

Dolu rezervuar durumdaki barajların sismik davranış tahminlerine seçilen nümerik model tipinin etkisi

Alper ALDEMİR*

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş Tarihi (Received Date): 27.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.05.2019

Özet

Barajlar, yılın kurak dönemlerinde toplumların su ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamakta ve aynı zamanda teknolojik gelişmelerle günümüzde oldukça artan enerji ihtiyacını gidermeye de katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle artan nüfus ve teknoloji seviyesiyle, yeni barajların inşası da devam etmektedir. Tasarım aşamasında barajların etkileşimde bulunduğu zemin ve rezervuarın etkileri de dikkate alınmaktadır. Bu etkiler nümerik modellere yansıtılırken literatürde farklı teknikler (Westergaard ek kütlesi, Euler akışkan elemanları ve Lagrange akışkan elemanları, vb.) mevcut bulunmaktadır. Bu yaklaşımların barajların sismik tasarımlarına etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu nedenle, bu çalışmada, barajların tasarımı aşamasında sıklıkla kullanılan farklı modelleme metodlarının barajların modal özelliklerine nasıl etki ettiği irdelenmiştir. Bu amaçla, aynı kesit alanına sahip, farklı kesit geometrilibarajların rezervuarla etkileşimi Euler akışkan elemanı, Lagrange akışkan elemanı ve Westergaard ek kütle yaklaşımları kullanılarak dikkate alınmıştır. Elde edilen baraj modellerinin sismik davranışları elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece tasarım aşamasında kullanılan rezervuar baraj gövdesini dikkate almak için kullanılan modelleme metodlarının sismik özellikleri ne ölçüde tahmin edebildikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular sonucunda, Lagrange akışkan elemanı ve Westergaard ek kütle yaklaşımları Euler akışkan elemanlı modellere göre %20'yi bulan hata paylarıyla modal özellikleri tahmin edebildiği tespit edilmiştir. Bu hata oranları, yüksek mod etkilerinde oldukça büyük bir artış göstererek ilk mod için gözlemlenen değer yaklaşık 3 katına çıkmaktadır. Analizlerde kullanılan altı farklı kesit geometrisi sonuçlarına istinaden kesit tipinin sonuçlarda büyük bir farklılık yaratmadığı anlaşılmaktadır. Fakat baraj yüksekliğiyle (ya da artan yüksek mod etkisiyle) doğru orantılı bir şekilde hata paylarında bir miktar artış gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ağırılık barajlar, sismik özellikler, rezervuar, modelleme tekniği.

* Alper ALDEMİR, alperaldemir@hacettepe.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2425-9685>

Effect of the selected numerical model on the prediction of seismic behaviour of dams with full reservoir conditions

Abstract

The dams play an important role in meeting the water needs of societies during the dry periods of the year and at the same time they contribute to supply energy to meet the increasing energy demands due to the advancements in technology. Therefore, the construction of new dams still continues due to the increasing population and the level of technology. In the design phase of gravity dams, the interaction of the dam with the reservoir and the foundation rock should be taken into account. Different techniques (Westergaard's additional mass, Euler fluid elements and Lagrange fluid elements, etc.) are available in the literature to consider these effects in numerical models. However, the effects of these approaches on the seismic behaviour of dams should be examined in detail. Therefore, in this study, the effect of different reservoir modeling techniques on the seismic properties of concrete gravity dams was investigated. For this purpose, different concrete gravity dam sections were modeled by utilizing different reservoir modeling techniques. Seismic properties of the obtained dam models were determined and compared with each other. As a result, it was determined that different reservoir models predict modal characteristics with error rates of up to 20% compared to Euler fluid element models. These error rates increase nearly three times in high mode effects. In addition, it was observed that the error rates were not dependent on the selected section type. Finally, it has been observed that the predicted accuracy of higher modes is decreasing with the increasing dam height.

Keywords: Gravity dams, seismic properties, reservoir, modeling technique.

1. Giriş

Günümüzde artan su (içme suyu veya sulama) ve enerji taleplerini karşılayabilmek için kaynakların daha verimli ve çok yönlü kullanılması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaç son yıllarda teknolojik gelişmelerde gözlemlenen ivme artışıyla doğru orantılı olarak enerji santrallerindeki artışı da beraberinde getirmektedir. İnsanoğlunun, zorunluğu ihtiyacı olarak sadece gıda malzemeleri bulunurken, 21. yüzyılla; enerji ihtiyacı, karşılanması gereken en önemli sorunlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu soruna teknolojik gelişmelerle artan ortalama yaşam süresi de eklenince, gıda sorununa da çözüm bulunması gerekmektedir. Bu iki ihtiyacın gerekli duyduğu hammadde olan su ise hidroelektrik santraller vasıtasıyla insanoğlunun hizmetine sunulabilmektedir. Bu bağlamda son yıllarda elektrik üretimi de yapabilecek niteliğe sahip hidroelektrik santrallerin inşaları oldukça artmıştır.

Türkiye’de su yapılarının devlet eliyle inşa edilme zorunluğunun 2005 yılında ortadan kalkarak özel sektöre açılması ile bu sistemlerin yapım ve işletmesine yoğun bir ilgi oluşmuştur. Bu bağlamda yatırım önceliklerinin değiştiği ve tasarım ve inşa sürelerinin asgariye indirildiği göze çarpmaktadır. Bilindiği üzere Türkiye’nin hemen hemen her bölgesinde sismik tehlike mevcuttur. Ayrıca, Carter [1] tarafından belirtildiği üzere barajların su toplaması için gerek duydukları vadiler genellikle sismik fayların yakınlarında oluşmaktadır. Bu gözlem, Jackson [2] tarafından Çin’de inşa edilen

barajların konumları üzerine yapılan araştırmada da doğrulanmıştır. Jackson [2] Çin’de inşa edilen barajların %98,6’sının orta ve yüksek sismik tehlikeye sahip alanlarda inşa edildiğini belirtmiştir. Tasarımları aşamasında deprem yüklerinin etkisinin önemli olduğu barajların, özel sektör yatırımlarıyla hızlı bir şekilde inşa edilme isteği, tasarım mühendisleri tarafından bazı basitleştirilmiş metotların kullanılmasına da yol açmaktadır. Bu kullanılan metotların daha karmaşık modelleme teknikleriyle doğrulanmaksızın kullanılması hidroelektrik santrallerin deprem sonrası hasarlara ve belki de afet seviyesinde yıkımlara yol açabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde barajların deprem etkileri altındaki davranışları 1950’li yıllarda incelenmeye başlanmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, Amerika’da Federal Enerji Düzenleme Komisyonu (FERC) ve Amerika Birleşik Devletleri Ordusu İstikam Birliği (USACE) önderliğinde 1990’ların sonu itibarı ile depreme dayanıklı baraj gövde tasarımı için dokümanlar, metotlar ve yazılımlar geliştirilmiştir [3-5]. Ayrıca, sanılanın aksine bu devasa yapılar yer ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak hasar almaktadır [6]. Nuss vd. [6] dünya çapında inceledikleri barajların deprem sonrası durumlarından yola çıkarak oluşturdukları hasar tablosunda, 0,3g’den büyük azami yer ivmesine (PGA) sahip depremler tarafından sarsılan baraj gövdelerinin, hasar aldığını not etmişlerdir (Tablo 1). Bu sebeple hasarlı durumda, ciddi sorunlara ve hatta felaketlere yol açabilecek derecede mühim bu yapıların tasarımları esnasında azami özen gösterilmelidir.

Tablo 1. Tespit edilen beton barajların hasarları [6].

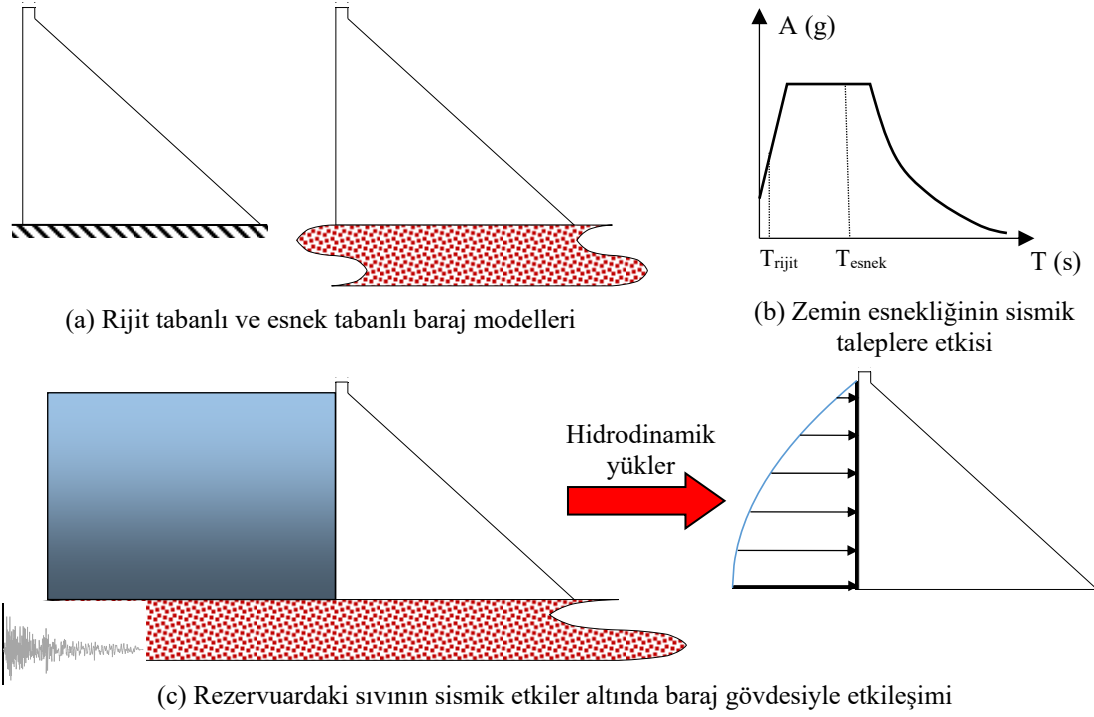
Baraj Adı	Yükseklik (m)	M _w	PGA (g)	Hasar Durumu
Koyna	103	6,5	0,63	Barajın gövdesinin memba ve mansap yüzünde çatlaklar gözlemlenmiştir.
Shih Kang	21,4	7,6	0,51	Baraj gövdesinde düşey yönde yaklaşık 9m deplasman gözlemlenmiştir. Ayrıca gövde betonunda ezilme tespit edilmiştir.
Kasho	46,4	7,3	0,54	Baraj Kretindeki binada çatlaklar gözlemlenmiştir.
Uh	14	7,3	1,16	Gövdedeki Dolusavak tabanında çatlaklar tespit edilmiştir.
Takou	77	9	0,38	Baraj Kretinde bulunan odada çatlaklar gözlemlenmiştir.
Rapel	111	7,8	0,31	Gövdedeki Dolusavak ve su alma yapısında hasar gözlemlenmiştir.
Techi	185	7,6	0,5	Baraj Kret kurbunda lokalize olmuş çatlaklar gözlemlenmiştir.
Hsinfengkiang	105	6,1	0,54	Baraj Gövdesinin üst kısımlarında yatay çatlaklar gözlemlenmiştir.
Sefid Rud	106	7,7	0,71	Barajın Gövdesinin üst kısımlarında yatay çatlaklar ve bloklar arası hafif oynamalar tespit edilmiştir.

Barajların sismik davranışlarının tahmin edilmesi aşamasında baraj gövdesinin rezervuardaki sıvı ve zemindeki kayayla olan etkileşiminin dikkate alınması zorunluluğu bulunmaktadır [7]. Bunun temel sebebi, zeminin rijit olmadığına dikkate alınmasıyla baraj gövdesinin periyodunda bir uzama gözlemlenmektedir. Bu gözlem oldukça rijit bir yapıya sahip barajlarda diğer yapıların aksine, sismik taleplerin olumsuz yönde değişim göstermesine neden olmaktadır (Şekil 1.a-b). Ayrıca, rezervuarda bulunan sıvının da hidrodinamik etkiler altında sahip olduğu eylemsizlik

kuvvetinin, baraj gövdesinden farklı olmasından ötürü, rezervuardaki sıvı baraj gövdesine ek talepler getirmektedir (Şekil 1.c). Barajın rezervuar ve zeminle etkileşiminden kaynaklı baraj gövdesinde oluşacak ekstra taleplerin dikkate alınması büyük öneme sahiptir [7]. Ayrıca, son yıllarda yürütülen çalışmalarda baraj tasarımında iki boyutlu ve üç boyutlu modellerin arasında oluşan talep farklılıkları da incelenmektedir. Bu konuyla ilgili yürütülen çalışmalar, dar vadili barajlarda üç boyutlu modellerin kullanılmasının elzem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [8, 9]. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar, barajın çevresindeki rezervuar ve zeminle etkileşiminden kaynaklı sismik özelliklerinin de etkilendiğini ortaya koymaktadır [7]. Bu etkileşimin dikkate alınabilmesi için baraj gövdesinin hâkim periyodunun öncelikle belirlenmesi gerekmektedir [10]. Sismik özelliklerin tahmininde kullanılan modal analiz sonuçlarının irdelendiği diğer çalışmalar da bu etkileşimin oldukça büyük oranlara sahip olduğunu işaret etmektedir [11, 12].

Rezervuardaki sıvının numerik modellere yansıtılabilmesi için literatürde farklı metotlar kullanılmaktadır [13, 14]. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan metotlar karmaşık olandan basite doğru sıralanırsa Euler akışkan elemanları [15], Lagrange akışkan elemanları [16] ve Westergaard [17] ek kütesidir. Bu numerik modelleme tekniklerinin her birinin kendi varsayımları ve basitleştirmeleri bulunmaktadır. Örneğin, Euler akışkan elemanları, sahip olduğu düğüm noktalarındaki basınç serbestlik derecesini elde edebilmek için Navier – Stokes denklemini çözmektedir [18]. Böylece akışkanın kendi ağırlığından ve/veya çevresel ivmelerden oluşan basınç değişimleri (hidrodinamik veya hidrostatik) direk olarak elde edilebilmektedir. Bu yaklaşım gerçeğe en yakın yaklaşım olarak görülmektedir. Lagrange akışkan elemanları ise yapısal elemanlardan türetilmiştir [18]. Bu akışkan elemanların, yapısal elemanlardan tek farkı, kesme rijitliğine sahip olmamalarıdır. Bunun dışında tüm özellikleri yapısal elemanlarla aynıdır. Bu sebeple Lagrange akışkan elemanları sahip olduğu düğüm noktalarındaki deplasman serbestlik derecesine sahiptirler. Westergaard [17] ek kütesi ise hidrodinamik etkilerden oluşacak hidrodinamik etkileri ve hakim periyot değişimini baraj gövdesine eklediği ek kütlelerle yansıtmaktadır. Bu metotta rezervuarın sonsuz uzunluğa sahip olduğu, rezervuardaki suyun sıkıştırılmaz olduğu ve memba yüzünün dik olduğu varsayılmaktadır [17].

Bu çalışmada, tasarım aşamasında mühendisler tarafından sıklıkla kullanılan ve tasarım şartnamelerinde kullanılmalarına izin verilen modelleme tekniklerinin baraj gövdelerinin sismik özelliklerini tahmin etme kabiliyetleri irdelenmektedir. Bu amaçla, Euler akışkan elemanlarına sahip modeller gerçeğe en yakın sonuçları ürettiği varsayımı yapılmıştır. Diğer iki modelleme tekniğinin Euler akışkan elemanları kullanılarak elde edilen sonuçlara ne kadar yakınsadığı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında tasarım aşamasında kullanılan altı farklı geometrik şekle sahip kesit kullanılmıştır. Bu kesitlerin ortak özelliği eşit alana sahip olmalarıdır. Böylece, kesitlerin sismik özelliklere etkisi de irdelenmiş olacaktır. Ayrıca, baraj yüksekliğinin sonuçlara etkisinin araştırılması açısından analizler farklı yüksekliklere sahip modeller için tekrarlanmıştır. Bu amaçla üç farklı yükseklik sınıfı (kısa, orta ve yüksek) kullanılmıştır. Bu üç sınıfı temsil etmesi açısından modellerde 50 m , 100 m ve 150 m yükseklik kullanılmıştır. Çalışmada her bir kesit üç farklı modelleme tekniğiyle tekrar modellenmiştir. Modellerden elde edilen ilk üç hâkim modun periyotlarıdır. Böylece çalışma kapsamında elde edilen veri tabanı $3 \times 54 = 112$ adet veri içermektedir. Bu çalışmada kullanılan numerik modellerde zemin – baraj etkileşimi de dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında tüm analizler iki boyutlu modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. (a-b) Baraj gövdesinin zemin kayası ve (c) rezervuardaki sıvıyla dinamik etkileşiminin sonuçları.

2. Rezervuar modelleme teknikleri

Literatürde baraj-zemin-rezervuar modellerinin oluşturulurken kullanılan belli başlı metotlar en basitleştirilmişten en karmaşığa doğru, Westergaard ek kütlesi [17], Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar [16] ve Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar [15] olarak sıralanabilir. Bu modelleme yöntemlerinin teorilerinden biraz bahsetmek gerekirse;

Westergaard [17] bir çalışmasında hidrodinamik etkileri baraj gövdesine tanımlanacak ek kütleler halinde modellenebileceğini öne sürmüştür. Bu maksatla, hazırladığı formülasyonu geliştirirken üç adet varsayımda bulunmuştur. Bunlar,

- Baraj rezervuarının sonsuza aynı geometriyi koruyarak uzadığı,
- Baraj rezervuarındaki suyun sıkıştırılmaz olduğu,
- Baraj memba yüzeyinin dik olduğu,
- Yüzey dalgaları ihmal edilmiştir.

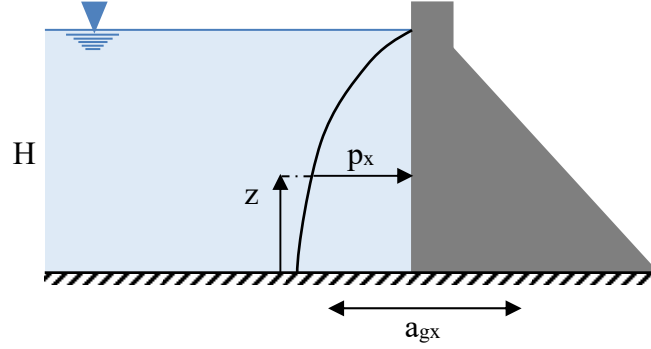
Bu varsayımlar ışığında barajın maruz kalacağı hidrodinamik etkileri Denk. 1'le ifade etmiştir.

$$p_x = \frac{7}{8} a_x w \sqrt{H(H-z)} = a_x m_{add} \quad (1)$$

Denk. 1'de p_x hidrodinamik basıncı, w sıvının öz ağırlığını, H rezervuardaki suyun yüksekliğini, a_x yatay ivmeyi ve z düşey koordinatı belirtmektedir (Şekil 2). Böylece m_{add} olarak barajın memba yüzeyinde tanımlanan ek kütleler sadece hareket

denkleminin sadece kütle matrisine (\mathbf{m}) ek olarak işlenmekte baraj-zemin-rezervuar sisteminin sönümlenme (\mathbf{c}) ve rijitlik matrislerine (\mathbf{k}) bir etkisi olmamaktadır (Denk. 2). Bu nedenle, baraj-zemin-rezervuar sisteminin modal analizinde de sadece kütle matrisindeki (\mathbf{m}) artış kaynaklı periyot artışına sebep olmaktadır (Denk. 14).

$$\mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_s \mathbf{u} = -\mathbf{1} \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (2)$$



Şekil 2. Westergaard Ek kütlesi.

Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar rezervuardaki sıvının modellenmesi için kullanılan ikinci metot olarak gösterilmektedir. Bu akışkan elemanlar yapısal elemanlarla benzer bir şekilde düğüm noktalarında bağımsız değişken olarak düğüm noktasının yer değiştirmesini (u , v ve w deplasmanları) kullanmaktadır. Bu akışkan elemanların formülasyonunda maddenin basınç altındaki şekil değiştirmeye gösterdiği dirençten yola çıkılmaktadır [16].

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\sigma_m = K \varepsilon_v \quad (4)$$

Sıvının toplam strain enerjisi

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon_v K \varepsilon_v dV \quad (5)$$

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan diskretizasyon kullanıldığında toplam strain enerji

$$\pi_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{K}_f \mathbf{U} \quad (6)$$

Denk. 6'da \mathbf{U} deplasman vektörünü (u ve v) ve \mathbf{K}_f rezervuardaki sıvının rijitlik matrisini temsil etmektedir (Denk. 7).

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4}(u_1(1-s)(1-t) + u_2(1+s)(1-t) + u_3(1+s)(1+t) + u_4(1-s)(1+t)) \\ v &= \frac{1}{4}(v_1(1-s)(1-t) + v_2(1+s)(1-t) + v_3(1+s)(1+t) + v_4(1-s)(1+t)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$K_f = \int \left(\begin{bmatrix} x_{,s} & y_{,s} \\ x_{,t} & y_{,t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{1,s} & N_{2,s} & N_{3,s} & N_{4,s} \\ N_{1,t} & N_{2,t} & N_{3,t} & N_{4,t} \end{bmatrix} \right) K \left(\begin{bmatrix} x_{,s} & y_{,s} \\ x_{,t} & y_{,t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{1,s} & N_{2,s} & N_{3,s} & N_{4,s} \\ N_{1,t} & N_{2,t} & N_{3,t} & N_{4,t} \end{bmatrix} \right) dV$$

$$= \int B^T K B dA$$

Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar için hareket denklemi

$$\mathbf{m}_f \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_f \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (8)$$

Yapı için hareket denklemi (Denk. 2) ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi (Denk. 8) memba yüzeyindeki etkileşim dikkate alınarak birleştirildiğinde

$$\mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_c \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_c \mathbf{u} = -\mathbf{1} \mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (9)$$

Denk. 9’da memba yüzeyindeki yapıya ait ve rezervuardaki sıvıya ait deplasmanların birbirine bağımlı olduğu durum (constraint) göz önüne alınmaktadır. Denk. 9 incelendiğinde sistemin simetrik olduğu ve deplasman dışında başka bir bağımsız değişkenin bulunmadığı görülmektedir.

Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar rezervuardaki sıvının modellenmesi için kullanılan üçüncü metot olarak gösterilmektedir. Bu akışkan elemanlar oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar kullanılmaktadır.

- Değişen basınç değerleriyle özkütlenin değişebilmektedir (sıkışabilir sıvı).
- Sıvıda viskoz sönümlenme yoktur.
- Sıvının özkütlesinin tüm sıvı geometrisinde aynıdır.

Sıvının hareket denklemi hesaplanırken Navier-Stokes teoremi kullanılmaktadır. Eğer viskozite ihmal edilirse Navier – Stokes teoremi Denk. 10’daki hali almaktadır.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (10)$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_o}}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \tilde{i} + \frac{\partial}{\partial y} \tilde{j} + \frac{\partial}{\partial z} \tilde{k}$$

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan diskretizasyon kullanıldığında

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = N^T \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Yapı için hareket denklemi (Denk. 2) ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi (Denk. 10) memba yüzeyindeki etkileşim dikkate alınarak birleştirildiğinde [19, 20]

$$\begin{aligned} m_s \{\ddot{\mathbf{u}}\} + c_s \{\dot{\mathbf{u}}\} + k_s \{\mathbf{u}\} &= F_s + [R] \{p\} \\ m_f \{\ddot{\mathbf{p}}\} + c_f \{\dot{\mathbf{p}}\} + k_f \{p\} &= F_f - \rho_w [R]^T \{\ddot{\mathbf{u}}\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ \rho_w [R]^T & m_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -R \\ 0 & k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix}$$

3. Numerik model detayları

Bu çalışma kapsamındaki analizler, ANSYS [19] programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesit geometrisinin sonuçlara etkisinin irdelenmesi açısından, altı farklı geometriye sahip kesit kullanılmıştır. Bu kesitler elde edilirken sabit bir alan değeri seçilmiş ve tüm kesitlerin alanları eşit olacak şekilde (en fazla %1 hata oranı olacak şekilde) memba (m_u) ve mansap eğimleri (m_d) belirlenmiştir. Böylece kullanılan her kesitte eşit miktarda malzeme kullanılmıştır. Tüm kesitlerde kret genişliği (t) sabit tutulmuştur. Sonuçlara kesitin yüksekliğinin etkisini inceleyebilmek için baraj yüksekliği (H) 50 m, 100 m ve 150 m olarak alınmıştır. Son olarak elde edilen memba ve mansap eğimleri ve seçilen baraj yüksekliği kullanılarak kesitin genişliği (B) hesaplanmıştır. Tüm kesitlerin, geometrileri Tablo 2’de özetlenmektedir.

Tablo 2’de detayları verilen kesitler üç farklı rezervuar modelleme yöntemi kullanılarak numerik olarak modellenmiştir. Numerik modeller, zemin-rezervuar-baraj gövdesi etkileşimini dikkate almaktadır. Bu nedenle zemin kayası ve baraj kabuk elemanları marifetiyle (ANSYS’teki PLANE42 elemanı kullanılmıştır), farklı modellerde rezervuar sıvısı ise Lagrange formülasyonuna sahip elemanlar (ANSYS’teki FLUID79 elemanı kullanılmıştır) veya Euler formülasyonuna sahip elemanlar (ANSYS’teki FLUID29 elemanı kullanılmıştır) vasıtasıyla modellenmiştir [18]. Westergaard [17] ek kütlesi ise modellerde baraj gövdesinin memba yüzeyindeki düğüm noktalarına tanımlanan ek kütleler (ANSYS’teki MASS21 elemanı kullanılmıştır) marifetiyle dikkate alınmıştır. Numerik modellerde baraj gövdesinin çevresinin tamamını modellemek mümkün olmadığı için, zemin-rezervuar-baraj modeli oluşturulurken Sevim vd. [21]’in çalışmalarında tavsiye ettiği üzere, zemin baraj gövdesinin üç katı kadar genişlik ve yüksekliğe ve rezervuar da baraj gövdesinin üç katı kadar yüksekliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 3). Rezervuardaki sıvının Euler akışkan elemanlarıyla temsil edildiği numerik modellerde yapısal elemanlarla akışkan elemanların komşu düğüm noktalarında bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Bunun temel sebebi Euler akışkan elemanların basınç serbestlik derecesine sahipken yapısal elemanların deplasman serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu sorunu çözmek için çevresinde yapısal eleman bulunan Euler akışkan elemanlarda hem basınç hem de deplasman serbestlik dereceleri aktive edilirken diğer akışkan elemanlarda sadece basınç serbestlik derecesi aktive edilmiştir. Bu nedenle Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanların kullanıldığı modellerde simetrik olmayan rijitlik matrisine neden olmaktadır (Denk. 13). Bu nedenle Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar içeren numerik modellerin çözümünde simetrik olmayan matris çözümleri için kullanılan çözüm yöntemi aktive edilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kesitler.

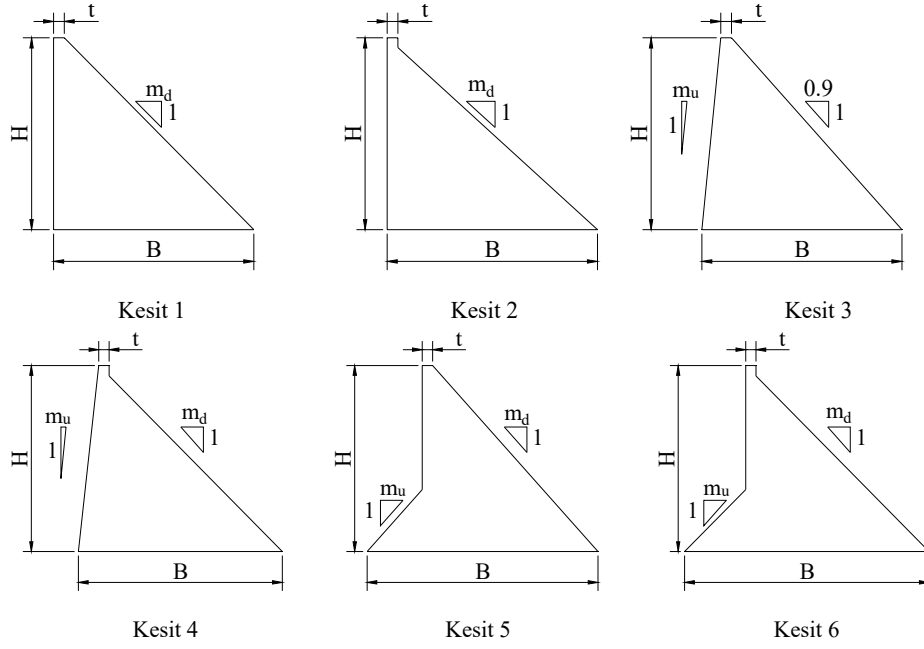
Baraj Kesiti	H (m)	B (m)	m_u	m_d	Kesit Alanı (m ²)
K1	50	31.75	0.000	0.475	993.75
K2	50	38.00	0.000	0.760	992.11
K3	50	31.75	0.048	0.428	993.75
K4	50	38.00	0.076	0.684	996.78
K5	50	36.53	0.428	0.428	994.44
K6	50	45.33	0.680	0.680	991.50

Tablo 2. (Devam).

K7	100	79.00	0.000	0.710	4275.00
K8	100	85.20	0.000	0.852	4284.79
K9	100	79.00	0.071	0.639	4275.00
K10	100	85.00	0.150	0.700	4280.18
K11	100	93.83	0.655	0.655	4288.89
K12	100	102.13	0.766	0.766	4283.13
K13	150	158.00	0.000	1.000	12450.00
K14	150	166.50	0.000	1.110	12516.33
K15	150	158.00	0.100	0.900	12450.00
K16	150	165.60	0.111	0.993	12452.23
K17	150	188.00	0.900	0.900	12450.00
K18	150	198.80	0.994	0.994	12457.19

$$\begin{aligned}
[M_s]\{\ddot{u}\} + [C_s]\{\dot{u}\} + [K_s]\{u\} &= \{F_s\} + [R]\{p\} \\
[M_f]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} &= \{F_f\} - \rho_w[R]^T\{\ddot{u}\} \\
\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_w[R]^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix}
\end{aligned} \quad (13)$$

Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar kullanılan modellerde rezervuarın sınır durumu olarak rezervuarın uzunluğunun gerçek uzunluğundan daha az alınmasından kaynaklı sorunlar yaşanacaktır. Bir başka deyişle rezervuarın olduğundan kısa olarak modellenmesi rezervuar sonunda dalgaların sonsuza yayılması yerine baraj gövdesine yansımalarından kaynaklı ekstra talepler getirecektir. Bunun engellenmesi için rezervuarın bitiminde sınır koşullarını doğru yansıtmak ve dalga yansımalarını engellemek için dalga hızının emilmesi maksatlı iç sürtünme değeri maksimum değer alınarak dalga emici bir mesnet yaratılmıştır. Lagrange formülasyonuna sahip akışkan eleman kullanılan modellerde ise akışkan elemanların yapısal elemanlara penetre etmesi engellenmelidir. Ayrıca, akışkan elemanların yapısal elemanların yüzeyinde göreceli hareket yapmasına izin verilmelidir. Bu maksatla yapısal elemanların memba yüzeyindeki normal birim vektörü yönünde eşit, fakat tanjant birim vektörü yönünde ise bağımsız hareket etmelerine olanak sağlayan deplasman serbestlik derecesi kısıtlamaları (displacement constraint) tanımlanmıştır (Şekil 4). Westergaard [17] ek kütlesi içeren numerik modellerde ise, baraj gövdesinin memba yüzündeki düğüm noktalarına birer adet ek kütle tanımlanmıştır. Seçilen baraj kesitlerinde memba yüzünde eğim olanlar için Kuo [22] tarafından önerildiği gibi her bir düğüm noktasında iki farklı yön için ayrı ek kütle tanımlanmıştır.



* H = 50, 100 ve 150m olarak alınmıştır.

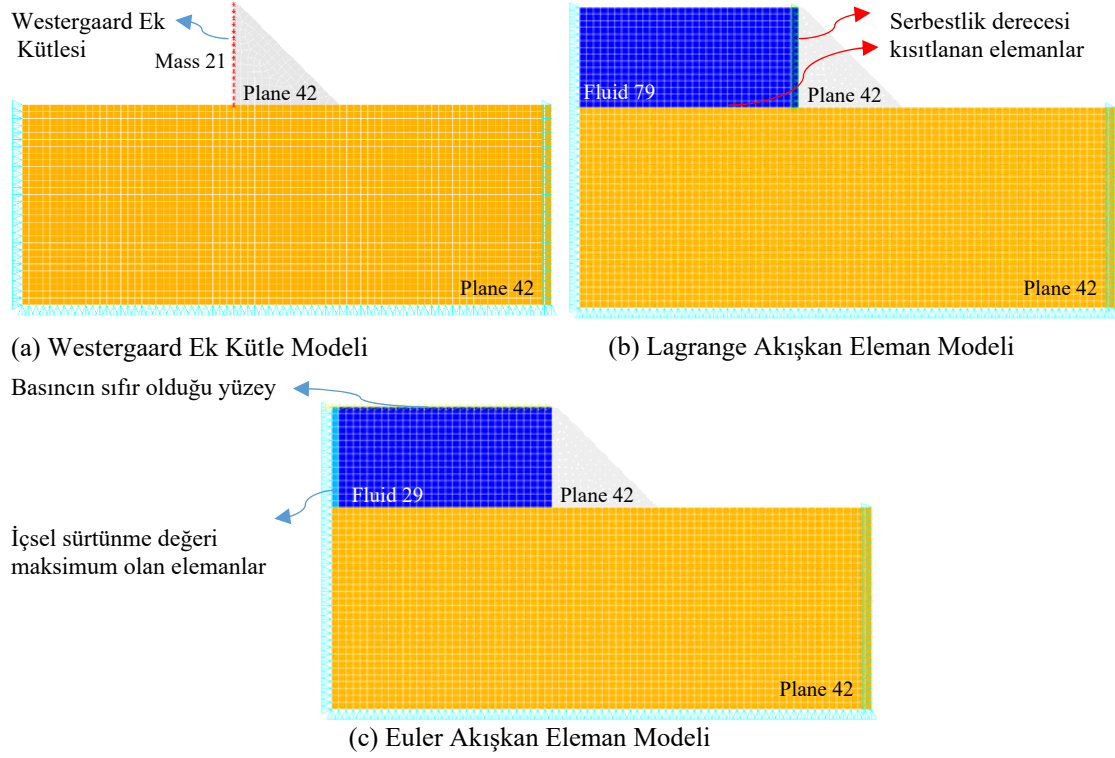
** t = 8m

Şekil 3. Çalışmada kullanılan kesitlerin geometrileri.

Modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3’de özetlenmektedir.

Tablo 3. Numerik modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Elastisite Modülü (MPa)	Beton		Rezervuar Sıvısı		Zemin Kayası		
	Poisson Oranı	Özkütle (kg/m ³)	Özkütle (kg/m ³)	Sonic Dalga hızı (m/s)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Özkütle (kg/m ³)
23.750,0	0,2	2.400,0	1.000,0	1.460,0	10.800,0	0,2	10,0



Şekil 4. Çalışmada kullanılan farklı rezervuar modelleme yöntemleri.

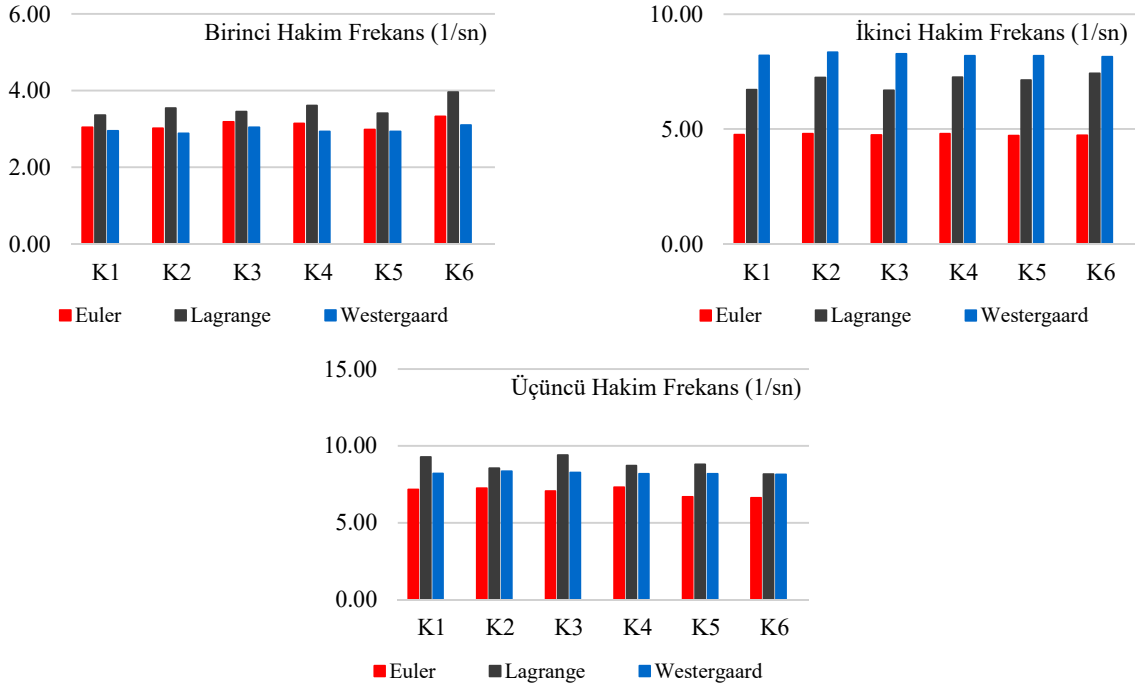
4. Analiz sonuçları

Oluşturulan numerik modeller modal analize tabi tutulmuştur. İncelenen modellerin ilk üç moduna ait periyot değerleri öncelikle aynı baraj yüksekliğine sahip modeller için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma esnasında sıkışabilir sıvı etkilerini ve rezervuara yansıyan dalgaların engellendiği Euler formülasyona sahip modeller gerçeğe en yakın simülasyonlar olduğu için frekansların Euler akışkan elemanlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Baraj yüksekliği 50 m, 100 m ve 150 m olan durumlar için elde edilen sonuçlar Tablo 4-Tablo 6’te verilmektedir. Ayrıca analizlerden elde edilen frekanslara rezervuar modelleme tekniğinin etkisini daha iyi kavrayabilmek için analiz sonuçları Şekil 5-Şekil 7’de gösterilmektedir.

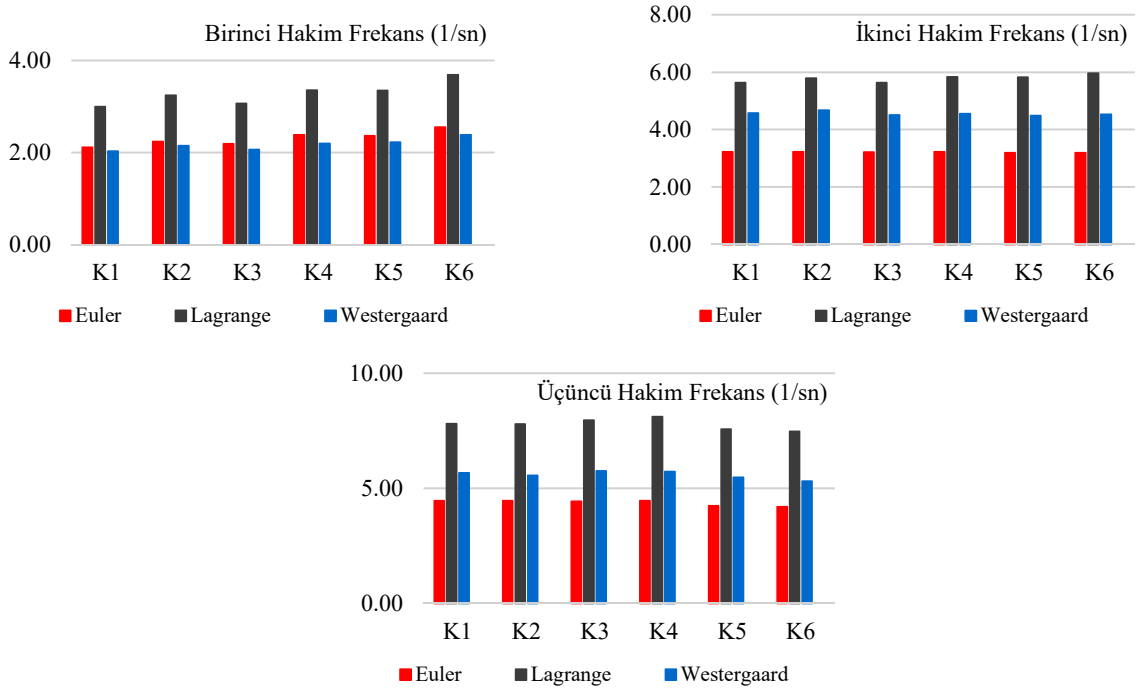
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda, Westergaard ek kütleli numerik modellerden ve Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlı modellerden elde edilen birinci hâkim moda ait periyotlar, Euler akışkan elemanlı modellerden elde edilen sonuçlara kıyasla sırasıyla ortalama %4,5 ve %24,8’lik bir fark bulundurmaktadır. Ayrıca, ikinci hakim mod periyot tahminleri için belirtilen hata oranları ise sırasıyla ortalama %53,2 ve %59,8 olarak bulunmaktadır. Üçüncü hakim mod periyot tahminleri için ortalama hata oranları ise sırasıyla ortalama %29,6 ve %57,6 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4. H=50m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	3.05	3.36	2.95	-	-10.22	3.24
K2	3.02	3.55	2.89	-	-17.36	4.41
K3	3.18	3.45	3.04	-	-8.34	4.40
K4	3.14	3.61	2.94	-	-14.86	6.42
K5	2.98	3.41	2.94	-	-14.37	1.50
K6	3.32	3.96	3.10	-	-19.16	6.75
				Ortalama	-14.05	4.45
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	4.75	6.72	8.20	-41.33	-72.40	-41.33
K8	4.80	7.24	8.35	-50.92	-74.03	-50.92
K9	4.75	6.68	8.27	-40.84	-74.37	-40.84
K10	4.80	7.25	8.19	-51.13	-70.62	-51.13
K11	4.72	7.13	8.19	-51.14	-73.58	-51.14
K12	4.74	7.42	8.15	-56.76	-72.08	-56.76
				Ortalama	-48.69	-72.85
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	7.15	9.26	8.20	-	-29.50	-14.61
K14	7.24	8.54	8.35	-	-17.93	-15.34
K15	7.06	9.38	8.27	-	-32.82	-17.13
K16	7.30	8.71	8.19	-	-19.32	-12.11
K17	6.68	8.80	8.19	-	-31.70	-22.58
K18	6.62	8.17	8.15	-	-23.26	-22.99
				Ortalama	-25.76	-17.46



Şekil 5. H=50m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6. H=100m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.

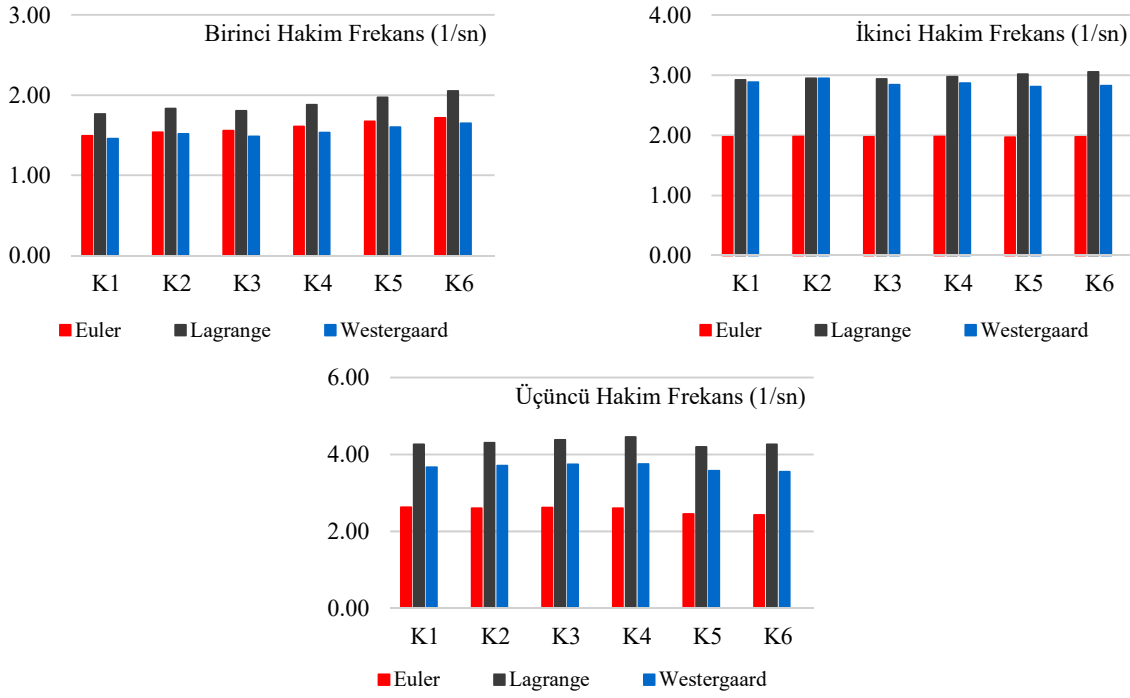
Tablo 5. H=100m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	2.11	2.99	2.03	-	-41.64	4.06
K2	2.24	3.24	2.14	-	-44.89	4.20
K3	2.19	3.06	2.06	-	-39.93	5.73
K4	2.38	3.36	2.19	-	-41.13	7.83
K5	2.36	3.35	2.22	-	-41.56	6.03
K6	2.55	3.69	2.38	-	-44.79	6.38
				Ortalama	-42.33	5.70
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	3.22	5.63	4.57	-	-74.80	-41.94
K8	3.23	5.78	4.68	-	-79.12	-44.86
K9	3.22	5.63	4.50	-	-75.04	-39.95
K10	3.22	5.83	4.55	-	-80.75	-41.15
K11	3.19	5.82	4.48	-	-82.08	-40.29
K12	3.20	5.96	4.52	-	-86.31	-41.39
				Ortalama	-79.68	-41.60
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	4.45	7.81	5.67	-	-75.52	-27.30
K14	4.45	7.79	5.55	-	-74.80	-24.62
K15	4.43	7.96	5.75	-	-79.71	-29.74
K16	4.46	8.11	5.73	-	-81.84	-28.41
K17	4.23	7.57	5.47	-	-78.78	-29.13
K18	4.20	7.47	5.31	-	-78.00	-26.42
				Ortalama	-78.11	-27.60

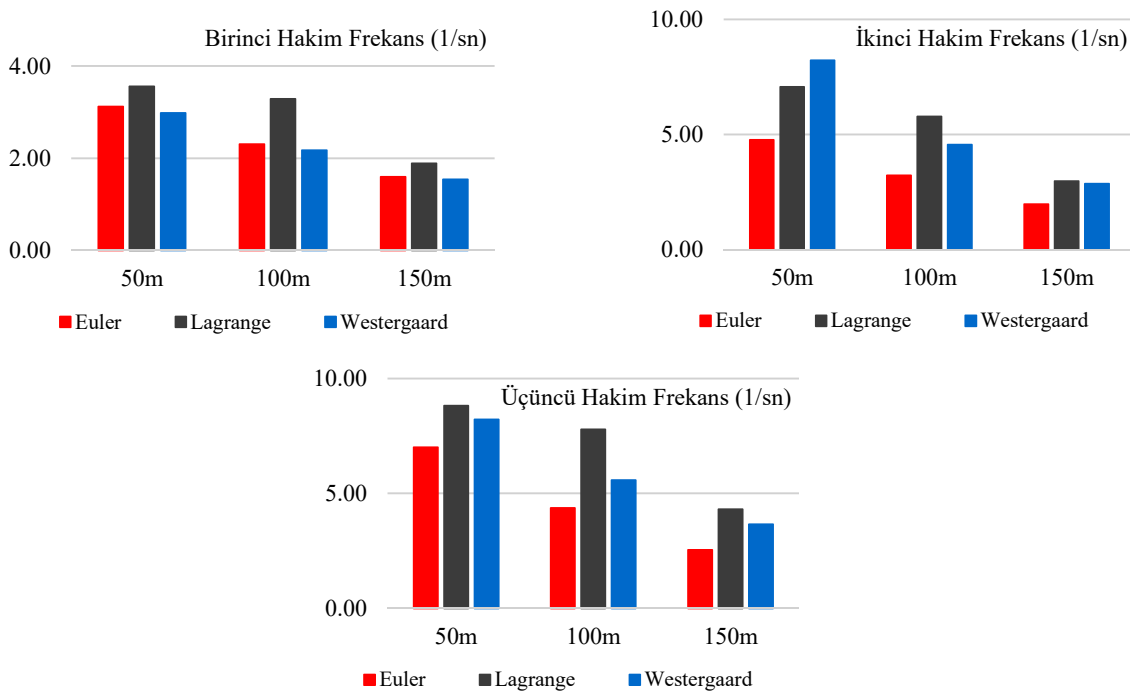
Son olarak belirtilen hata oranlarının kesit tiplerine olan bağımlılığı tespit edilememiştir. Bir başka deyişle analiz sonuçlarının seçilen kesit tipine olan korelasyonu göz ardı edilecek kadar azdır.

Tablo 6. H=150m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	1.49	1.76	1.46	-	-18.06	2.37
K2	1.53	1.83	1.51	-	-19.46	1.32
K3	1.56	1.80	1.48	-	-15.89	4.71
K4	1.61	1.88	1.53	-	-16.90	4.81
K5	1.67	1.97	1.60	-	-17.88	4.28
K6	1.72	2.05	1.65	-	-19.44	3.97
				Ortalama	-17.94	3.58
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	1.97	2.92	2.88	-	-48.16	-46.15
K8	1.98	2.95	2.95	-	-49.26	-49.15
K9	1.97	2.93	2.84	-	-48.87	-44.06
K10	1.98	2.97	2.87	-	-50.49	-45.16
K11	1.96	3.01	2.81	-	-53.42	-42.98
K12	1.97	3.05	2.82	-	-54.93	-43.32
				Ortalama	-50.85	-45.14
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	2.62	4.26	3.66	-	-62.31	-39.67
K14	2.60	4.30	3.71	-	-65.46	-42.53
K15	2.61	4.38	3.74	-	-67.57	-43.15
K16	2.59	4.45	3.75	-	-71.63	-44.53
K17	2.45	4.19	3.57	-	-71.09	-45.82
K18	2.42	4.26	3.55	-	-75.85	-46.70
				Ortalama	-68.99	-43.73



Şekil 7. H=150m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 8. Frekans değerlerine baraj yüksekliğinin etkisi.

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında beton barajlar için pratikte sıklıkla kullanılan numerik modellerin sismik özellikleri yansıtmadaki performansları detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Çalışma kapsamında kesit tipinin etkisi, baraj yüksekliğinin etkisi ve modelleme tekniğinin etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Analiz sonuçlarının sonucunda, Westergaard [17] ek kütlelerinin kullanıldığı modellerde ilk hâkim mod periyodunun oldukça başarılı bir şekilde tahmin edildiği gözlemlenmiştir. Fakat, yüksek mod etkilerinin Westergaard [17] ek kütleleriyle tahmininde oldukça büyük hata oranlarının tespit edildiği belirtilmiştir. Yüksek mod etkilerinin oldukça önem arz ettiği barajlarda bu Westergaard [17] ek kütlelerinin kullanılmasının taleplerinin tahmininde oldukça büyük hata oranlarını yanında getireceği belirtilmiştir. Ayrıca, rezervuarın Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar vasıtasıyla temsil edildiği durumlarda ise hiçbir mod etkisi için kabul edilebilir hata oranlarına ulaşamamaktadır. Özetle, tasarım mühendisleri yüksek mod etkilerinin oldukça önem arz ettiği beton ağırlık barajların tasarımında daha basit modeller kullanarak, hızlı çözümler elde etme eğiliminden vazgeçmelidirler. Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, basit numerik modellerin yüksek mod etkilerini yansıtmada çok büyük eksiklikleri bulunmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Carter, B., Structures and land forms: Faults, <http://itc.gsw.edu/faculty/bcarter/geomorph/struct/fault1.htm>, (06 October 2017).
- [2] Jackson, J., Earthquake hazards and large dams in western China, **Probe International Report**, (2012).
- [3] Zangar, C.N., Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects, **US Bureau of Reclamation**, Engineering Monograph, No:11, (1952).
- [4] Raphael, J.N., Design of dams for earthquake resistance, **Proceedings of First World Conference on Earthquake Engineering**, Berkeley, California (1956).
- [5] Chopra, A.K., Earthquake effects on dams, **Ph.D. Thesis**, University of California, Berkeley, USA, (1966).
- [6] Nuss, L.K., Matsumoto, N. and Hansen, K.D., Shaken but not stirred – Earthquake performance of concrete dams, **Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management**, 32nd Annual USSD Conference New Orleans, Louisiana, pp. 1511-1530, (2012).
- [7] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete dams, **Journal of Structural Engineering**, 113, 8, 1688-1708, (1987).
- [8] Arici, Y., Binici, B. and Aldemir, A., Comparisons of expected damage patterns from two and three dimensional nonlinear dynamic analyses of an RCC dam, **Structure and Infrastructure Engineering**, 10, 3, 305-315, (2014).
- [9] Bybordiani, M. and Arici, Y., The use of 3D modeling for the prediction of the seismic demands on the gravity dams, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 46, 1769-1789, (2017).
- [10] Aldemir, A., Prediction equations for the fundamental period and mode shape of roller compacted concrete gravity dams considering three dimensional geometry effects, **Journal of Earthquake Engineering**, (2018).
- [11] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Separate hydrodynamic and foundation interaction effects, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, 111, 6, 715-735, (1985).

- [12] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Combined hydrodynamic and foundation interaction effects, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, 111, 6, 736-756, (1985).
- [13] Fenves, G. and Chopra, A.K., EAGD-84: A computer program for earthquake response analysis of concrete gravity dams, Report No: UCB/EERC-734, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, USA, (1984).
- [14] Wang, J. and Chopra, A.K., EACD-3D: A computer program for three dimensional earthquake analysis of concrete dams considering spatially - varying ground motion, Report No: UCB/EERC-2008/04, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, USA, (2008).
- [15] Dungan, R., An efficient method of fluid-structure coupling in the dynamic analysis of structures, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 13, 1, 93-107, (1978).
- [16] Calayir, Y., Dumanoglu, A.A. and Bayraktar, A., Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches, **Computers and Structures**, 59, 5, 877-890, (1996).
- [17] Westergaard, H.M., Water pressures on dams during earthquakes, **Transactions of ASCE**, 98, 418–434, (1933).
- [18] ANSYS Theory Manual, Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications, SAS IP Inc., (2016).
- [19] ANSYS Inc., Basic Analysis Guide for ANSYS, SAS IP Inc, (2016).
- [20] Aldemir, A., Prediction equations for the fundamental period and mode shape of roller compacted concrete gravity dams considering three dimensional geometry effects, **Journal of Earthquake Engineering**, 2018.
- [21] Sevim, B., Altunisik, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M., and Calayir, Y., Water length and height effects on the earthquake behavior of arch dam-reservoir-foundation systems, **KSCE Journal of Civil Engineering**, 15, 2, 295-303, 2011.
- [22] Kuo, J.S.H., Fluid – structure interactions: Added mass computations for incompressible fluid, Report No: UCB/EERC-82/09, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, (1982).