK KONUMLARI				KRİTİK DURUMDAKİ NÖTRON SAYIMI (N0)	CUBUK DÜŞÜKTEN SONRAKİ NÖTRON SAYIMI (N1)	REAKTİVİTE (β)
	SR-1	SR-2	CR-1	CR-2			
1	614	605	608	988	10936	2131	4.13
2	617	618	595	988	11013	2043	4.39

Tablo 4.4.1

TR-2 REAKTÖRÜ CR-1 KONTROL CUBUGU İÇİN CUBUK DÜŞÜRME DENEYİ (2 kW KRİTİK) 24.5.1993

DENEY	CUBUK KONUMLARI				KRİTİK DURUMDAKİ NÖTRON SAYIMI (N0)	CUBUK DÜŞÜKTEN SONRAKİ NÖTRON SAYIMI (N1)	REAKTİVİTE (β)
	SR-1	SR-2	CR-1	CR-2			
1	616	615	996	611	10936	2038	4.37
2	616	616	996	611	11019	1997	4.51
3	616	616	996	611	11004	2010	4.47

Tablo 4.4.2

4.5. Çubuk Düşürme Metodu ile Kontrol Çubuğu Kalibrasyonunda Meydana Gelen Hatalar

Çubuk düşürme metodunda, çubuk düştükten sonra meydana gelen ani atlama geçici rejim davranışından sonraki nötron akı seviyesinin saptanmasının pratik zorlukları vardır. Bu methodda reaktöre negatif reaktivite sokulmasıyla ani atlama geçici rejim davranışı meydana gelmekte ve bunu takiben, geçici nötron kaynağının azalmasına bağlı olarak nötron akısı daha fazla azalmaktadır. Reaktöre verilen negatif reaktivite tam bir adım şeklinde verilememektedir. Bundan dolayı reaktivite girişinin sonundaki ani akı azalması, gecikmiş nötron kaynağının bozunumuna bağlı olan akı azalımının başlangıcı ile üst üste gelmektedir. Böylece deneysel olarak bulunan geçici nötron akı seviyesindeki hata bütün metodun doğruluğunu sınırlamaktadır.

Çubuk düşürme metodunda çubuk düşmeden önceki ve düştükten sonraki akıların eşit olmayan örneklenmesi etkilerinin bulunması sakıncası vardır. Farklı akı örneklemeleri iki sebepten artar. Bunlardan birincisi düşürülen çubuk nedeniyle, sayıcı çevresindeki akı şeklinin yerel perturbasyonundaki değişiklikler, ikincisi ise çubuğun düşmeden önce ve düştükten sonra reaktör kalbindeki nötron akı dağılımının temel modundaki değişikliklerdir.

İlk hata kaynağı, dedekte edici cihazın uygun yerleşimi ile ortadan kaldırılabilir. Bu methodda, bağımsız kinetik eşitliklerinin kullanılmasında, akı dağılımının temel bir büyüklük olarak ele alındığı ve akının uzaysal dağılımının değişmediği varsayıldığından, çubuk düşmeden önce ve düştükten sonra kritik kütlede dedektör cevabının, toplam nötron akısına orantılı olacağı bir yere yerleştirilmesi gerekmektedir.

İkinci hata kaynağı olan temel mod değişimi özellikle büyük reaktiviteler olduğu zaman artar. Bu etkinin düzeltilmesi zordur ve teoride ve temel ifadelerde değişim yapılmalıdır.

Bu metod, oldukça fazla altkritik ortamlarda, büyük değere sahip kontrol çubuklarının şekil etkilerine karşı görterdikleri hassasiyetten dolayı hatalı sonuç verebilir.

Belli bir güç seviyesine getirilen ve bu seviyede gerekli bozunum reaktivitesi verilmesiyle sabit bir değerde tutulan bir reaktör düşünelim. Bir toparlanma zamanının (t) ardından çubuk düşürme deneyi yapılır. Eğer t bütün gecikmiş nötron ve foto nötron yarı ömürleriyle karşılaştırıldığında, onlardan büyük değerde olursa, sistem gerçek dengede olacaktır ve ölçümler doğru sonuç verecektir.

Çubuk düşürme deneyinde, tamamı tamamına gerçek dengeden itibaren bir kaç gün mertebesinde t toparlanma zamanı gereklidir. Fakat $10^2 < t < 10^4$ saniye arasındaki pratik toparlanma zamanları için, öncü grup yoğunluklarının çoğunun, onların gerçek değerlerinden daha küçük olacağı tahmin edilebilir. Bu sebepten dolayı bulunan ani atlama geçici rejim sonrasındaki nötron seviyesi (n_1), daha küçük olacaktır ve bu suretle çubuk düşürme için hatalı bir şekilde daha büyük bir değer ortaya çıkacaktır.

Çubuk düştükten bir kaç ani nötron ömrü içinde ortam, ani nötronların belirlediği alçak bir nötron seviyesine düşmektedir. Pratikte çubuğun düşmesi için gerekli süre, ani nötronların sebep olduğu ani atlama geçici rejim davranışından daha uzun olmaktadır. Bu nedenle, çubuk düştükten ve ani geçici rejimden sonraki nötron seviyesinin saptanması için, deney sırasında kaydedilen nötron bozunum eğrisi üzerinde yapılan extrapolasyon, hataya sebep olabilmektedir.

BÖLÜM. 5

SONUÇ

TR-2 Reaktörünün CR-2 kontrol çubuğuna uygulanan 2 ayrı pozitif peryod metodu deneyinde hesaplanan reaktivite değerleri arasında % 17'lik bir farkın bulunmasının nedeni, bu iki deney arasında geçen yaklaşık 4 aylık süre içinde reaktörün çalışmasıyla, yakıt yanması sonucunda nükleer yakıt miktarının azalması ve biriken fisyon ürünlerinin etkileridir.

Ayrıca TR-2 Reaktörünün CR-2 Kontrol çubuğuna birbirine yakın tarihlerde yapılan pozitif peryod deneyleri sırasında, reaktörü tekrar kritikliğe getirmek için, diğer çubukların her iki deney için tamamı tamamına aynı seviyelere çekilmemiş olması sonucunda, nötron akı şeklinin değişiminin meydana getirdiği gölgeleme etkisi, her iki deney için az da olsa farklı sonuç bulunmasına sebep olmuştur.

Pozitif peryod metodu ile saptanabilecek reaktivitenin en üst sınırı güvenlik yönetmelikleriyle belirlenir. Çünkü 10 saniyeden daha kısa peryodlar, bir çok reaktör sisteminde güvenlik devrelerini harekete geçirir. Yani 300 pcm'den daha büyük reaktiviteler bu metotla ölçülemez. Eğer kalibrasyonda bir seferde çok büyük reaktivite eklenirse reaktör gücü çok hızlı artar. Bu da iki kat olma zamanının ölçümünde büyük bir hataya sebep olur ve reaktörün kontrolü zorlaşır.

Pozitif peryod metodundaki hata hesaplarına göre, reaktöre verilen reaktivite miktarı arttıkça kökte yapılan hatanın reaktivitede meydana getirdiği hata oranı azalmaktadır. Büyük reaktivite değerlerinde yapılan hatanın azalmasına karşın reaktöre çok büyük reaktivite verildiğinde, güç artışının kontrol edilemeyecek bir düzeye ulaşabilmesi nedeniyle bir seferde verilen reaktivite miktarı belli bir miktarı aşamaz.

Pozitif peryod metodunda ölçülecek reaktivitenin en düşük seviyesi ise ölçümlerin doğruluğu ile saptanır. Yaklaşık 30 pcm'den düşük değerdeki reaktiviteye karşılık gelen 5 dakikalık peryodların oluşturduğu reaktör davranışı güvenilir değildir. Reaktöre eklenen reaktivite çok küçük olursa başlangıç durumunda, k'nın birden farklılığı anlamlı biçimde ölçümleri etkiler ve aynı zamanda iki kat olma zamanını ölçmek için uzun bir zaman gerekir. Bu nedenlerle reaktör periyodu 20-30 saniye mertebesinde olacak şekilde reaktivite miktarı eklenmelidir.

Pozitif peryod metodunda çubukların gölgeleme etkilerini azaltmak için, reaktörü tekrar kritikliğe getirmek üzere kalibrasyonu yapılan çubuğun dışında kalan diğer çubuklar birbirleriyle aynı seviyelere çekilmelidir. Reaktöre reaktivite verilmesi sırasında, kalibrasyonu yapılan çubuğun çekilme sayısının az olması da, gölgeleme sayısını ve etkisini azaltır.

Pozitif peryod metodunda reaktör alçak bir güç seviyesinde kritik yapılarak deney yapılır. Çünkü yüksek güç seviyesi reaktör sıcaklığını artırarak reaktiviteyi etkiler.

Ölçümler için bekleme süresi, 50 - 200 saniye arasında olmalıdır. Hata hesaplarından elde edilen sonuçlara göre reaktivite tayini için, bir kök kullanılmasıyla kararlı peryodda meydana gelen hata oranı bekleme süresi arttıkça azalmaktadır. Bu nedenle bekleme süresi diğer geçici terimlerin sönümlenmesi için yeteri kadar uzun olmalıdır. Bu sürenin çok uzun olması ise, bu müddet içinde gücün artması sonucu reaktör sıcaklığının artarak, reaktiviteyi etkilemesi nedeniyle sakıncalıdır.

Ard arda gelen peryod ölçümleri arasında, gecikmiş nötron öncülerinin dengeye gelebilmesi için belirli bir süre bırakılmalıdır.

Negatif reaktivitelerde reaktöre verilen reaktivite değeri daha fazla olmalıdır. Ortamda kaynak olması halinde ise, bunun etkisini azaltmak için reaktörün başlangıç gücü büyük olmalı ve ölçümler için bekleme süresi daha kısa seçilmelidir.

Başlangıçta reaktör kalbinde tam aşağı pozisyonda bulunan bir kontrol çubuğunun bir miktar yukarı çekilmesi halinde, her birim çubuk uzunluğu başına reaktör kalbine verilen reaktivite, çubuğun orta seviyelerinden çekilmesiyle ortama verilen reaktiviteden daha azdır. Bunun nedeni nötron akısının reaktör kalbinin dış sınırlarında düşük olmasıdır. Çubuğun kalpten tekrar çekilmesi durumunda belli bir noktadan itibaren reaktör kalbine verilen reaktivite miktarları, doğrusala yakın bir değer alır. Çubuğun tamamen yukarı çekilmesine yakın bir noktadan sonra reaktör kalbine verilen reaktivite tekrar azalır.

Bu durum TR-2 Reaktörünün kontrol çubuklarının kalibrasyonu deneyi sonucunda çizilen integral kalibrasyon eğrisinden görülebilir. Bundan çıkan sonuç bir kontrol çubuğunun reaktör kalbinde bulunduğu pozisyona göre, toplam uzunluğunun orta kısımlarının reaktivite açısından daha etkin olduğudur.

Çubuk düşürme metodu ile 10.000 pcm kademesinde olacak şekilde yüksek reaktivite değerleri ölçülebilir. Bu metotta çubuk düşürüldükten sonra nötron bozunum eğrisinden, ani geçici rejimden sonraki nötron seviyesinin doğru saptanmasının zorlukları vardır. Ayrıca dedektörün, nötron akısıyla orantılı olarak cevap verebileceği bir yere yerleştirilmesi, metoddan doğru sonuç alınması açısından önemli olmaktadır.

TR-2 Reaktörünün CR-2 kontrol çubuğunun pozitif peryod ve çubuk düşürme deneyleri sonucunda bulunan toplam reaktivite değerlerinin birbirine yakın olması, her iki metodun birbirleriyle uyum içinde olduğunu göstermektedir.



EKLER

Pozitif peryod metodu kullanılarak TR-2 Reaktörünün kontrol çubuklarının kalibrasyonu için reaktöre verilen adım şeklindeki reaktivitenin hesabı amacıyla, nötron yoğunluğunun zamana göre değişimi bilgisayara kaydedilmiştir.

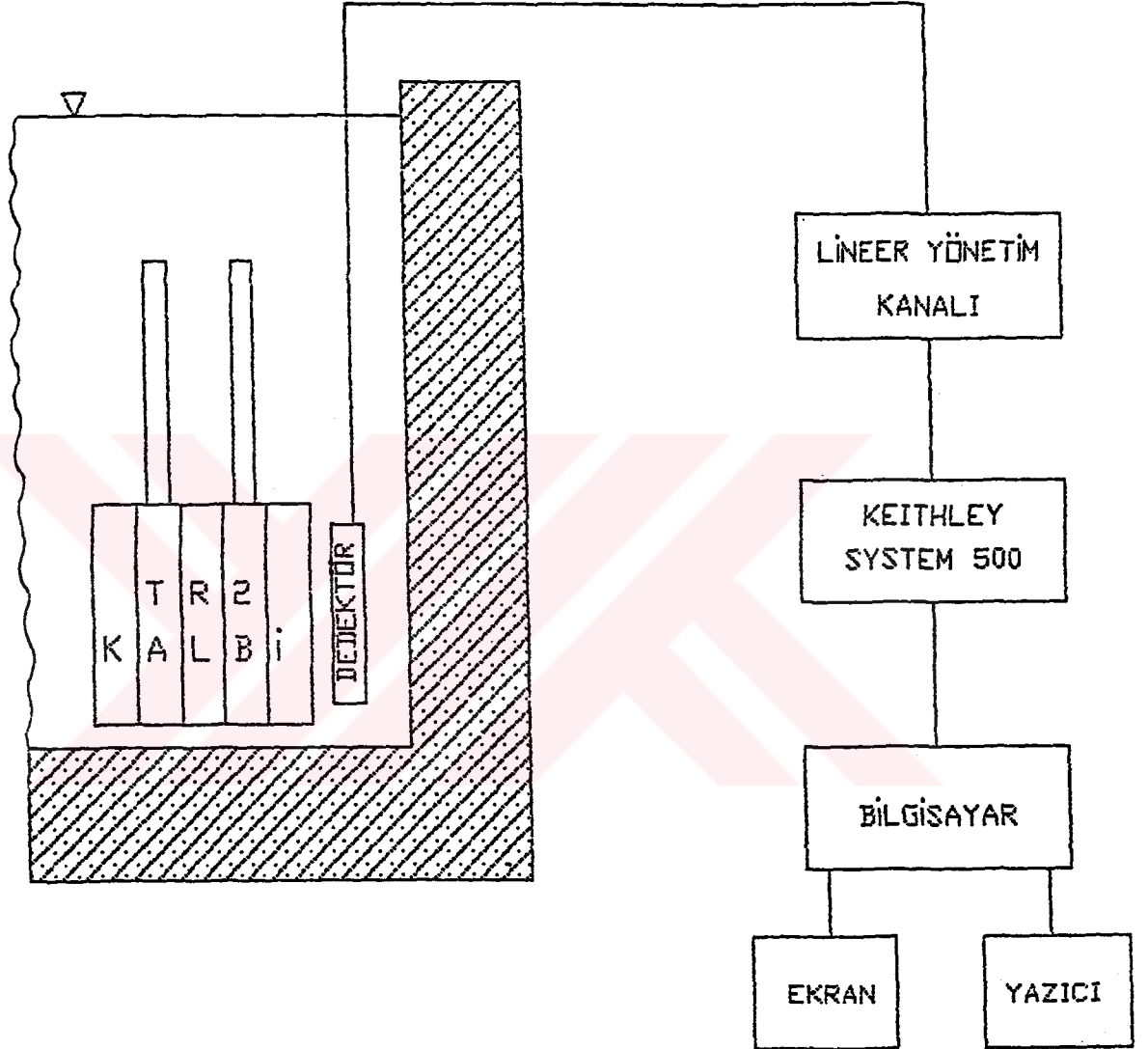
Bu deneyde TR-2 Reaktörünün lineer güç yönetim kanalından alınan, güçle orantılı 0-10 V arasındaki gerilim şeklindeki sinyaller, Keithley sistem 500 model bir veri toplama Ünitesi aracılığıyla dijital hale çevrilerek bilgisayara verilir. Bu duruma ait deney düzeneğinin blok diyagramı şekil-E.1'de gösterilmektedir. Nötron yoğunluğunun değişiminin kaydedilmesi amacıyla, bilgisayarda QuickBasic dili ve sistem 500 komutları kullanılarak yazılan program EK-A'da verilmiştir.

Deney sırasında her çubuğun yukarı çekilmesine karşılık gelen nötron bozunum dataları, bilgisayarda ayrı ayrı dosyalara kaydedilmiştir. Farklı dosyalara saklanan bu nötron yoğunluğunun zamana göre grafiklerinin bilgisayar ekranına geri çağırılması, EK-B'de verilen bilgisayar programı kullanılarak sağlanır.

Kaydedilen nötron bozunum verilerinden faydalanılarak bulunan peryoda karşılık gelen inhour Denkleminin kökü, başka bir bilgisayar programına veri olarak girilerek bu durumdaki reaktivite bulunmuştur. Dışarıdan hazır alınan bu bilgisayar programı ise EK-C'de verilmiştir.

TR-2 Reaktörünün CR-2 kontrol çubuğuna uygulanan çubuk düşürme deneylerinde, bu çubuğun ani olarak reaktöre düşürülmesi sırasında nötron yoğunluğunun bozunumunu bilgisayara kaydeden program EK-D'de bulunmaktadır.

Her bir deney için nötron bozunum datalarının saklı bulunduğu dosyaları, bilgisayar ekranında görüntüleyen bilgisayar programı ise EK-E'de yer almaktadır.



Şekil-E.1

EK-A

```

' PERYOT METODU İLE CUBUK KALİBRASYONU PROGRAMI
' 13 NİSAN 1993          HAKAN ANAC
REM
ARA = 450      'DATA ALMA ARALIKLARINI BELİRLEMEK İÇİN
ADET = 640     'ALINACAK DATA SAYISI
INPUT "DATALARIN SAKLANACAGI DOSYA ADI = "; D$
SCREEN 2
DEF SEG = &HCFF0
DIM DAT(1000), SSLN(1000), SSLG(1000)
INPUT "PRES ENTER TO BEGIN "; BOS$
CLS : PRINT "DENEY BASLADI CUBUGU CEKİNİZ !"
POKE &H9A, 0   'Global gain = 1
POKE &H81, 4   'Select slot = 4
aa$ = TIME$
FOR N = 1 TO ADET
    POKE &H86, 0 'Select chan = 0 pilotaj
    POKE &H98, 0 'Start A/D conversion
    FOR M = 1 TO ARA: NEXT M
    DLOW = PEEK(&H82)
    DHIGH = PEEK(&H83)
    S = 256 * (DHIGH - 192) + DLOW
    DAT(N) = S
    FOR M = 1 TO ARA: NEXT M
NEXT N
bb$ = TIME$
OPEN D$ FOR OUTPUT AS #1

CLS
FOR N = 1 TO ADET
    SS = 200 * DAT(N) / 16384
    SSLN(N) = 200 - SS
    PSET (N, SSLN(N))
    PRINT #1, DAT(N)
NEXT N
PRINT #1, aa$
PRINT #1, bb$
CLOSE #1

REM CURSOR ÇİZİMİ
LINE (1, SSLN(1) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (1, SSLN(1) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = 1: KANALY = KANAL
LOCATE 5, 5: PRINT aa$
LOCATE 6, 5: PRINT bb$
100 'DEĞERLENDİR
A$ = INKEY$
IF A$ = "P" THEN KANALY = KANAL + 1
IF A$ = "Q" THEN KANALY = KANAL - 1

LINE (KANAL, SSLN(KANAL) + 3)-STEP(0, 5), 0
LINE (KANAL, SSLN(KANAL) - 3)-STEP(0, -5), 0

LINE (KANALY, SSLN(KANALY) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (KANALY, SSLN(KANALY) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = KANALY
LOCATE 1, 15: PRINT KANAL, DAT(KANAL)

GOTO 100

```

EK-B

POZİTİF PERYOT METODU ÇUBUK KALİBRASYONU DATALARI İNCELEME PROGRAMI
13 NİSAN 1993 HAKAN ANAC

```

TO = 50
K2 = 20: C = 1000
B = 30
KANAL = 1: KANALY = KANAL

DIM DAT(640), SSLN(640)
INPUT "DATALARIN OKUNACAGI DOSYA ADI = "; OKU$
OPEN OKU$ FOR INPUT AS #1
SCREEN 2
FOR N = 1 TO 640
    INPUT #1, DAT(N)
    SS = 200 * DAT(N) / 16384
    SSLN(N) = 200 - SS
    PSET (N, SSLN(N))
NEXT N
INPUT #1, AA$
INPUT #1, bb$
CLOSE #1
100 CLS
    FOR N = 1 TO 640
        PSET (N, SSLN(N))
    NEXT N

    LOCATE 2, 55: PRINT "T0= "
    LOCATE 3, 55: PRINT "K2= "
    LOCATE 4, 55: PRINT "B = "
    LOCATE 5, 55: PRINT "C = "
    REM CURSOR ÇİZİMİ
    LINE (KANAL, SSLN(1) + 3)-STEP(0, 5)
    LINE (KANAL, SSLN(1) - 3)-STEP(0, -5)
    LOCATE 2, 5: PRINT AA$
    LOCATE 3, 5: PRINT bb$

200 REM
FOR N = 0 TO 240 STEP 12
    EG = C * EXP(N * .19 / B) '0.19 DEĞERİ HER KANAL İÇİN GEREKLİ SURE (S.)

    SS = 200 * EG / 16384
    SSLNN = 200 - SS
    PSET (N + TO, SSLNN)
    LINE (N - 3 + TO, SSLNN)-STEP(7, 0)
    LINE (N + TO, SSLNN - 2)-STEP(0, 5)
NEXT N

300 A$ = INKEY$
IF A$ = "T" THEN TO = TO + 1
IF A$ = "R" THEN TO = TO - 1

IF A$ = "B" THEN B = B + .1
IF A$ = "V" THEN B = B - .1

IF A$ = "C" THEN C = C + 10
IF A$ = "X" THEN C = C - 10

```

```
IF A$ = "c" THEN C = C + 100
IF A$ = "x" THEN C = C - 100

IF A$ = "Z" THEN GOTO 200
IF A$ = "A" THEN GOTO 100

LOCATE 2, 60: PRINT USING "###"; TO
LOCATE 3, 60: PRINT USING "##.#"; K2
LOCATE 4, 60: PRINT USING "##.###"; B
LOCATE 5, 60: PRINT USING "####"; C

IF A$ = "P" THEN KANALY = KANAL + 1
IF A$ = "Q" THEN KANALY = KANAL - 1

LINE (KANAL, SSLN(KANAL) + 3)-STEP(0, 5), 0
LINE (KANAL, SSLN(KANAL) - 3)-STEP(0, -5), 0

LINE (KANALY, SSLN(KANALY) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (KANALY, SSLN(KANALY) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = KANALY
LOCATE 1, 15: PRINT KANAL, DAT(KANAL)

GOTO 300
```

BK-C

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>

#define eps 0.00000001      /* very small number */

/*-----*
 *   Definitions of reactor parameters   *
 *-----*/

double lambda[7] = { 0.0124000, /* Decay constants for each */
                     0.0305000, /* delayed group */
                     0.1115000,
                     0.3010000,
                     1.1380000,
                     3.0100000,
                     23255.8 }; /* last one is 1/l */

double l = 4.30e-5; /* neutron lifetime */

double b[6] = { 2.310e-4, /* delayed neutorn ratio */
               1.533e-3,
               1.372e-3,
               2.765e-3,
               8.050e-4,
               2.940e-4 };

double beta = 0.007;
double keff0 = 1.;

/* Other global variables */

double root[7]; /* roots of Inhour Equation */
double A[7], C;
double rho, p0, t0;

/* Function prototypes */

double Inhour (double, double);
double Bisection (double, double, double (*)() );
double NewtonRaphson (double, double (*)() );
void Roots (void);
void Coefficients (void);
void Help(void);
int Decode (char *, int *, int *, int *);

main(argc,argv)
int argc;
char *argv[];
{
    int i, rflag=0, sflag=0, tflag=0;
    char cmdline[80];

    if ( argc < 2 )

```

```

{
    Help();
    exit(0);
}

strcpy (commandline,argv[1]);

for (i=2; i<argc; i++)
    strcat (commandline,argv[i]);

if ( Decode (commandline,&rflag,&sflag,&tflag) )
    exit (1);

rho *= beta;

if ( rflag )
{
    if ( rho == 0. )
    {
        printf ("No solution for zero reactivity \n");
        exit (1);
    }
    Roots ();
}

if ( sflag )
{
    if ( root[0] == 0.)
    {
        printf ("No solution for zero root \n");
    }

    rho = 0.;
    for (i=0; i<6; i++)
        rho += b[i] / (root[0]+lambda[i]);
    rho = root[0] * (1 + rho) / (1. + 1*root[0]);

    Roots ();
}

printf ("\n\n");
printf ("Reactivity      : %lf $\n\n",rho/beta);
printf ("Roots              : %lf 1/sec\n",root[0]);
for (i=1; i<7; i++)
    printf ("                  : %lf 1/sec\n",root[i]);

if ( ! tflag )
    exit (0);

Coefficients ();

printf ("\n\n");
printf ("Terms of P(t)/P(0) after %lf sec are,\n",t0);
for (i=0; i<7; i++)
    printf ("          %lf for root %d \n",A[i]*exp(root[i]*t0),i);
printf ("          %lf is the constant term \n",C);
}

/* ----- */

```

```

void Coefficients (void)
{
    int    i, j;
    double total1[7], total2[7], B[7];

    for (j=0; j<7; j++)
    {
        total1[j] = 0.;

        for (i=0; i<6; i++)
            total1[j] += b[i] / (root[j] + lambda[i]);
    }

    for (j=0; j<7; j++)
    {
        total2[j] = 0.;

        for (i=0; i<6; i++)
        {
            C = root[j] + lambda[i];      /* Use C only temporarily */
            total2[j] += b[i]*lambda[i] / (C*C);
        }
    }

    for (j=0; j<7; j++)
    {
        A[j] = (1 + keff0*total1[j]) / (1*(1.-rho) + total2[j]);
        A[j] *= (1.-rho);
        B[j] = (1.-keff0) / (1*(1.-rho) + total2[j]);
        B[j] *= (1.-rho) / root[j];
        A[j] += B[j];
    }

    C = (1. - 1./rho) * (1. - keff0);
}

/* ----- */
/*   R o o t s
   Finds the roots of Inhour equation */

void Roots(void)
{
    int i, j;
    double (*func)(double, double);
    double x, xmin, xmax, delx;

    /* Find first 6 roots */

    if ( rho < 0. )
        root[0] = Bisection (-eps, -lambda[0]+eps, Inhour);
    else
        root[0] = NewtonRaphson (eps, Inhour);

    for (i=1; i<7; i++)
        root[i] = Bisection (-lambda[i-1]-eps, -lambda[i]+eps, Inhour);
}

/* ----- */
/*   B i s e c t i o n   */

```

```
/* Finds a root of f() in a given interval xmin, xmax */
```

```
double Bisection (double x1, double x2, double (*f)() )
```

```
{
    double x, y, y1, y2;
    int i;

    y1 = f(rho, x1);
    y2 = f(rho, x2);

    if ( y1/y2 > 0. )
    {
        printf ("No roots in %lf,%lf\n",x1,x2);
        exit (1);
    }

    for (i=0; i<10000; i++)
    {
        x = 0.5 * (x1 + x2);
        y = f(rho, x);
        if ( fabs(y) < eps )
            return x;

        if ( (y / y1) > 0. )
        {
            y1 = y;
            x1 = x;
        }
        else
        {
            y2 = y;
            x2 = x;
        }
    }

    printf ("No roots found in 10000 iterations\n");
    exit (1);
}
```

```
/* ----- */
```

```
/* N e w t o n R a p h s o n */
```

```
/* Finds roots by using Newton-Raphson algorithm */
```

```
double NewtonRaphson (double x, double (*f)() )
```

```
{
    int i;
    double y, dydx;
    double delx = 0.001;

    for (i=0; i<10000; i++)
    {
        y = f(rho,x);
        if ( fabs(y) < eps )
            return x;
        dydx = (f(rho,x+delx) - y) / delx;
        x = x - y / dydx;
    }

    printf ("NewtonRaphson could not find the root\n");
}
```

```

}

/* ----- */
/* I n h o u r */
/* r is reactivity in dollars */

double Inhour (double r, double s)
{
    double result;
    int i;

    result = 0.;

    for (i=0; i<6; i++)
        result += b[i] / (s+lambda[i]);

    result = s * (1 + result) / (1. + l*s);

    return result - r;
}

/* ----- */
/* H e l p */

void Help(void)
{
    printf ("Usage :      INHOUR [/rRHO] [/sS0] [/tT0] /kKeff0\n"
           "\n"
           "      where RHO is reactivity in dollars,\n"
           "              S0 is the highest root\n"
           "              T0 is the time elapsed after step\n"
           "                  change in reactivity.\n"
           "              Keff0 is the initial multiplication"
           "factor (default : 1)\n"
           "\n"
           "      Either -r or -s should be specified, not both.\n"
           "\n" );
    printf ("Example : INHOUR -r0.20 -t100\n"
           "      prints the roots of Inhour Equation corresponding to\n"
           "      $ 0.20 reactivity and the terms of P(t)/P(0) at time\n"
           "      100 sec.\n"
           "\n");
    printf ("      INHOUR -s0.02 -t150\n"
           "      prints the roots of Inhour equation and corresponding\n"
           "      reactivity for a period of 1/0.02 sec. Also prints the\n"
           "      terms of P(t)/P(0) at time t=150 sec.\n");
}

/* ----- */
/* D e c o d e */

int Decode (char *line, int *r, int *s, int *t)
{
    int i, nargs=0;
    char *ptr[5];

    ptr[0] = strchr(line, '/');
    nargs ++;

```

```

while (1)
{
    ptr[narg] = strchr (ptr[narg-1]+1, '/');
    if ( ptr[narg] == NULL )
        break;
    narg ++;
    if ( narg > 4 ) break;
}

if ( narg < 1 )
{
    printf ("Too few options\n");
    return 1;
}

if ( narg > 3 )
{
    printf ("Too many options\n");
    return 1;
}

/* now ptr[i] points to '/' of i'th argument. increment
   pointers by one and set all '/' characters to nulls.
*/

for (i=0; i<narg; i++)
{
    *ptr[i] = 0;
    ptr[i] ++;
}

for (i=0; i<narg; i++)
{
    switch (*ptr[i])
    {
        case 'r':
        case 'R':
            rho = atof(ptr[i]+1);
            *r = 1;
            break;
        case 's':
        case 'S':
            root[0] = atof(ptr[i]+1);
            *s = 1;
            break;
        case 't':
        case 'T':
            t0 = atof(ptr[i]+1);
            *t = 1;
            break;
        case 'k':
        case 'K':
            keff0 = atof(ptr[i]+1);
            break;
        default :
            printf ("Unknown option  /%c\n",*ptr[i]);
            return 1;
    }
}

```

```
if ( ! (*s || *r) )
{
    printf ("Either reactivity or the root must be given\n");
    return 1;
}
if ( *s && *r )
{
    printf ("Either reactivity or the root must be given\n");
    printf ("Not both \n");
    return 1;
}
return 0;
}
```



EK-D

```

' CUBUK DUSURME DENEYI PROGRAMI
' 1 NISAN 1993          HAKAN ANAC
INPUT "DATALARIN SAKLANACAGI DOSYA ADI = "; D$
SCREEN 2
DEF SEG = &HCFF0
DIM DAT(1000), SSLN(1000), SSLG(1000)
INPUT "PRES ENTER TO BEGIN "; BOS$
CLS : PRINT "DENEY BASLADI DUSUR EMRINI BEKLEYINIZ !"
POKE &H9A, 0 'Global gain = 2
POKE &H81, 4 'Select slot = 4
aa$ = TIME$
FOR N = 1 TO 100
POKE &H86, 0

'POKE &H86, 8 'Select chan = 8 log1
POKE &H98, 0 'Start A/D conversion
FOR M = 1 TO 25: NEXT M
DLOW = PEEK(&H82)
DHIGH = PEEK(&H83)
S = 256 * (DHIGH - 192) + DLOW
DAT(N) = S
FOR M = 1 TO 25: NEXT M
NEXT N
CLS : LOCATE 11, 1
PRINT "
PRINT "          O   O          O   O   "
PRINT "          DDDD   UU   UU   SSSS   UU   UU   RRRRR   "
PRINT "          PRINT "          DD   DD   UU   UU   S   UU   UU   UU   RR   RR   "
PRINT "          DD   DD   UU   UU   SSSS   UU   UU   RRRRR   "
PRINT "          PRINT "          DD   DD   UU   UU   S   UU   UU   UU   RR   RR   "
PRINT "          DDDD          UU   SSSS          UU   RR   RR   "
PRINT "          O
FOR N = 101 TO 639
POKE &H86, 0 'Select chan = 0
'POKE &H86, 8 'Select chan = 8 log1
POKE &H98, 0 'Start A/D conversion
FOR M = 1 TO 25: NEXT M
DLOW = PEEK(&H82)
DHIGH = PEEK(&H83)
S = 256 * (DHIGH - 192) + DLOW
DAT(N) = S
FOR M = 1 TO 25: NEXT M
NEXT N
bb$ = TIME$
OPEN D$ FOR OUTPUT AS #1

CLS
FOR N = 1 TO 639
SS = 200 * DAT(N) / 16384
SSLN(N) = 200 - SS
' SSLG(N) = 210 - 10 * EXP(SS / 40)
' LOCATE 12, 5: PRINT N, SSLN(N)
' LOCATE 13, 5: PRINT N, SSLG(N)
PSET (N, SSLN(N))
PSET (N, SSLG(N))
PRINT #1, DAT(N)
NEXT N
CLOSE #1

```

```
LINE (1, SSLN(1) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (1, SSLN(1) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = 1: KANALY = KANAL
LOCATE 5, 5: PRINT aa$
LOCATE 6, 5: PRINT bb$
100 'DEGERLENDIR
A$ = INKEY$
IF A$ = "P" THEN KANALY = KANAL + 1
IF A$ = "Q" THEN KANALY = KANAL - 1

LINE (KANAL, SSLN(KANAL) + 3)-STEP(0, 5), 0
LINE (KANAL, SSLN(KANAL) - 3)-STEP(0, -5), 0

LINE (KANALY, SSLN(KANALY) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (KANALY, SSLN(KANALY) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = KANALY
LOCATE 1, 15: PRINT KANAL, DAT(KANAL)
GOTO 100
```

ÇUBUK DÜŞÜRME DENEYİ DATALARINI İNCELEME PROGRAMI
1 NİSAN 1993 HAKAN ANAÇ

```

TO = 50
K2 = 20: C = 1000
B = 30
KANAL = 1: KANALY = KANAL

DIM DAT(640), SSLN(640)
INPUT "DATALARIN OKUNACAGI DOSYA ADI = "; OKU$
OPEN OKU$ FOR INPUT AS #1
SCREEN 2
FOR N = 1 TO 639
    INPUT #1, DAT(N)
    SS = 200 * DAT(N) / 16384
    SSLN(N) = 200 - SS
    PSET (N, SSLN(N))
NEXT N
INPUT #1, AA$
INPUT #1, bb$
CLOSE #1
100 CLS
    FOR N = 1 TO 640
        PSET (N, SSLN(N))
    NEXT N

    LOCATE 1, 5: PRINT "DAT NO = "
    LOCATE 2, 5: PRINT "SAYIM = "
    LOCATE 1, 50: PRINT "P ---->"
    LOCATE 2, 50: PRINT "Q <----"
REM CURSOR ÇİZİMİ
LINE (KANAL, SSLN(1) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (KANAL, SSLN(1) - 3)-STEP(0, -5)

200 REM
A$ = INKEY$

IF A$ = "P" THEN KANALY = KANAL + 1
IF A$ = "Q" THEN KANALY = KANAL - 1

LINE (KANAL, SSLN(KANAL) + 3)-STEP(0, 5), 0
LINE (KANAL, SSLN(KANAL) - 3)-STEP(0, -5), 0

LINE (KANALY, SSLN(KANALY) + 3)-STEP(0, 5)
LINE (KANALY, SSLN(KANALY) - 3)-STEP(0, -5)
KANAL = KANALY
LOCATE 1, 15: PRINT KANAL
LOCATE 2, 15: PRINT DAT(KANAL)
GOTO 200

```

REFERANSLAR

- [1] J.B.HOAG, "Nuclear Reactor Experiments", D.Van Nostrand Company, 1958
- [2] S. ERK, "Reaktör işletmeciliği Bölüm.1 ", ÇNAEM Eğitim yayınları No:8, 1981
- [3] PROCEEDING OF A STUDY GROUP MEETING HELD BY I.A.E.A., " Research Reactor Experimental Techniques", Editure Academici Republicii Socialiste Romania, At bucharest 26-31 October 1964
- [4] G.R. KEEPIN, " Physics Of Nuclear Kinetics", Addison-Wesley Publishing Company, 1965
- [5] K.O. OTT, R.J. NEUHOLD, "Introductory Nuclear Reactor Dynamics", ANS, 1985
- [6] K.C. RUZICH, "Control Rod Worths By Pulsed Neutron Techniques, AGN-201 Reactor", Argonne National Laboratory, A Manuel Of Reactor Laboratory Experiments, ANL-6990, 1965
- [7] J.R. LAMARH, "Introduction To Nuclear Engineering", Addison Wesley Publishing Company, 1983
- [8] S. OGAWA, "Reaktör Dynamics And Control", Radioisotope And Nuclear Engineering School, JAERI.
- [9] M. MOROZUMI, "Control Rod Calibration", Tokai Research Establishment, JAERI.
- [10] B.J. TOPPEL, "Sources Of Error in Reaktivty By Means Of Asymptotic Period Measurements", Nuclear Science And Engineering:5, 88-98, 1959
- [11] N. KURUL, "Kontrol Çubuğu Kalibrasyonu", 27.8.1992

ÖZGEÇMİŞ

1959 yılında Sivas'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1976 yılında A.D.M.M.A. Elektrik Fakültesine girdi. 1981 yılında mezun olduktan sonra, 1982 yılında T.A.E.K.'da göreve başladı. 1989 yılında İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü Yüksek Lisans Programına kaydoldu. 1987 yılından beri T.A.E.K. Çekmece Nükleer Araştırma Ve Eğitim Merkezi Reaktör Bölümünde çalışmaktadır.

