

Kaynar sulu nükleer reaktörlerde eksenel akı modlarının paralel kanal kararsızlıklarına etkileri

Demirel AKTAŞ*, Melih GEÇKİNLİ

İTÜ Enerji Enstitüsü, Nükleer Enerji Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Kaynar sulu reaktörlerdeki kaynama olayı bu sistemlerin, kararlılık açısından zayıf noktasını oluşturur. Nötronik ile kuple olan termalhidrolik olaylar problemi daha karmaşık yapar. Genelde BWR (kaynar sulu reaktör) kararsızlıkları güç salınımlarının şekline göre global ve yerel (zıt-fazlı) olarak sınıflandırılırlar. Global salınımlarda bütün bölgesel güç monitörlerinden alınan sinyaller hep birlikte salınım yapmaktadırlar; halbuki zıt-fazlı güç kararsızlıklarında monitörlerin kaydettiği sinyaller birbirilerine göre belirli bir faz ilişkisi içinde iken; ortalama güç monitörleri büyük boyutlardaki bu sapma olaylarını tespit edemezler. Reaktör akısının temel mod dışındaki tüm uzaysal harmonikleri kritik altıdır. Temel prensiplerden başlayarak modal nokta kinetik denklemleri türetilir. Bu denklemler termalhidrolik pertürbasyonların bölgesel veya üniform olmayan davranışları nedeniyle kupledir. Reaktör operatörleri tarafından rapor edilen, çok sayıda beklenmedik güç salınım olayı vardır. Güncel reaktör kodları ile kararsızlıkların benzeşimleri iyi bir şekilde yapılmaktadır; ancak analitik modeller olayın fiziksel yorumunda daha yararlı olmaktadır. Reaktör kararlılık analizi için önerilen en eski modellerden biri paralel kanal kararsızlığıdır; bu isim uygulanan hidrolik sınır koşullarından kaynaklanır ve global kararsızlık analizinde kullanılabilir. Bu çalışmada sözü edilen model, temel akı moduna birinci eksenel harmoniği de ilave ederek geliştirilmiş, böylece yeni bir kararsızlık modu önerilmiş ve analizi yapılmıştır. Analiz lineer denklemlerle frekans domeninde gerçekleştirilmiştir. Kaynama sınırının hareketi, modal nokta kinetik denklemler üzerinden reaktivite geri besleme etkisi yaratmaktadır. Sonuçlar, net bir şekilde, akının doğal birinci eksenel harmonisinin reaktör kararlılığını etkilediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: BWR kararlılığı, zıt fazlı güç salınımları, modal kinetik denklemler.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Demirel AKTAŞ. demirelaktas@hotmail.com; Tel: (532) 362 41 08.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Enerji Enstitüsü'nde tamamlanmış olan "Kaynar sulu nükleer reaktörlerde eksenel akı modlarının termalhidrolik kararsızlıklarla etkileşmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 12.05.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.10.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2008 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Effects of the axial flux modes on the parallel channel instabilities in BWR's

Extended abstract

Thermalhydraulic stability is one of the major and extensively studied problems of systems operating under two-phase flow conditions; especially BWRs, steam generators and drum boilers are of concern due to safety issues involved. In BWRs there is an additional fact that complicates the problem: thermalhydraulic and neutronic instabilities are strongly coupled and feed each other. Existence of nonuniform boiling phenomenon in boiling water reactors makes these systems susceptible to instabilities. Customarily, BWR instabilities are classified as global (in-phase) and local (out-of-phase) according to the spatial dependency of the power fluctuations. In global oscillations, the output signals from all local power range monitors fluctuate in unison; whereas in out of phase power oscillations they record signals which are in a certain phase relation to each other while the average power range monitors maybe missing to detect any such anomaly of gross dimensions. There are several unexpected power oscillation events reported by the operators.

Present numerical codes can simulate these instabilities rather well on event basis; but more general physical insight can be gained readily through analytical modeling. Two-phase flow is inherently unstable due to its thermal-hydraulic nature. In BWR such instability is expected to be modified for the worse by the void feedback to reactivity mechanism. One of the earliest models applied to the problem is the parallel channel instability so called because of the applied hydraulic boundary conditions, which is used to account for global instability. In this case, the boiling boundary of a single hot channel begins to move, as affected by any perturbation. This action in turn will modify the reactor power which further provides the system with a feedback of reactivity. Under certain circumstances, if overlooked, this chain of events may lead towards an episode of growing instability resulting in a scram. On the other hand out-of-phase oscillations are usually thought to be linked with the spatial harmonics of the fundamental flux mode and can easily pass undetected. All spatial harmonics save the fundamental mode are subcritical. Starting from basic principles modal point kinetics equations can be derived. These equations are coupled due to the local or nonuni-

form behavior of the thermal-hydraulic perturbations. When the diameter of the core is close to its height, the first azimuthal mode is the least subcritical flux harmonic, whereas in a slender core the first axial mode dominates the first azimuthal mode with respect to criticality. The motion of the boiling boundary is quite likely to trigger the axial mode in any case.

In this work parallel channel model is extended by including the effect of the first axial harmonic of the fundamental flux mode, and hence a new type of instability is proposed and studied. In other words this study constitutes a second order perturbation analysis of the parallel channel model. Thermalhydraulics is represented with two-phase homogeneous equilibrium model equations. Modal point kinetics equations are derived allowing for modal interactions through the motion of the boiling boundary which in fact separates the core into two nodes, one being single phase subcooled region and the other the two-phase region where nucleate boiling takes place. In this way the modal point kinetics equations attain a nodal character as well. Analysis is performed with linearized equations in frequency domain. The motion of the boiling boundary explicitly feeds back to the modal point kinetics equations. The Froude number Fr and fuel-time constant are important parameters that strongly affect the density-wave instability. The Froude number effect is stronger in the case of with boiling boundary feedback than in the case of without the feedback. The Ledinegg instability is not likely to occur due to the coupling of the boiling boundary feedback and the thermalhydraulic feedback. In general, a positive boiling boundary feedback coefficient yields a less stable system to the density-wave instability and vice versa. For a very small fuel-time constant, however a positive boiling boundary feedback coefficient would stabilize the system. This is explained by the fact that an increase in void fraction would cause a decrease in power that would suppress further increase in void fraction. Results clearly indicate that the inclusion of the axial flux harmonic narrows the region of stability on the appropriate parameter space, therefore our approach results in more conservative prediction regarding the core stability.

Keywords: BWR stability, out-of-phase power oscillations, modal kinetics equations.

Giriş

İçinde iki fazlı akışın bulunduğu kanallardaki kararlılık problemi, BWR'ler başta olmak üzere bir çok mühendislik alanında büyük önem taşımaktadır. Daha önce yapılan çalışmaların bir çoğu termalhidrolik kararsızlığı kapsamaktadır. Reaktörlerde ise nükleer-termalhidrolik etkileşimler de dikkate alınmalıdır.

Önceleri, BWR'lerin kararlılık analizleri termalhidrolik temelinde inceleniyordu. Fakat reaktörlerde kendiliğinden beklenmedik osilasyonların oluşması bu konuya olan ilgiyi arttırmıştır. İlk olay, 1984 yılında Caorso (İtalya) reaktörünün zıt fazlı modda salınımına girmesi olarak rapor edilmiştir (March-Leuba ve Rey, 1993). Olayın gelişmesi esnasında toplam güç sabit kalmıştır, fakat silindirik kalbin azimutal açıya göre bir yarısında güç artarken diğer yarısında düşmüştür. Bu durum geniş yankı yaratmıştır. Aslında buna benzer bir olay 1978'de İsveç'te yaşanmıştır, fakat hadise İsveç dışında duyulmamıştır. İkinci olay NRC (Nuclear Regulatory Commission) tarafından rapor edilmiştir. 1988 yılında LaSalle, (USA) reaktöründe beklenmedik bir akış debisi salınımının nötron akısı salınımına ve bunun da bir hata uyarısına sebep olduğu belirtilmiştir. Bu olay daha fazla güvenlik önlemlerinin alınması ve kaza analizlerinin yapılması gerektiğini ortaya koymuştur (March-Leuba ve Rey, 1993).

BWR'lerde son zamanlarda meydana gelen iki önemli kararsızlık olayından biri Almanya'daki Philippsburg-1 nükleer güç santralında oluşmuştur. 2001'de besleme suyu sıcaklığındaki bir değişimden ötürü, reaktörde global güç salınımı oluşmuştur. Buna benzer bir olay İsveç'teki Oskarshamn-2 BWR'de 1999'da meydana geldiği rapor edilmiştir (Maqua vd, 2004). Her iki olayda da nötron salınımı söndürülemediği için acil kontrol çubuğu düşürme sistemi (*scram*) devreye girmiştir. Bu reaktörlerde acil güvenlik uyarı seviyesi tam gücün %120'sine ayarlanmıştır. BWR'lerde kararsızlık olayları genelde düşük akış debisi şartlarında meydana gelmektedir. Kalpten geçen akışkan debisi normal değerinin %40'nın altında ise kararsızlıklar gözükmemektedir (Van Bragt, 1998; Taeuchi vd., 1994).

Çernobil reaktörü (RBMK) çalışma parametreleri bakımından BWR'lere benzer; ancak özel amacı nedeniyle kararsız bir sistem olarak tasarlanmıştır (Stacey, 2001).

İleriye dönük 4. nesil nükleer reaktörler projesi içinde, su ile soğutulan sadece bir reaktör prototipi üzerinde çalışılmaktadır. Bu reaktörde süper-kritik en umut vaadeden sistem gözüyle bakılan bu reaktörde iş yapan akışkan süperkritik sudur.

Isıtılan bir kanalda iki fazlı akış kararsızlıkları, davranış biçimlerine göre ikiye ayrılmaktadır. Ledinegg kararsızlığı statik özelliğe sahip olup, sistem durumunun istenmeyen bir başka duruma geçmesi anlamına gelir. Yoğunluk dalgası ve basınç düşümü kararsızlıkları da dinamik kararsızlığa örnek teşkil ederler. BWR'lerdeki kararsızlıkları ise şu şekilde sınıflayabiliriz: 1) Kontrol sistemi kararsızlıkları 2) Kanal termalhidrolik kararsızlıkları 3) Nötronik-termalhidrolik kararsızlıklar: a) tüm koru etkileyen reaktivite kararsızlığı (birinci tür) b) zıt fazlı reaktivite kararsızlığı (ikinci tür).

Eksenel güç dağılımı, kararsızlığı önemli ölçüde etkilemektedir. Eksenel güç kalbin alt bölgelerinde yoğunlaşmış ise bu durum kararsızlığa sebep vermektedir (Mowry vd., 1995). Yani kaynamanın kalbin alt bölgelerine yaklaşması reaktör kararlılığını tehlikeye atmaktadır. Eksenel güç dağılımının etkisini araştırmak için kalbin belli bölgelere ayrılması gerekmektedir (Verdu vd., 1993).

BWR'lerde gözlenen salınım frekanslarının 0.2-2.5 Hz arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum tipik yoğunluk dalga hızı ile uyum içindedir (Van Bragt, 1998).

Bu çalışmadaki amaç, birinci tür kararsızlıklar esnasında oluşan kaynama sınırı hareketinin, eksenel asimetric harmonikleri biteviye tetikleme sinin modal nokta kinetik denklemlerle modellenmesini yapmak ve paralel kanal modeline bu ikinci merteye yaklaşımı uygulayarak sistemin kararlılık sınırlarını daha güvenilir bir şekilde hesaplamaktır. Reaktör için türetilen modal

denklemler termalhidrolik denklemlerle beraber lineerleştirilerek global kararsızlık sınırları parametrik olarak çıkarılmıştır. Kanal kararsızlıklarının analizi için homojen denge modeline dayanan, bir boyutlu iki fazlı akışı tasvir eden kütle, enerji ve momentum denklemleri kullanılmıştır.

Model

BWR için yapılacak nötronik-termalhidrolik kararlılık analizini uygulamak üzere Şekil 1'deki model önerilmektedir. Kanal, sistem çalışma özelliğinin doğal sonucu olarak kaynama sınırı $Z_B(t)$ tarafından iki noda ayrılmıştır. Soğutucu ve moderatör olarak görev yapan akışkan kanal girişinden kaynama sınırına kadar olan bölgede bir fazlı, kaynama sınırı ile kanal çıkışı arasındaki bölgede ise su ve doymuş buhar olarak iki fazlı homojen karışımdır. Kanal (aktif kalp) uzunluğu L_H 'dir.

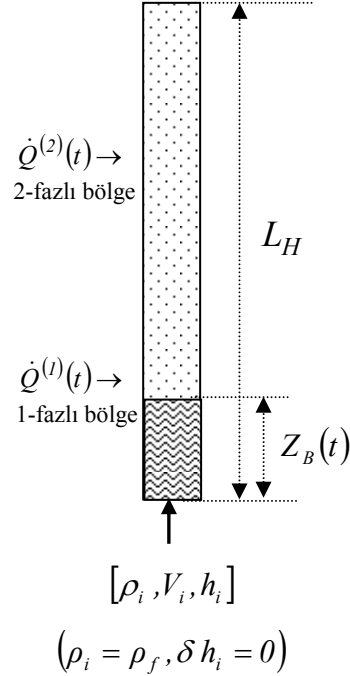
İçinde iki fazlı akışkanın bulunduğu kanal için kullanılan homojen denge modelinin (HEM) varsayımları:

- Hız profili kanal kesitinde üniform alınmış ve bir boyutlu akış olduğu varsayılmıştır.
- Akışkanın termalhidrolik özellikleri kanal boyunca sabit alınmıştır.
- Her bir nodun kendi içinde ısı akışı üniform alınmıştır: Isı akışı nodlara göre farklılık göstermektedir.
- Tek fazlı bölgede, doymamış sıvı içindeki kaynamalar (*subcooled-boiling*) ihmal edilmiştir.

Kanalın bir ve iki fazlı bölgelerindeki basınç düşümlerinin toplamı için $\Delta P_{tot} = \Delta P^{(1)} + \Delta P^{(2)}$ olmak üzere, $\delta(\Delta P_{tot}) = 0$ sınır koşulunun sağlandığı varsayılmıştır. Kanal girişindeki soğutucu akışkan entalpisindeki değişim, modelin genelliğini etkilemediği için, türetimi basitleştirmek için ihmal edilmiştir.

Her iki noda aktarılan güç farklı alınarak hem nötronik hem de termalhidrolik yönü ile probleme bir serbestlik derecesi katılmaktadır. Önceki yapılan lineer analizlerde ise kanal boyunca

üniform ısıtmanın olduğu varsayılmıştır. Yakıt çubukları tarafından kanalın bir ve iki fazlı bölgelerine aktarılan güçler sırayla $\dot{Q}^{(1)}(t)$ ve $\dot{Q}^{(2)}(t)$ 'dir.



Şekil 1. BWR için iki nod yaklaşımli kanal modeli

Temel denklemler

Yapılan varsayımlar altında, kullanacağımız temel denklemler aşağıdaki şekildedir. Homojen karışım için kütle süreklilik denklemi (Todreas ve Kazimi, 1990):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde ρ , iki fazlı homojen karışımın yoğunluğu, $G (= \rho V)$ kütleli akışı, V ise hızıdır. Enerji denklemi; h akışkanın özgül entalpisini ve q''' soğutucuya aktarılan ısı akışının soğutucu için hacimsel kaynak eşdeğeri olmak üzere aşağıdaki şekilde verilir:

$$\frac{\partial(h\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(hG)}{\partial z} = q''' \quad (2)$$

Homojen karışım için yoğunluk aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\rho = \rho_f(1 - \alpha) + \rho_g \alpha \quad (3)$$

Karışımın birim hacmi için entalpi:

$$h \cdot \rho = h_f \rho_f(1 - \alpha) + h_g \rho_g \alpha \quad (4)$$

olarak tanımlanır. Yukarıdaki denklemlerde α hacimsel boşluk oranı; ρ_f , ρ_g sırası ile doymuş su ve buhar fazının yoğunluklarıdır. Doymuş su ve buhar fazları için özgül entalpiler sırayla h_f , h_g 'dir. Momentum denklemi sıkıştırılmayan akışkan için aşağıdaki şekildedir (Lahey ve Moody, 1993; Uehiro vd., 1996):

$$-\frac{\partial P}{\partial z} = \left[\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho} \right) \right] + f \frac{G^2}{2D_h \rho} + \sum_j K_j \frac{G^2}{2\rho} \delta(z - z_j) + \rho g \quad (5)$$

Momentum denkleminde, P basınç değişkeni, f sürtünmesel basınç kaybı katsayısı, D_h kanal hidrolik çapı, K_j lokal süreksizlik basınç kaybı katsayısı, g yer çekimi ivmesidir. Denklem sağ tarafında gruplaşmış terimler sırası ile ivmesel, sürtünmesel, lokal süreksizlik ve yer çekimi etkisinden kaynaklanan basınç düşümlerini ifade etmektedir.

Reaktör güç dinamiğinin tasviri için gerekli modal kinetik denklemlerin türetilmesinde nötron akısı $\Phi(r, t)$ ve nötron öncüleri konsantrasyonunu $C(r, t)$ akının modları yardımı ile serile-re açılmaktadır:

$$\Phi(r, t) = N_0 \phi_0(r) + \sum_{k=0}^{\infty} n_k(t) \phi_k(r) \quad (6)$$

$$C(r, t) = \frac{1}{\mathcal{V}} C_0 \phi_0(r) + \frac{1}{\mathcal{V}} \sum_{k=0}^{\infty} c_k(t) \phi_k(r) \quad (7)$$

Yukarıda (6) ve (7) açılımında, N_0 (sürekli rejimdeki akı) ve C_0 (akı boyutuna

dönüştürülmüş sürekli rejim nötron öncüleri konsantrasyonu) ilgili fonksiyonların sürekli rejim genlik katsayıları, $n_k(t)$ ve $c_k(t)$ ise zaman bağımlı açılım katsayıları veya uyarılan modların, değişim gösteren kısımlarının genlikleri olarak düşünülebilir. Reaktör güç dinamiği için bir enerji, bir gecikmiş nötron öncü grubu yaklaşımı kullanılarak, modal nokta kinetik denklemler pertürbasyon analizi ile türetilir. Bu türetimde, bir yaklaşım olarak dinamik reaktörün öz fonksiyonları olan ω -modları yerine statik reaktöre ait λ -modaları kullanılmıştır. Nötron kinetiği denklemleri temel mod için aşağıdaki şekilde verilir (Munoz-Cobo vd., 2002):

$$\frac{dn_0^*(t)}{dt} = \frac{\rho_{00}^F(t) - \beta}{\Lambda_0} n_0^*(t) + \frac{\rho_{00}^F(t)}{\Lambda_0} + \frac{\rho_{01}^F(t)}{\Lambda_0} n_1^*(t) + \lambda^c c_0^*(t) \quad (8)$$

$$\frac{dc_0^*(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda_0} n_0^*(t) - \lambda^c c_0^*(t) \quad (9)$$

Aynı şekilde birinci kritik altı mod için elde edilen denklemler verilebilir:

$$\frac{dn_1^*(t)}{dt} = \frac{\rho_1^s + \rho_{11}^F(t) - \beta}{\Lambda_1} n_1^*(t) + \frac{\rho_{10}^F(t)}{\Lambda_1} + \frac{\rho_{10}^F(t)}{\Lambda_1} n_0^*(t) + \lambda^c c_1^*(t) \quad (10)$$

$$\frac{dc_1^*(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda_1} n_1^*(t) - \lambda^c c_1^*(t) \quad (11)$$

$\rho_{mn}^F(t)$, n . modun neden olduğu reaksiyon hızı değişikliğinin m . moda geri besleme şeklinde yansımaları olarak yorumlanabilir (Hashimoto, 1993). Λ_m m . mod için nötron üreme zamanıdır. Boyutsuz modal zaman bağımlı açılım katsayıları $n_m^*(t) \equiv \frac{n_m(t)}{N_0}$, $c_m^*(t) \equiv \frac{c_m(t)}{N_0}$, β orta-

lama gecikmiş nötron kesri, λ^c nötron öncülerinin bozunma sabitidir. Modal nokta kinetik

denklem seti genel olup seçilen akı modunu, parametreleri belirlemektedir.

Yakıttan kanala aktarılan güç miktarı $\dot{Q}(t)$ 'nin bir ve iki fazlı bölge için ifadesi aşağıdaki gibidir (Munoz-Cobo vd., 2000):

$$\dot{Q}^{(r)}(t) = \dot{Q}_0^{(r)} + (hA)_{ch}^{(r)} \delta t_{fl}^{(r)}(t), \quad r = 1, 2 \quad (12)$$

$\dot{Q}_0^{(r)}$, r . bölgede kanala sürekli rejimde aktarılan güç miktarıdır. $(hA)_{ch}^{(r)}$ yakıt çubuğunun ısı taşınım katsayısı ile ısı akış alanı çarpımıdır. $\delta t_{fl}^{(r)}(t)$ ise yakıt çubuğu sıcaklığındaki değişimi temsil etmektedir. Kanala ısı aktaran yakıt çubuğunun sıcaklık değişimi aşağıdaki denklem ile verilebilir (Munoz-Cobo vd., 2000):

$$(-I)^{(r)} (c_{fl} m_{fl})^{(r)} \left(\delta_{2l} - \frac{Z_B(t)}{L_H} \right) \frac{dt_{fl}^{(r)}(t)}{dt} = \dot{q}_{fl}^{(r)}(t) - (hA)_{ch}^{(r)} (t_{fl}^{(r)}(t) - t_\infty) \quad (13)$$

Yakıt zaman sabiti r . nod için aşağıdaki şekildedir:

$$\tau_{fl}^{(r)} = (-I)^{(r)} \left(\frac{c_{fl} m_{fl}}{(hA)_{ch}} \right)^{(r)} \left(\delta_{2r} - \frac{Z_{B0}}{L_H} \right) \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemde c_{fl} ilgili bölgedeki yakıtın özgül ısı kapasitesi, m_{fl} ise yakıtın kütlesidir. Yakıt gücündeki zamana bağlı değişimi ise $\dot{q}_{fl}^{(r)}(t)$ temsil etmektedir. Sürekli rejimde her iki bölge için aşağıdaki bağıntı verilebilir:

$$\dot{Q}_0^{(r)} = \dot{q}_{fl,0}^{(r)}, \quad r = 1, 2 \quad (15)$$

Yakıt gücündeki değişim olan $\delta \hat{q}_{fl}^{(r)}(s)$, ilk iki mod için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Munoz-Cobo vd., 2000):

$$\left(\frac{\delta \hat{q}_{fl}^{(r)}(s')}{\dot{q}_{fl,0}^{(r)}} \right)^{(r)} = \sum_{m=0}^1 f_{pm}^{(r)} \hat{n}_m^*(s'), \quad r = 1, 2 \quad (16)$$

$$f_{pm}^{(1)} \equiv \frac{\int_0^{Z_{B0}} v \sum_f^{(1)} \phi_m(z) dz}{\int_0^{Z_{B0}} v \sum_f^{(1)} \phi_0(z) dz + \int_{Z_{B0}}^L v \sum_f^{(2)} \phi_0(z) dz} \quad (17)$$

$$f_{pm}^{(2)} \equiv \frac{\int_{Z_{B0}}^L v \sum_f^{(2)} \phi_m(z) dz}{\int_0^{Z_{B0}} v \sum_f^{(1)} \phi_0(z) dz + \int_{Z_{B0}}^L v \sum_f^{(2)} \phi_0(z) dz} \quad (18)$$

$\phi_m(z)$, m . mod statik akıdır. Tipik BWR değerleri kullanılarak (17-18) tanımları hesaplanmıştır. Nodal-modal güç dağılım faktörleri $f_{p0}^{(1)} = 0.2668$, $f_{p0}^{(2)} = 0.7332$, $f_{p1}^{(1)} = 0.2732$, $f_{p1}^{(2)} = -0.5014$ olarak bulunmuştur. Kaynama sınırı düzleminin reaktör hacmini aksel yönde iki üniform bölgeye ayırdığı ve reaktör kalbinin silindirik simetriye sahip olduğu varsayılmıştır. $f_{pm}^{(1)}$, $f_{pm}^{(2)}$ m . mod için sırayla bir ve iki fazlı bölge için güç dağılım faktörü olarak tanımlanmıştır. Bu faktörün herhangi bir m . modda üretilen gücün temel modun üretmiş olduğu güce oranı olduğunu, yani temel mod ile normalize edildiğini görmekteyiz. $f_{pm}^{(r)}$, ilgili akı modunun r bölgesindeki yapısına göre tanım gereği pozitif veya negatif değerler alabilmektedir.

Modal geri besleme reaktivitelerinin kaynama sınırı hareketinin küçük değişimleri ile doğrusal değiştiğini kabul etmekteyiz,

$$\rho_{mk}^F(t) = K_{mk} \delta Z_B(t) \quad (19)$$

K_{mk} , kaynama sınırı modal geri besleme katsayısıdır.

Bu aşamadan sonra temel denklemler sistemin sürekli rejim çalışma parametreleri etrafında pertürbe edilerek lineerleştirilecek; daha sonra pertürbe edilmiş denklemlerin Laplace transformları alınarak, frekans domenine geçilecektir. Bulunan denklemler termalhidrolik modele herhangi büyük bir kısıtlama getirilmeden, uzay değişkeni üzerinden ilgili bölgelerde integre edi-

lerek; uygun sınır koşullarının kullanılmasıyla kanal için toplam basınç düşümündeki değişim ile kanal girişinde akışkan hızındaki değişim arasındaki ilişkiyi veren sistem transfer fonksiyonu bulunacaktır.

Bölgesel basınç düşümlerinin hesaplanması

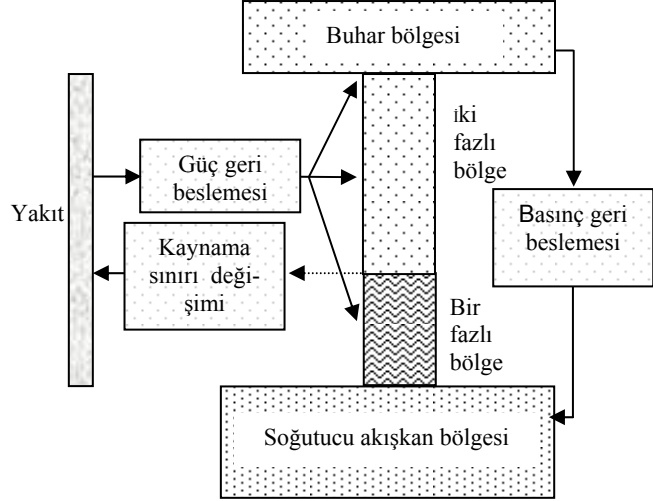
Kanal kaynama sınırı tarafından doğal olarak bir ve iki fazlı dinamik iki noda ayrılmıştır. İki fazlı bölgede enerji ile kütle süreklilik denklemleri momentum denkleminde bağımsız olarak çözümlenerek iki fazlı akışkan yoğunluğundaki pertürbasyon ifadesi elde edildikten sonra Laplace transformu alınmıştır. Sonra, pertürbe edilen momentum denkleminin Laplace transformunda bu değerler yerlerine konmuş, kaynama sınırı ile kanal çıkışı arasında integral alınarak iki fazlı bölgedeki basınç düşümü ifadesi bulunmuştur. Bir fazlı bölgede ise momentum denklemi pertürbe edildikten ve Laplace transformu alındıktan sonra kanal girişi ile kaynama sınırı arasındaki bölgede integre edilerek basınç düşümüne kolayca ulaşılmıştır. İki fazlı bölgede bulunan basınç düşümü pertürbasyonu, kanala giren akışkan hızı ile bir ve iki fazlı bölgelerde kanala aktarılan güç yoğunluğundaki pertürbasyonlara bağlanmıştır. Bir fazlı bölgede ise basınç düşümündeki değişim yalnızca kanala giren akışkan hızındaki pertürbasyonla ilişkilendirilmiştir. Bundan sonraki amaç bir ve iki fazlı bölgelerde basınç düşümlerindeki değişimi yalnızca kanala giren akışkan hızındaki değişime bağlamaktır; bunun için de nötronik-termalhidrolik etkileşimlerin ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

Nötronik-termalhidrolik etkileşimler

Sistemin transfer fonksiyonunu oluşturmak için kanalın termalhidrolik davranışıyla, yakıtın enerji üretim dinamiği arasındaki ilişki ortaya konulmalıdır. Şekil 2 ile basitleştirilmiş nötronik-termalhidrolik geri besleme yolları bir kanal için verilmiştir. Kaynama sınırındaki değişim hem nötronik üzerinden güç geri beslemesi, hem de termalhidrolik kanal basınç geri beslemesi doğurmaktadır.

Yakıt gücündeki değişim, ilk iki mod için verilmiş ve eksensel modlar için güç dağılım fak-

törleri tanımlanmıştır. Modal geri besleme reaktivitelerinin, kaynama sınırındaki küçük pertürbasyonlar için doğrusal değiştiği varsayılarak, kaynama sınırı için modal geri besleme katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 2. Basitleştirilmiş nötronik-termalhidrolik geri besleme mekanizması

Yakıt gücü belirli bir gecikme ile kanallara iletilmektedir. Kanal gücündeki pertürbasyon, kanala giren akışkan hızındaki pertürbasyona bağlanmıştır. Elde edilen kanal gücündeki pertürbasyon ifadesi iki fazlı bölge için bulunan basınç düşümü denkleminde yerine konarak, basınç düşümündeki pertürbasyon ile kanala giren akışkan hızındaki pertürbasyon arasında bir transfer fonksiyonu bulunmuştur. Sistem transfer fonksiyonunu elde edebilmek için bir ve iki fazlı bölgelerde, basınç düşümündeki değişimler tarafa toplanmış, toplam basınç düşümü giriş hızındaki pertürbasyonla ilişkilendirilmiştir.

HEM'de iki fazlı akışkan hızı $\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = \Omega$ diferansiyel bağıntısı ile tanımlanır; Ω kaynama frekansı olarak bilinir. Sürekli rejim için kaynama frekansı Ω_0 ile verilmiştir. Sistemin çalışma noktasının boyutsuz Jacob ve Zuber sayı ($Ja \equiv \frac{Z_{B0}}{V_{i0}} \Omega_0$, $Np \equiv \frac{L_H}{V_{i0}} \Omega_0$) eksenleri üzerinde

belirlenmesi pratikte uygun olmaktadır. Reaktör işletimcileri, konsoldan sistemin çalışma noktasının (Ja , Np) düzlemindeki kararsız bölgelerde

olup olmadığını tespit edebilirler. $\delta(\Delta\hat{P}_{tot}) = G_s(s)\delta\hat{V}$ bağıntısı gereği $G_s(s) = 0$ olduğu zaman her $\delta\hat{V}$, $\delta(\Delta\hat{P}_{tot}) = 0$ sınır koşulunu tam olarak sağlar ve bu durumda sistem kararsızdır. Sistem transfer fonksiyonu $G_s(s)$, pozitif frekans eksenini üzerinden taramıştır. Transfer fonksiyonunu kompleks düzlemin soluna sürükleyen (Ja , Np) noktasının sistemi kararsız kılacağı öngörülmüştür; çünkü bu durumda sistem transfer fonksiyonu sıfır değerini alabilecek ve bir kararsızlık oluşabilecektir. Analizler *MATLAB*[®] altında yazılan bir program ile gerçekleştirilmiş ve sistem kararlılık haritası elde edilmiştir. G_s aynı zamanda sistemin karakteristik denklemdir. Eğer sistemde nötronik geri besleme yoksa, bu durumda sistem dinamiği yalnızca termalhidrolik çevrim tarafından belirlenecektir.

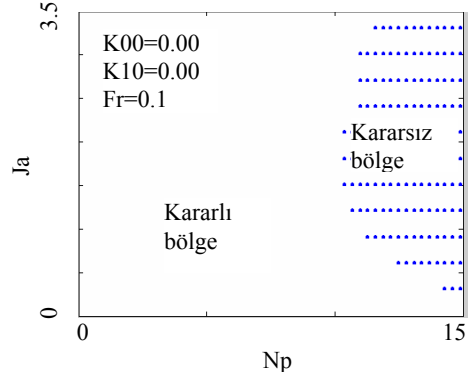
Şimdi sistemde statik kararsızlığın olup olmadığını araştıralım. Frekans domeninde bu durum $G_s(s \rightarrow 0) < 0$ olması ile eşdeğerdir. $\delta(\Delta\hat{P}_{tot}) = G_s(s)\delta\hat{V}$ ve $\delta\hat{V} \approx 1/s$ adım şeklinde bir pertürbasyon olsun. O zaman $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta(\Delta\hat{P}_{tot}) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_s(s) 1/s = G_s(0)$ olur. Demek ki $G_s(0)$ değeri basınç düşümündeki değişimin işareti hakkında bilgi vermektedir). Eğer sistemde nötronik geri besleme varsa yapılan analizde $G_s(s \rightarrow 0) > 0$ olduğu görülmüştür. Sonuç olarak BWR'lerde nötronik geri besleme iki nod-iki mod yaklaşımı altında da statik kararsızlığa, izin vermemektedir.

Aşağıda farklı geri besleme değerleri için sistem kararlılık haritaları hesaplanmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

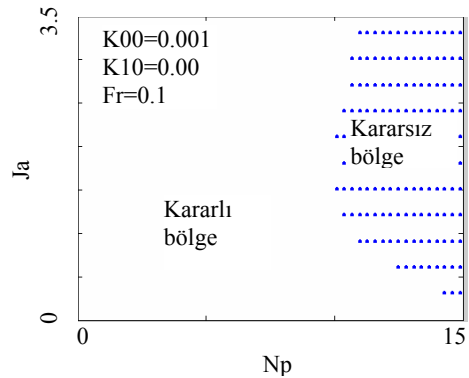
Şekil 3'te nötronik geri beslemenin olmadığı, yani yalnızca termalhidroliğin etkili olduğu durum incelenmiştir. Sistemin, küçük pertürbasyonlar karşısında kararlı-kararsız olduğu bölgeler belirlenmiştir.

Doğal olarak BWR'lerde nötronik-termalhidrolik etkileşimler göz önüne alınmalıdır. Şekil 4'te yalnızca temel mod akı profilinin etkin ol-

duğu varsayımı altında kararlılık haritası oluşturulmuştur. Küçük bir geri besleme alan temel modun sistemi biraz daha kararsız kıldığını Şekil 4 ile Şekil 3'ü karşılaştırarak görebiliriz.



Şekil 3. Termalhidrolik geri besleme için kararlılık haritası



Şekil 4. Temel mod kaynaklı nötronik-termalhidrolik geri besleme için kararlılık haritası

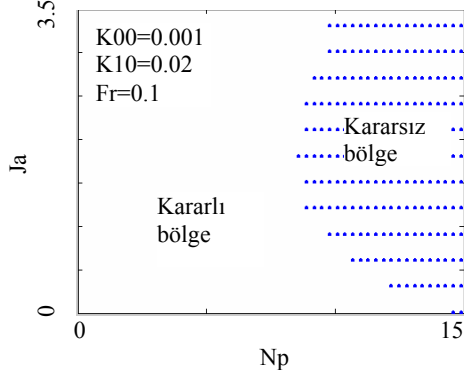
Şekil 5'de nötronik dinamikler temel ve birinci aksenal mod ile temsil edilmiştir. Birinci aksenal modun yeterli geri besleme alması için geri besleme katsayısı temel moda göre büyük alınmıştır. Şekil 5'de kararsız bölgenin Şekil 4'e göre genişlediğini görüyoruz.

Sonuç olarak aksenal harmonik mod ilavesinin, sistemin kararlılık haritasında, kararlı olduğu bölgeyi daralttığı gösterilmiştir.

Atalet kuvvetlerinin gravitasyon kuvvetlerine oranı olan boyutsuz Fr sayısı ($Fr \equiv \frac{V_{i0}^2}{gL_H}$), ka-

nala giren akışkan hızının karesi ile orantılıdır ve sistemin kararlılığını önemli ölçüde etkile-

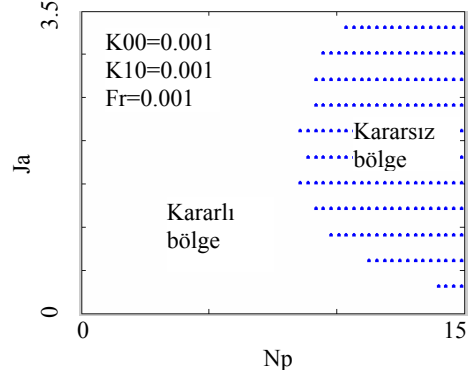
mektedir. Şekil 6'da kaynama sınırı geri beslemesi varken Fr sayısının kararsızlık sınırlarını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Küçük Fr sayıları için sistemin daha kararsız olduğu Şekil 6(a)'dan anlaşılmaktadır; çünkü küçük Fr sayısı, (düşük akışkan hızı) gravitasyon kuvvetlerinin daha etkili olması anlamına gelmektedir.



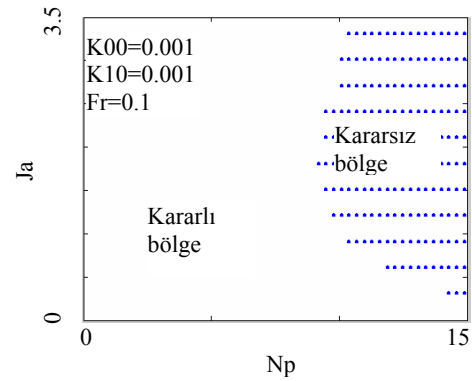
Şekil 5. Temel ve birinci aksenal mod kaynaklı nötronik-termalhidrolik geri besleme için kararlılık haritası

Eğer sistemde kaynama sınırı geri beslemesi yoksa kararsızlık sınırlarının Fr sayısından az etkilendiğini, yani kanal akış hızının sistem üzerinde etkisinin fazla olmadığını Şekil 7'den anlamaktayız. Sonuç olarak özel durumlarda Fr sayısı sistemin kararlılık sınırlarını tam tasvir etmemektedir; işte bu yüzden $Ja-Np$ kararlılık haritası önerilmiştir (Rao vd., 1995).

Yakıt dinamiği denklemindeki, yakıt zaman sabiti, lineer analizde sisteme birinci mertebeden gecikme katmaktadır. Yapılan çalışmada $\tau_{f1}^{(1)} = \tau_{f1}^{(2)}$ alınmıştır. Yoğunluk dalgaları salınımlarının, periyotları da aynı mertebede olduğundan, yakıt zaman sabitinin sistem kararlılığı üzerinde etkisi güçlü olmalıdır. BWR'lerde bu zaman sabiti 3 ile 7 saniye arasında değişmektedir. Yüksek frekanslarda eğer yakıt zaman sabiti büyük ise bunun filtreleme nedeni ile sistemi kararlı kılma etkisi olur; fakat aynı zamanda geri beslemeye gecikme katacağından sistemi kararsızlığa sürüklenme etkisi vardır (March-Leuba vd., 1993). Hangi etkinin baskın olacağı sistemin özelliğine bağlıdır.



(a) $Fr = 0.001$ alınmıştır



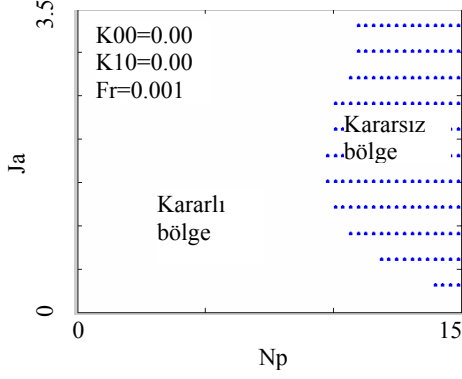
(b) $Fr = 0.1$ alınmıştır

Şekil 6. Kaynama sınırı geri beslemesi varken Fr sayısının sistem kararlılığına etkisi

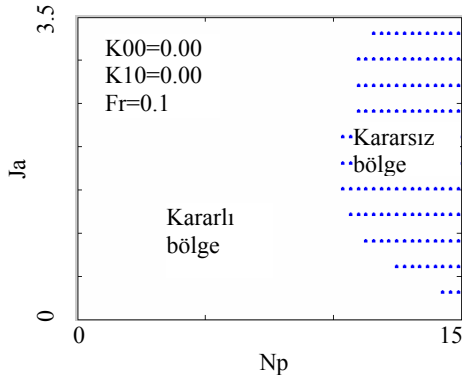
Şekil 8(a)'da yakıt zaman sabiti $0.5 s$ olarak alınmıştır. Çok küçük yakıt zaman sabitlerinde, pozitif kaynama sınırı geri besleme katsayıları için sistem çok kararlı olmaktadır; çünkü yakıt zaman sabitinin geri besleme etkisi, filtreleme etkisine göre daha baskın olduğundan, yoğunluk dalgalarının gelişimi engellenmektedir. Yine Şekil 8(b)'de yakıt zaman sabiti $9 s$ alınarak kararlılık haritası elde edilmiştir. Eğer yakıt zaman sabiti daha da artırılırsa, kararsızlık sınırları Şekil 7(b)'deki kaynama sınırı geri beslemesinin olmadığı durum ile eş olacak, fakat belli bir değerden sonra sistem sınırlarında değişim olmayacaktır.

Şimdi araştırmamızda yakıt kanalımızı iki nod almanın nasıl bir fayda sağladığını ortaya koyalım. Şekil 9(a)'da kanal tek nod olarak alınmıştır.

Bunu iki noda bölünmüş kanal için elde edilen Şekil 9(b) ile karşılaştırdığımızda kararlı bölgenin daha geniş olduğunu görüyoruz. Fakat bu durumun aldatıcı olduğunu, gerçekte sistemin daha geniş kararsız bölgeyi kapladığı Şekil 9(b)'den görülmektedir. Sonuç olarak nod sayısı arttıkça, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmaktadır.



(a) $Fr = 0.001$ alınmıştır



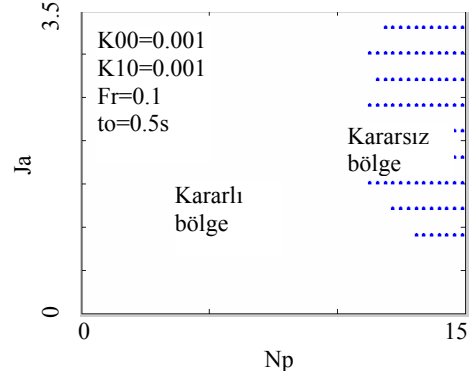
(b) $Fr=0.1$ alınmıştır

Şekil 7. Kaynama sınırı geri beslemesi yokken Fr sayısının sistem kararlılığına etkisi

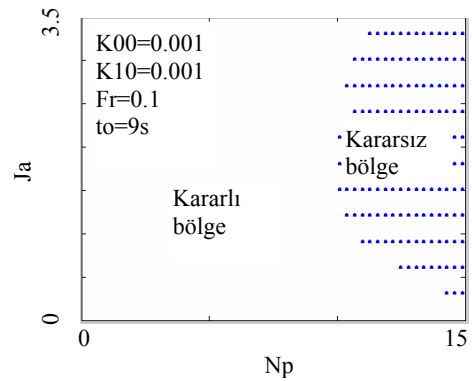
Sonuçlar ve öneriler

Çalışmada bulunan önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Eksenel birinci kritik altı akı modunun sistem üzerindeki kararsızlık etkisi ilgili modun geri besleme reaktivite katsayısının değerine bağlıdır. Bu modun geri besleme reaktivitesinin artması durumunda, sisteme ait kararsız bölgenin büyüdüğü görülmüştür.
- Birinci eksenel ile temel mod arasındaki kararsızlık yapan etkileşimi azaltmak için



(a) yakıt zaman sabiti 0.5 s olarak alınmıştır



(b) Yakıt zaman sabiti 9 s olarak alınmıştır

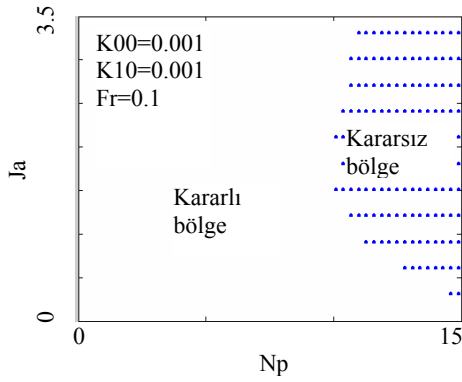
Şekil 8. Yakıt zaman sabitinin sistem kararlılığı üzerindeki etkisi

en iyi çözüm, kaynama sınırının aşırı miktarda hareketine izin vermemektir. Aksi durumda kaynama sınırındaki aşırı değişim, aksel zıt fazlı kararsızlıkları tetiklemekte, bu durum da çapraz geri besleme katsayısı K_{10} nedeniyle temel mod salınımlarını etkilemektedir.

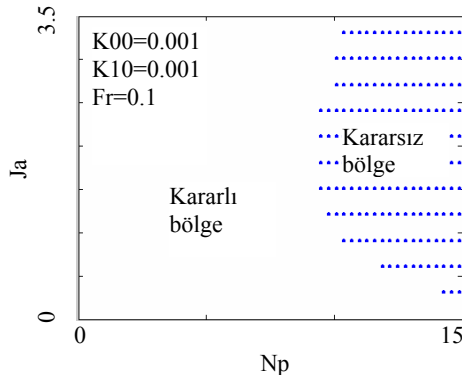
- Yeni yakıt yüklemesi yapıldığında, idareli kullanım için kaynama sınırı reaktör kalbinin hayli alt bölgelerinde tutulmaktadır. Ama bu durum yukarıda bahsedilen nedenden ötürü kararsızlık yaratabilmektedir.
- Bu çalışmada geri besleme reaktivitesi doğrudan kaynama sınırına bağlı tanımlanmıştır. Amaç kaynama sınırı etkisini ön plana çıkarmaktır.
- Yine bu çalışmada kaynama sınırına bağlı iki homojen bölgeden oluşan reaktör kalbi

için dinamik reaktiviteler çok sade tanımlanmış, aynı zamanda karmaşık kodlar kullanmadan modal reaktivitelerin kaymana sınırına bağlı değişimleri elde edilmiştir.

- Bütün kanalın bir nod olarak alınmasıyla kaynama sınırı hareketinin gecikme etkileri ortadan kalkar, ve sistem daha kararlıymış gibi görünür.
- Eğer temel denklemler, bölgeler üzerinden ortalama alındıktan sonra pertürbe edilirse toplam basınç düşümündeki gecikme terimlerinden birçoğunun kaybolduğu görüldüğü için bu yol tercih edilmemiştir.
- Lineer analizde, sistemin kararlılığı üzerinde en önemli parametrelerden birinin de yakıt zaman sabiti olduğu gösterilmiştir.



(a) Kanal tek nod olarak alınmıştır



(b) Kanal iki noda bölünmüştür

Şekil 9. Yakıt kanalı nod sayısının kararlılık haritası üzerindeki etkisi

- BWR'lerde nötronik geri besleme varken statik kararsızlığın olmayacağı, iki nod-iki mod yaklaşımı altında da gösterilmiştir.

Eğer nötronik geri besleme yoksa statik kararsızlık meydana gelebilmektedir.

- Kritik altı modlar da temel mod gibi ani sıçrama yaklaşımı altında incelenebilirler. Bu yaklaşımda nötron üreme zamanı sıfır alınır ve nötron kinetiğini nötron öncülerinin dinamiği belirler; nümerik çözümlerde yapılan varsayım kolaylık sağlar. Modal lineer kararlılık analizinde ani sıçrama yaklaşımı, genel durum ile karşılaştırıldığında hemen hemen aynı sonuçları vermektedir. Lineer olmayan analizde ise ani sıçrama yaklaşımı genel çözüme göre kullanışlı değildir; çünkü aynı parametre değerlerine karşılık sistemi genel çözüme göre daha kararlı göstermektedir. Bu yaklaşım yanıltıcı bir sonuçta götürmektedir.

Kaynaklar

- Hashimoto K., (1993). Linear Modal Analysis of out-of-Phase Instabilities in Boiling Water Reactor Cores, *Annals of Nuclear Energy*, **20**, 789-797.
- Lahey, R.T. ve Moody, F.J., (1993). *The Thermal-Hydraulics of a BWR*, La Grange Park: American Nuclear Society.
- March-Leuba, J., M.Rey J., (1993) Coupled Thermo-Hydraulic-Neutronic Instabilities in Boiling Water Nuclear Reactors: a Review of the State of the Art; *Nuclear Engineering and Design*, **145**, 97-111.
- Maqua, M., Katthoff, K. ve Pointer, W., (2004). *Neutron Flux Oscillations at German BWRs*. <http://www.eurosafe-forum.org/>
- Mowry, C.M., Nir, I., Newkirk, D.W., (1995). Operational Control of Boiling Water Reactor Stability, *Nuclear Technology*, **109**, 412- 428.
- Munoz-Cobo, J.L., Rosello, O., Miro, R., Escriva, A., Ginestar, D. ve Verdu, G., (2000). Coupling of Density Wave Oscillations in Parallel Channels with High Order Modal Kinetics: Application to BWR out-of-Phase Oscillations, *Annals of Nuclear Energy*, **27**, 1345-1371.
- Munoz-Cobo, J.L., Podowski, M.Z. ve Chiva, S., (2002). Parallel Channel Instabilities in Boiling Water Reactor Systems: Boundry Conditions for out-of-Phase Oscillations, *Annals of Nuclear Energy*, **29**, 1891-1917.
- Rao, Y.F., Fukuda K. ve Kaneshima, R., (1995). Analytical Study of Coupled Neutronic and Thermodynamic Instabilities in a Boiling

- Channel, *Nuclear Engineering and Design*, **154**, 133-144.
- Stacey, W.M., (2001). *Nuclear Reactor Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Taeuchi, Y., Takigawa, Y. ve Uematsu H., (1994). A Study on Boiling Water Reactor Regional Stability from Viewpoint of Higher Harmonics, *Nuclear Technology*, **106**, 300-314.
- Todreas, N.E. ve Kazimi, M.S., (1990), *Nuclear Systems I*, Hemisphere Publishing Co., New York.
- Uehiro, M., Rao Y.F. ve Fukuda K., (1996). Linear Stability Analysis on Instabilities of in-Phase and out of-Phase Modes in Boiling Water Reactors, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **33**, 628-635.
- Van Bragt, D.D.B., (1998). *Analytical Modeling of Boiling Water Reactor Dynamics*, Ph. D. Thesis, Delft University Press.
- Verdu, G., Munoz-Cobo J.L., Pereira C. ve Ginestar D., (1993). Lambda Modes of the Neutron-Diffusion Equation: Application to B.W.R's out-of-Phase Instabilities, *Annals of Nuclear Energy*, **20**, 477-501.