



DÜZENSİZ FREKANS ETKİLERİNİN KALDIRILMASINDA ELEMAN MERTEBESİNİN ETKİSİ

Aytekin Duranay¹, Bahadır Uğurlu¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ABSTRACT

Frequency domain hydroelastic analysis of floating structures involves the computation of the radiation potential component that describes the perturbations in the fluid domain due to the structural vibrations. If the related external potential problem transformed to a boundary integral equation over the fluid-structure interface and solved by the boundary element method that relies on the free-surface Green function, then the numerical solution crashes at specific frequencies, owing to the appeared singularities of the coefficient matrices. This so called irregular frequency effect results from the fact that the Green function satisfies the free surface boundary condition over both the external and assumed internal free surface of the floating body. One of the main ideas for removal of the effect is regulating the coefficient matrices by extending the problem domain. The extended boundary integral equation method proposes to include the internal free surface into the computation domain by also covering it with a rigid lid. The objective of the study is investigating the performance of the extended boundary integral equation formulation for the removal of the irregular frequency effect by applying different levels (in terms of number of elements) and orders of approximation (as linear and quadratic elements) for the internal free surface discretization.

ÖZET

Yüzen deniz yapılarının frekans bölgesi hidroelastik analizi, yapısal titreşimin akışkan ortamında neden olduğu hareketlenmeleri ifade eden radyasyon potansiyelinin belirlenmesini gerektir. İlgili dış potansiyel problemin akışkan-yapı arayüzü üzerinde tanımlı bir sınır integral denkleme dönüştürülerek serbest yüzey Green fonksiyonuna dayalı sınır eleman yöntemi ile çözümü halinde, frekans aralığının belirli bölgelerinde, katsayı matrisinde oluşan tekillikler neticesinde hatalı sonuçlar alınmaktadır. Düzensiz frekans etkileri olarak tanımlanan bu durum, akışkan serbest yüzey sınır şartının Green fonksiyonu tarafından yüzen yapının hem dış, hem de gerçekte var olmayan iç serbest yüzeyi üzerinde sağlamasından kaynaklanır. Söz konusu etkilerin ortadan kaldırılması için uygulanan yaklaşımlardan biri, problemin tanımlandığı sınır yüzeyi büyütülerek katsayı matrisinin düzenlenmesidir. Genişletilmiş sınır integral denklem yöntemi, yapı iç serbest yüzeyinin rijit duvar şartı uygulanarak hesaplama alanına dahil edilmesini önerir. Çalışmanın amacı, genişletilmiş sınır integral denklem yönteminin düzensiz frekans etkilerini yok etmedeki etkinliğinin, iç serbest yüzey ayrıklaştırması için farklı seviye (eleman sayısı cinsinden) ve yaklaşım mertebeleri (lineer ve kuadratik sınır elemanlar olarak) uygulanarak incelenmesidir.

GİRİŞ

Deniz yapılarının akışkan kaynaklı çevresel etkilere karşı verdikleri global tepkilerle ilgilenen hidroelastisite, yapının hem rijit cisim hem de şekil değiştirme hareketlerini kapsayan birleşik bir çözüm ortamı sunar ve atalet, elastik ve hidrodinamik kuvvetler arasındaki karşılıklı etkileşim temelinde, akışkan kuvvetleriyle zorlanan yapının dinamik performansını frekans veya zaman bölgelerinde tanımlar [1-2].

Modal analiz ilkeleri temelinde, deniz yapısının çevresel etkilere karşı cevabının yapının asal modlarındaki hareketlerinin birleşimi olarak tanımlandığı çalışmada, yapısal ve hidrodinamik problemler lineer davranış ve potansiyel akım kabulleri altında ilişkilendirilmiştir. Bu çözüm modeli kapsamında, öncelikle yapısal sönüm ve dış kuvvetlerin yokluğunda yüzen yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiş, sonrasında yapısal titreşimin akışkan ortamında neden olduğu hareketlenmeleri tanımlayan radyasyon problemi, akışkan-yapı ara yüzeyinde ifade edilen bir sınır integral denkleme dönüştürülmüştür. Yapı ve akışkan problemlerinin çözümünde sırasıyla sonlu eleman ve sınır eleman yöntemleri uygulanmıştır.

Zamana harmonik olarak bağlı dış potansiyel akış problemlerinin sınır eleman yöntemi ile çözümü sırasında oluşan düzensiz (irregular) frekans etkileri, integral denklemde uygulanan Green fonksiyonunun akışkan serbest yüzey sınır şartını yüzen yapının hem dış, hem de (gerçekte var olmayan) iç serbest yüzeyi üzerinde sağlamasından kaynaklanır ve belirli frekans bölgelerinde hatalı sonuçlar üretilmesine neden olur [3]. Söz konusu etkilerin ortadan kaldırılması için yapı iç serbest yüzeyinin rijit duvar şartı uygulanarak hesaplama alanına dahil edilmesini öneren genişletilmiş sınır integral denklem yaklaşımının [4] uygulandığı bu çalışmanın başlıca hedefi, sınır eleman çözümünde iç serbest yüzey ayrıklaştırmasında uygulanan yaklaşım mertebesinin (lineer ve kuadratik elemanlar olarak) ve kullanılan eleman sayısının düzensiz frekans etkilerinin kaldırılmasındaki etkisinin, levha şekilli bir duba için hesaplanan genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri üzerinden incelenmesidir.

MATEMATİK MODEL

Yüzen bir elastik yapının hareket denklemi ayrıklaştırılmış formda,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ile verilebilir. Burada, \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} yapının sırasıyla kütle, sönüm ve katılık matrislerini, \mathbf{q} her bir düğüm noktası için yer değiştirme vektörünü, \mathbf{f} dış kuvveti ve t zamanı temsil etmektedir. Yapının sönümsüz serbest titreşimi, $\mathbf{q} = \mathbf{u}e^{i\omega_n t}$ çözümünün sönüm etkileri ve dış kuvvetlerin yokluğunda (1) eşitliğine uygulanmasıyla elde edilen $(-\omega_n^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{u} = 0$ özdeğer problemi ile tanımlanır; problemin çözümü, ω_n doğal frekanslarını ve karşılıklı gelen \mathbf{u} doğal modlarını yapının dinamik karakteristikleri olarak verir. Yüzen yapının dış etkiler altındaki genel dinamik davranışı, her bir doğal modda sergilediği davranışların birleşimi olarak ifade edilebilir:

$$\mathbf{q}(t) = \sum_{i=1}^{n_m} \mathbf{u}_i p_i(t) = \mathbf{U}\mathbf{p}(t) \quad (2)$$

Burada, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_{n_m}]$ modal matrisi doğal modların oluşturduğu n_m boyutlu bir vektör uzayı tanımlarken, modal koordinat vektörü $\mathbf{p} = \{p_1 \dots p_{n_m}\}^T$ hareketin bu uzaydaki koordinatlarını temsil eder. Modal matris, en genel halde yüzen yapının rijid cisim ve elastik modlarını kapsar. n_m , (2) seri ifadesinde dikkate alınan mod sayısıdır. (2) tanımının (1)

eşitliğinde kullanımı ve eşitliğin önden \mathbf{U}^T ile çarpılmasıyla yapının genelleştirilmiş hareket denklemi elde edilir:

$$\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{p}}(t) + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{p}}(t) + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{p}(t) = \tilde{\mathbf{f}}(t) \quad (3)$$

Burada, $\tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{U}^T \mathbf{M} \mathbf{U}$, $\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{U}^T \mathbf{C} \mathbf{U}$, $\tilde{\mathbf{K}} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}$, $\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{U}^T \mathbf{f}$ ile belirlenir ve $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$ ve $\tilde{\mathbf{K}}$ sırasıyla genelleştirilmiş kütle, sönüm ve katılık matrisleridir. Genelleştirilmiş dış kuvvet vektörü $\tilde{\mathbf{f}}$, akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin yanında dalga kuvvetleri gibi zorlayıcı dış etkileri de temsil etmektedir. Yapının ω frekansındaki $\tilde{\mathbf{f}} = \tilde{\mathbf{f}} e^{i\omega t}$ harmonik zorlamalarına karşı cevabı (3) ifadesinden

$$(-\omega^2 \tilde{\mathbf{M}} + i\omega \tilde{\mathbf{C}} + \tilde{\mathbf{K}}) \mathbf{p} = \tilde{\mathbf{f}} \quad (4)$$

ile belirlenir.

Akışkan ortamının ideal ve hareketinin irrotasyonel olduğu kabulü altında akışkan hız vektörü \mathbf{v} , bir Φ hız potansiyel fonksiyonu cinsinden $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = \nabla \Phi(\mathbf{x}, t)$ ile ifade edilebilir. $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ konumu temsil etmektedir. Süreklilik şartından Φ Laplace denklemini sağlar: $\nabla^2 \Phi = 0$. Lineer bir analiz kapsamında Φ hız potansiyeli, yapı ve akışkan arasındaki dinamik etkileşimle (yapı hareketlerinin akışkan ortamında neden olduğu değişim ve bu değişimin yapının davranışına olan karşı etkisi) ilişkili bir Φ_R radyasyon potansiyeli ile yapıya gelen serbest yüzey dalgalarının yapının varlığı nedeniyle uğradığı değişimi ifade eden bir Φ_D difraksiyon potansiyelinin birleşimi olarak alınabilir. Bu çalışmada, sadece radyasyon potansiyeli ve ilgili akışkan kuvvetleri üzerinde durulmuştur.

Φ_R , (2) tanımına benzer şekilde \mathbf{p} modal koordinat vektörü ile ilişkilendirilerek verilebilir:

$$\Phi_R(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=1}^{n_m} \Phi_i(\mathbf{x}) p_i(t) \quad (5)$$

Φ_i radyasyon potansiyeli bileşenleridir. Yapının harmonik hareketleri için, akışkan-yapı arakesiti, S_w , üzerinde Φ_R için kinematik sınır şartı,

$$\partial \Phi_R / \partial n = i\omega u_n \quad (6)$$

ile verilir ve akışkan serbest yüzeyi, S_f , üzerinde

$$\partial \Phi_R / \partial z = (\omega^2 / g) \Phi_R \quad (7)$$

birleşik serbest yüzey sınır şartı geçerlidir. Burada, \mathbf{n} , S_w üzerinde akışkan ortamı için dış normal doğrultuyu, u_n yapının \mathbf{n} doğrultusundaki yer değiştirmesini ve g yer çekim ivmesini göstermektedir. Yapının derin suda yüzdüğü kabul edilerek dip için bir duvar sınır şartı uygulanmamıştır.

Φ_R için Laplace denklemi, (6)-(7) sınır şartları ve yapı kaynaklı etkilerin sonsuzda ortadan kalkması gerekliliğini ifade eden bir radyasyon şartıyla tanımlanan sınır değer problemi, serbest yüzey ve radyasyon şartlarını sağlayan bir serbest yüzey Green fonksiyonunun temel çözüm olarak uygulanmasıyla sadece yapının ıslak yüzeyi üzerinde tanımlı bir sınır integral denklemle verilebilir:

$$c(\xi) \Phi_R(\xi) + \int_{S_w} \Phi_R(\mathbf{x}) G_{,n}(\mathbf{x}, \xi) da = \int_{S_w} (\Phi_R)_{,n}(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}, \xi) da \quad (8)$$

Burada, ξ ve \mathbf{x} sırasıyla G Green fonksiyonunun kaynak ve uygulama noktalarıdır ve n indisi ilgili büyüklüğün \mathbf{n} doğrultusundaki türevini ifade etmektedir. $c(\xi)$ serbest terimi, ξ noktası etrafındaki potansiyel alanın problemin tanımlı olduğu bölge içinde kalan oranını belirtir.

İntegral denklemin üzerinde tanımlandığı ıslak yüzeyin yüzey elemanları kullanılarak ayrıklaştırılması ve Φ , Φ_n dağılımlarının eleman düğüm noktalarındaki değerler cinsinden şekil fonksiyonları kullanılarak ifade edilmesiyle, Φ_i bileşeni için (8) eşitliği,

$$c_k(\Phi_i)_k + \sum_{e=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_e} (\Phi_i)_{ej} \int_{S_e} N_j G_{,n} da = i\omega \sum_{e=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_e} (u_{in})_{ej} \int_{S_e} N_j G da \quad , \quad k=1, \dots, n_n \quad (9)$$

haline gelir. Bu ifadede, n_p , n_n ayrıklaştırmada kullanılan eleman ve düğüm noktası sayılarını, n_e e . sınır elemandaki düğüm noktası sayısını, u_{in} i . mod için (6) sınır şartı ile gelen normal doğrultusundaki yer değiştirmeyi ve N şekil fonksiyonlarını göstermektedir; ej indisi ilgili büyüklüğü e . elemanın j . düğüm noktası ile ilişkilendirir. (9) eşitliğinin tüm düğüm noktaları için uygulanması ile ıslak yüzey üzerindeki radyasyon potansiyeli dağılımları için

$$\left[\Phi_1 \dots \Phi_{n_m} \right] = i\omega \mathbf{D}(\omega) \quad (10)$$

yazılabilir. Burada,

$$\mathbf{D}(\omega) = \left(\mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \right) \left[\left(\mathbf{u}_n \right)_1 \dots \left(\mathbf{u}_n \right)_{n_m} \right] \quad (11)$$

ile belirlenir. (9) eşitliğinde sırasıyla Green fonksiyonu ve normal türevine bağlı yüzey integralleri üzerinden düğüm noktaları arası etkileşimleri temsil eden \mathbf{G} , \mathbf{H} katsayı matrisleri, Green fonksiyonunun formu sebebiyle hareket frekansının bağımlıdır ve ayrıca kompleks yapıdadırlar.

Bernoulli denkleminde ikinci mertebeden terimler ihmal edilerek, radyasyon potansiyeli ile ilişkili dinamik akışkan basıncı $P = -i\omega\rho\Phi_R$ ile verilebilir. Burada, ρ akışkan yoğunluğudur. Akışkan tarafından yüzen yapıya uygulanan basınç kuvveti (11) ifadesinden,

$$\mathbf{F}(t) = \rho\omega^2 \mathbf{p} e^{i\omega t} \int_{S_w} \mathbf{D} \mathbf{n} da \quad (12)$$

ile belirlenir. Genelleştirilmiş kuvvet tanımından, radyasyon potansiyeli dağılımı ile ilişkili genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvetinin genliği

$$\tilde{\mathbf{F}}(\omega) = \omega^2 \mathbf{A}(\omega) - i\omega \mathbf{B}(\omega) \quad (13)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$\mathbf{A} = \rho \int_{S_w} \mathbf{U} \operatorname{Re}(\mathbf{D}) \mathbf{n} da \quad , \quad \mathbf{B} = -\rho\omega \int_{S_w} \mathbf{U} \operatorname{Im}(\mathbf{D}) \mathbf{n} da, \quad (14)$$

sırasıyla genelleştirilmiş ek su kütlesi ve hidrodinamik sönüm katsayılarıdır ve \mathbf{U} modal matristir. Yapının genelleştirilmiş hareket denklemi (3), (14) ifadelerinin uygulanmasıyla,

$$\left(-\omega^2 \left(\tilde{\mathbf{M}} + \mathbf{A}(\omega) \right) + i\omega \left(\tilde{\mathbf{C}} + \mathbf{B}(\omega) \right) + \tilde{\mathbf{K}} \right) \mathbf{p} = \tilde{\mathbf{f}}_w \quad (15)$$

şeklini alır. $\tilde{\mathbf{f}}_w$, var olan zorlayıcı dış etkileri (dalga kuvvetleri gibi) göstermektedir.

Radyasyon potansiyeli için yukarıda tanımlanan sınır değer problemi, (6) kinematik sınır şartı ile Neumann tipi bir dış problemidir ve sınır eleman yöntemi ile çözümünün serbest yüzey Green fonksiyonu ile yürütülmesi halinde (bu çalışmada olduğu gibi), Green fonksiyonunun

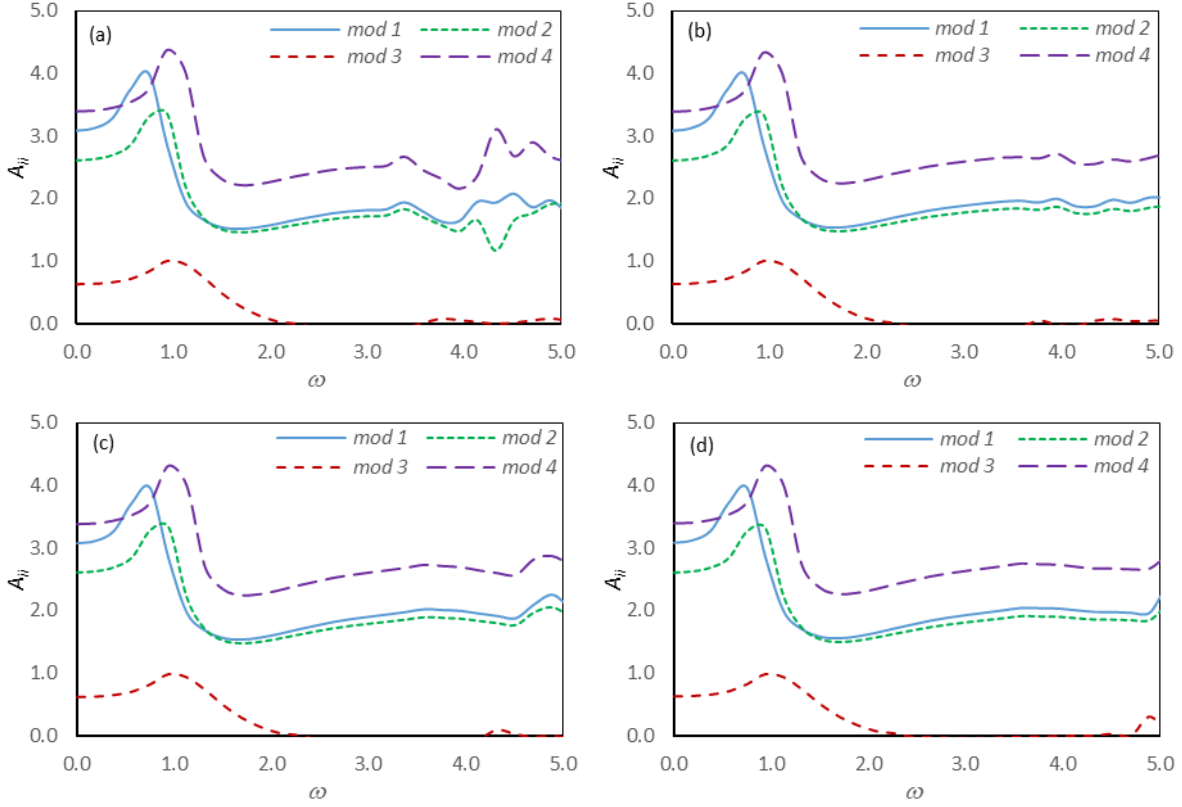
tüm serbest yüzey üzerinde–yüzen yapının sadece dışında değil, gerçekte var olmadığı halde içinde de–akışkan serbest yüzey sınır şartını matematiksel olarak sağlamasına bağlı olarak, aynı ıslak yüzey üzerinde tanımlı Dirichlet tipi iç akışkan problemi ile ilişkili olan belirli frekans değerlerinde doğru olmayan sonuçlar elde edilir [3]. Düzensiz (irregular) frekans etkileri olarak tanımlanan bu durum, fiziksel değil matematiksel bir sorundur ve hesaplanan akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin (ve zorlayıcı dalga kuvvetleri, transfer fonksiyonları gibi ilgili diğer değerlerin) ıslak yüzey geometrisine bağlı olarak değişen frekans değerleri civarında bozulmasına neden olur. Düzensiz frekans etkilerinin ortadan kaldırılması için önerilen yaklaşımlar arasında, sınır integral denklemin ıslak yüzeye ek olarak, yapının içinde olduğu varsayılan muhayyel bir serbest yüzey üzerinde (kısaca, iç serbest yüzey) seçilen belirli noktalara da uygulanması [5], klasik sınır integral denklem yerine sınır integral denklem ve normal türevinin birleşiminin uygulanması [6] ve problem sınır yüzeyinin üzerinde homojen Neumann sınır şartı uygulanan iç serbest yüzeyle genişletilmesi [4] sayılabilir. Bu çalışmanın amacı, genişletilmiş sınır integral yöntemi [4] ile düzensiz frekans etkilerinin giderilmesinde iç serbest yüzey ayrıklaştırılmasının etkisinin, yüzen bir yapının elastik modlarıyla ilişkili akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri (genelleştirilmiş ek su kütlesi ve hidrodinamik sönüm katsayıları olarak) üzerinden incelenmesidir. Yöntemin ana fikri, integral denklemin uygulanacağı sınır yüzeyinin ıslak yüzeyle birlikte üzerinde rijid bir kapak olduğu varsayılan iç serbest yüzeyi de kapsamaktadır. Rijid kapak fiziksel olarak iç serbest yüzeyde oluşacak çalkantı modlarının bastırılmasına karşılık gelir ve homojen kinematik sınır şartları ile tanımlanır.

SAYISAL SONUÇLAR

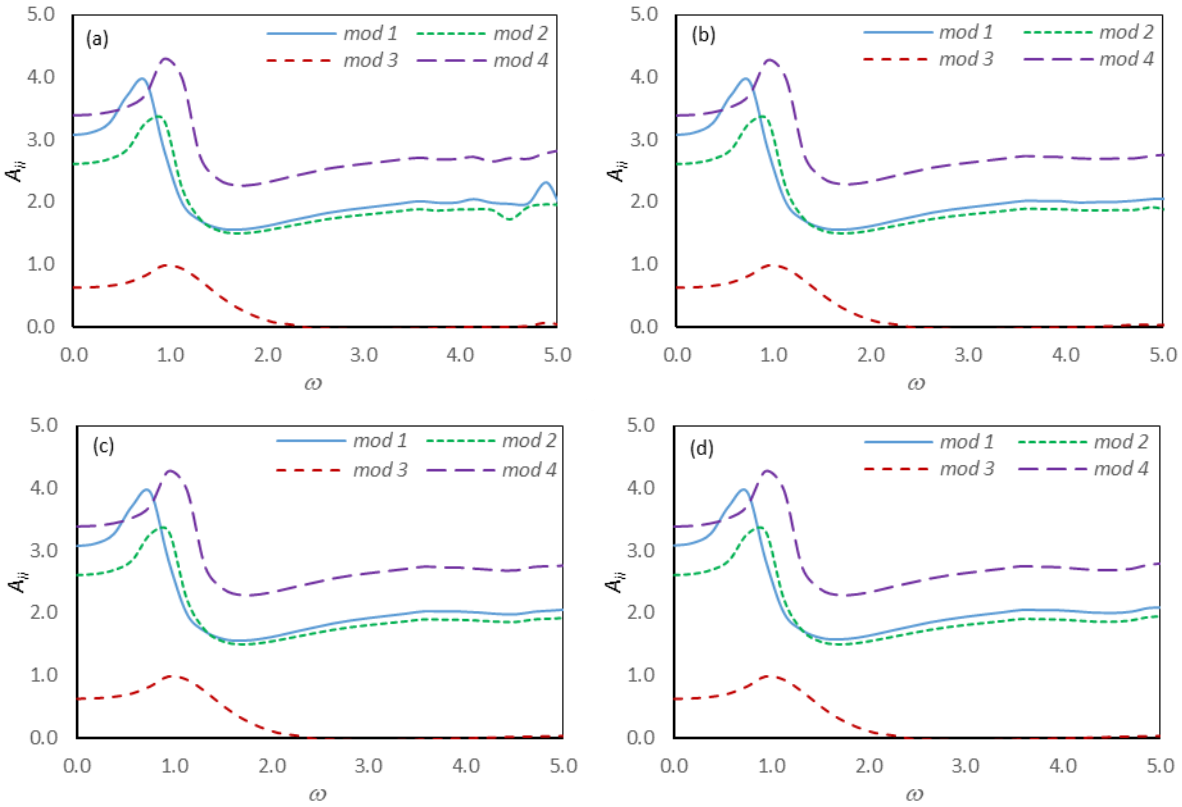
Analiz için, düzensiz frekans etkilerinin göreceli olarak daha belirgin olmasının beklendiği, $100m \times 10 \times 2m$ boyutlarında ve $1m$ draftta sahip levha şekilli bir prizmatik duba seçilmiştir [7]. Duba malzemesinin elastisite modülü 15 GPa, Poisson oranı 0.3 şeklindedir. Dubanın üst ve alt yüzeyleri sırasıyla 15375 kg/m^3 ve 5125 kg/m^3 yoğunlukta alınmış, diğer yüzeyler kütleli kabul edilmiştir. Akışkan 1025 kg/m^3 yoğunluğundadır. Dubanın doğal frekansları ve mod şekilleri, Ansys yazılımıyla, duba yüzeyleri için 984 ve 1984 kabuk elemandan (Shell 181) oluşan iki ayrı model uygulanarak belirlenmiştir; karşılık gelen ıslak yüzey modelleri sırasıyla 624 ve 992 lineer dörtgen elemandan oluşmaktadır. Kinematik sınır şartı için kullanılacak olan mod şekilleri genelleştirilmiş kütle matrisi birim matris olacak şekilde normalize edilmiştir ve diyagonal rijitlik matrisi doğal frekansların karelerinden oluşmaktadır. Islak yüzey üzerine sadece lineer elemanların, iç serbest yüzey üzerine ise lineer ve kuadratik elemanların dağıtıldığı ayrı sınır eleman modelleri kullanılarak, eleman mertebesinin genişletilmiş sınır integral yönteminin düzensiz frekans etkilerini ortadan kaldırmadaki performansına olan etkisi araştırılmıştır. Benzer bir inceleme, iç serbest yüzey modellerindeki eleman sayılarına (sırasıyla 90, 160, 250 ve 360) bağlı olarak da yapılmıştır.

Şekil 1-8’de, lineer ve kuadratik sınır elemanları, iki farklı ıslak yüzey ve dört farklı iç serbest yüzey modeli uygulanarak, (14) eşitliğinden elde edilen genelleştirilmiş ek su kütlesi ve genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm matrislerinin köşegen değerleri (sırasıyla A_{ii} ve B_{ii}), ilk dört elastik mod için $\omega = 0-5 \text{ rad/s}$ aralığında sunulmuştur. Islak yüzey ve iç serbest yüzey üzerindeki eleman sayıları sırasıyla n_e ve n_{ef} ile verilmiştir. İç serbest yüzeyin yüksek mertebeden (lineer ve üstü) sınır elemanları ile ayrıklaştırıldığı uygulamalarda, ıslak yüzey ile serbest yüzeyin kesişim eğrisi boyunca yer alan düğüm noktalarında yüzey normalinin süreksizliği ve iç serbest yüzey üzerinde geçerli duvar şartı sebebiyle, ıslak yüzey ağı ile iç serbest yüzey ağı arasında sınırlı bir boşluk bırakılarak ağ sürekliliğinin bozulması gerektiği gözlenmiştir. Düzensiz frekans etkileri, sunulan eğrilerin genel eğiliminde iniş ve çıkış bozulmaları olarak dikkati çekmekte ve hareket frekansı yükseldikçe daha sık ortaya

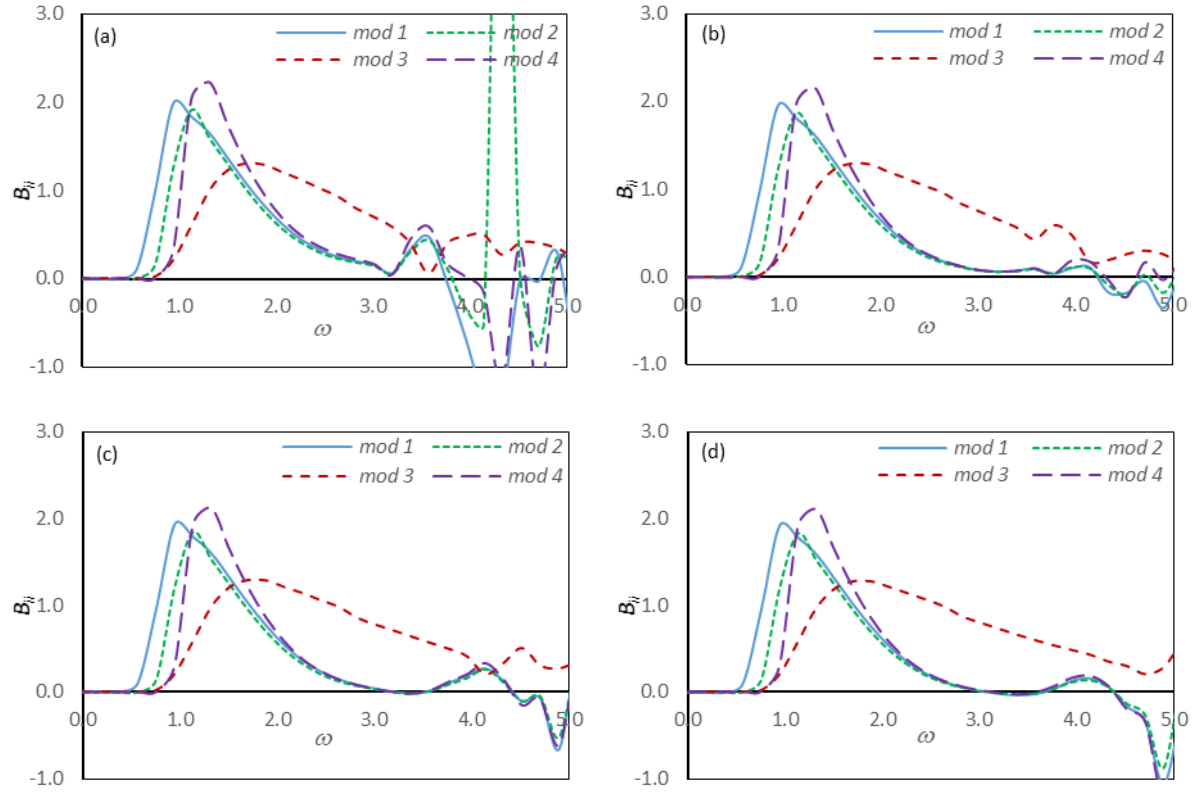
çıkılmaktadır. Etkiler genel olarak, hidrodinamik sönüm katsayılarında ek su kütlesi katsayılarına göre daha belirgindir.



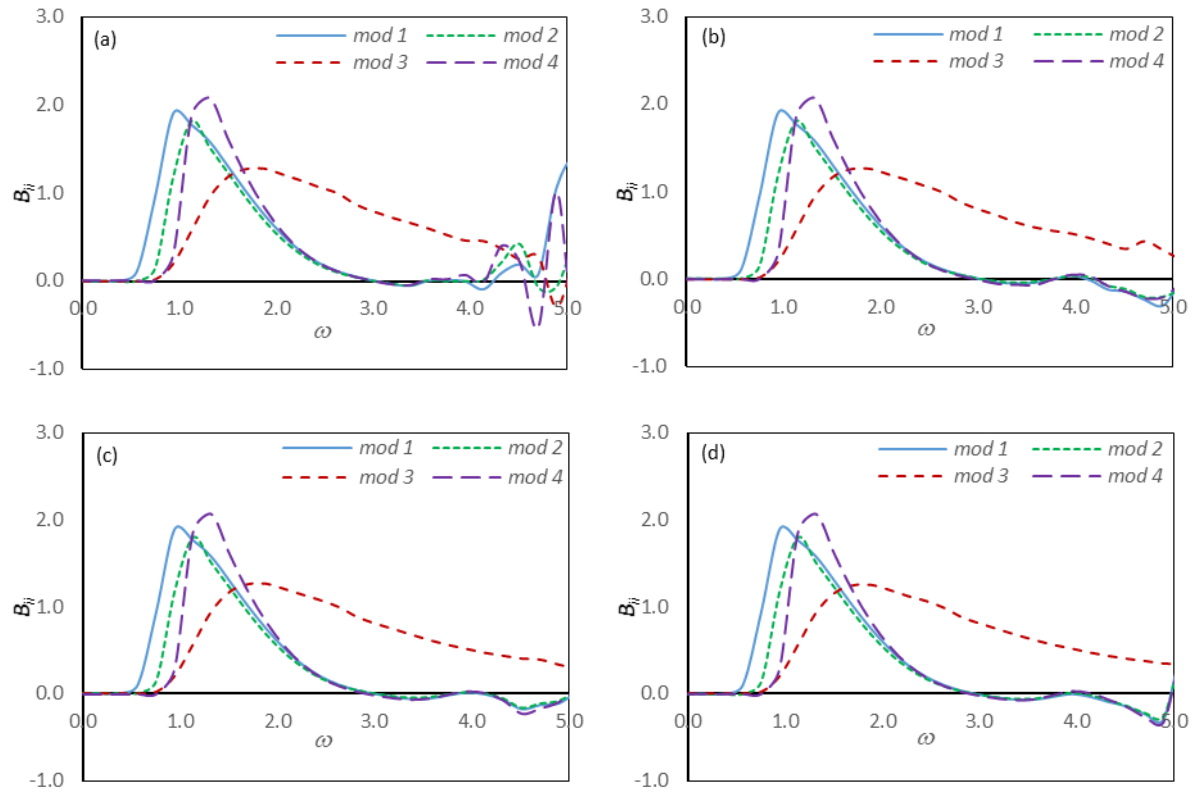
Şekil 1 Linear yaklaşım: $ne = 624$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş ek su kütlesi katsayısı değerleri (kgm^2) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$



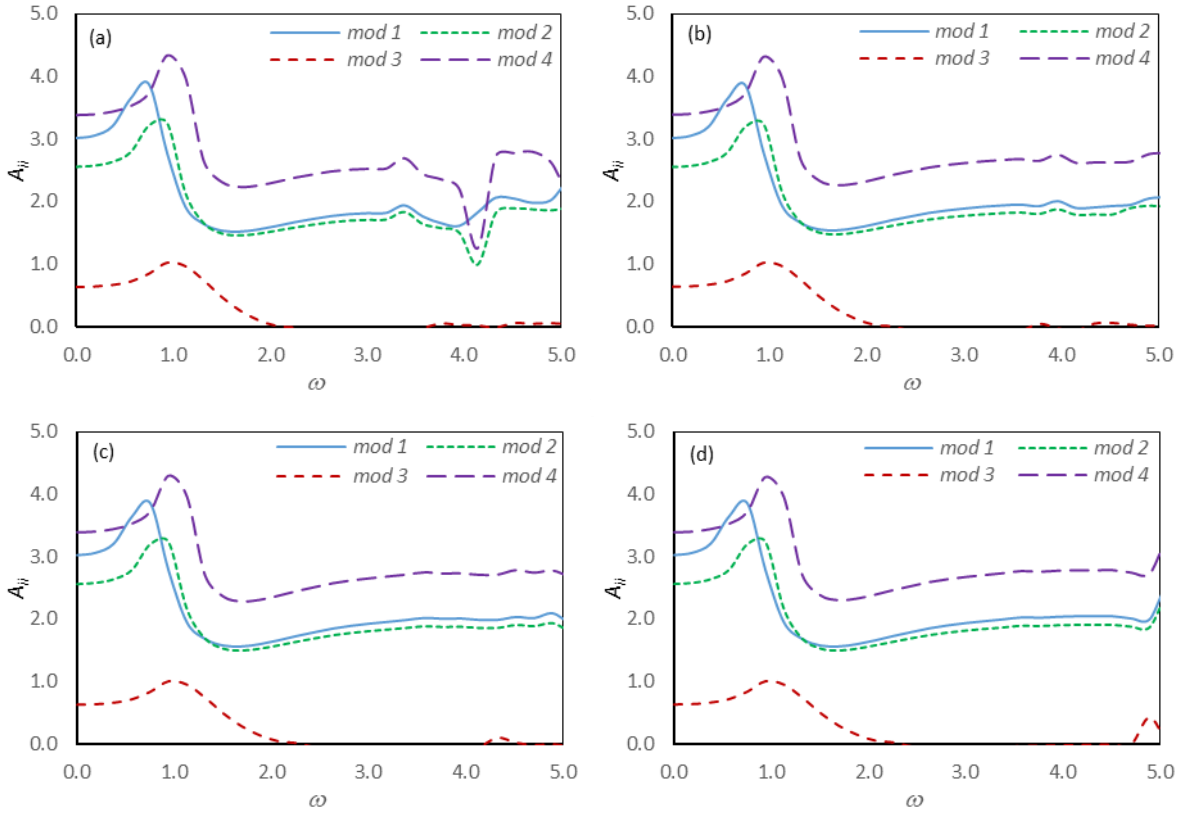
Şekil 2 Kuadratik yaklaşım: $ne = 624$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş ek su kütlesi katsayısı değerleri (kgm^2) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$



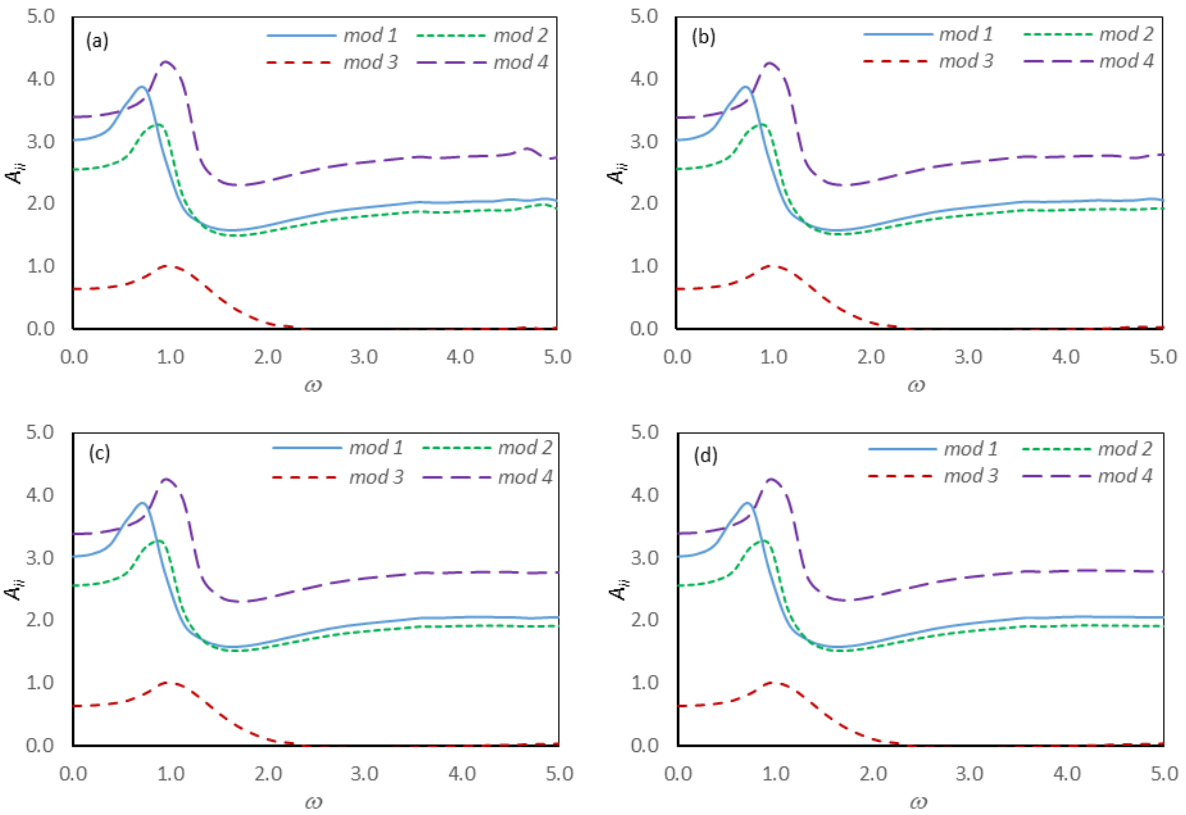
Şekil 3 Lineer yaklaşım: $ne = 624$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm katsayısı değerleri (kgm^2/s) (a) $ne_f = 90$, (b) $ne_f = 160$, (c) $ne_f = 250$, (d) $ne_f = 360$



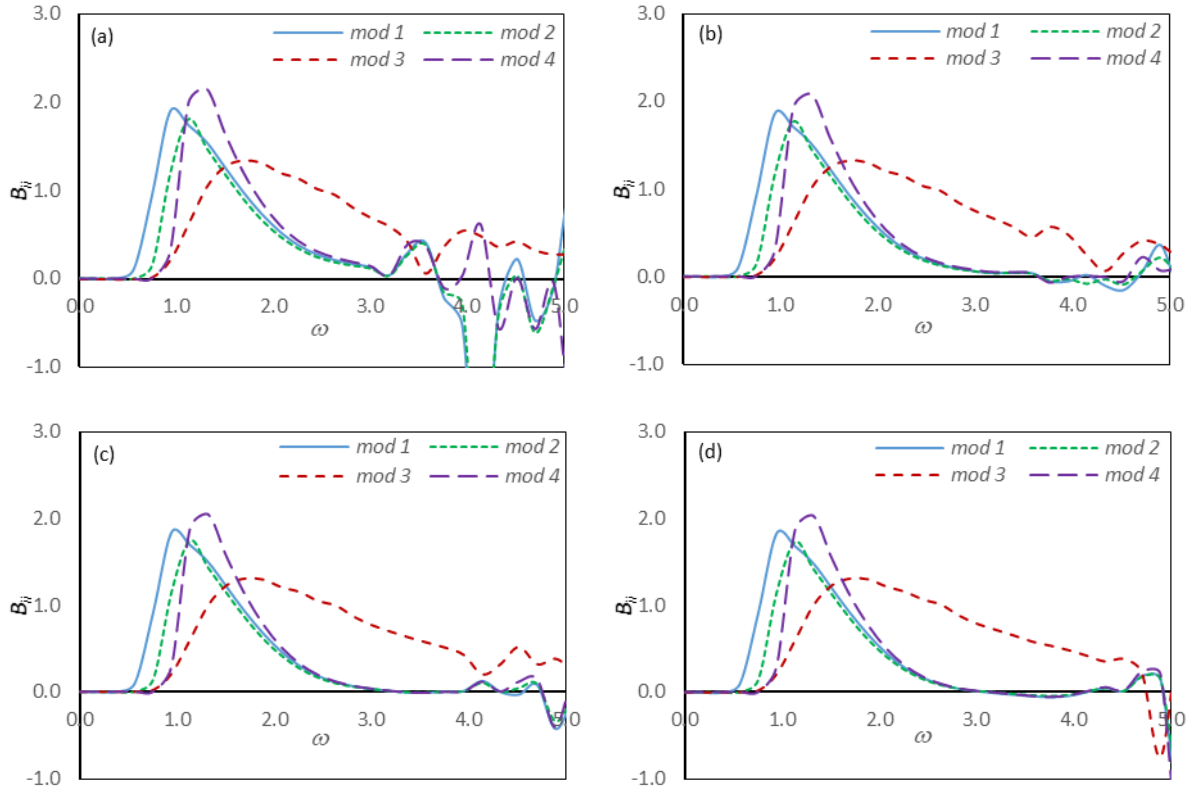
Şekil 4 Kuadratik yaklaşım: $ne = 624$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm katsayısı değerleri (kgm^2/s) (a) $ne_f = 90$, (b) $ne_f = 160$, (c) $ne_f = 250$, (d) $ne_f = 360$



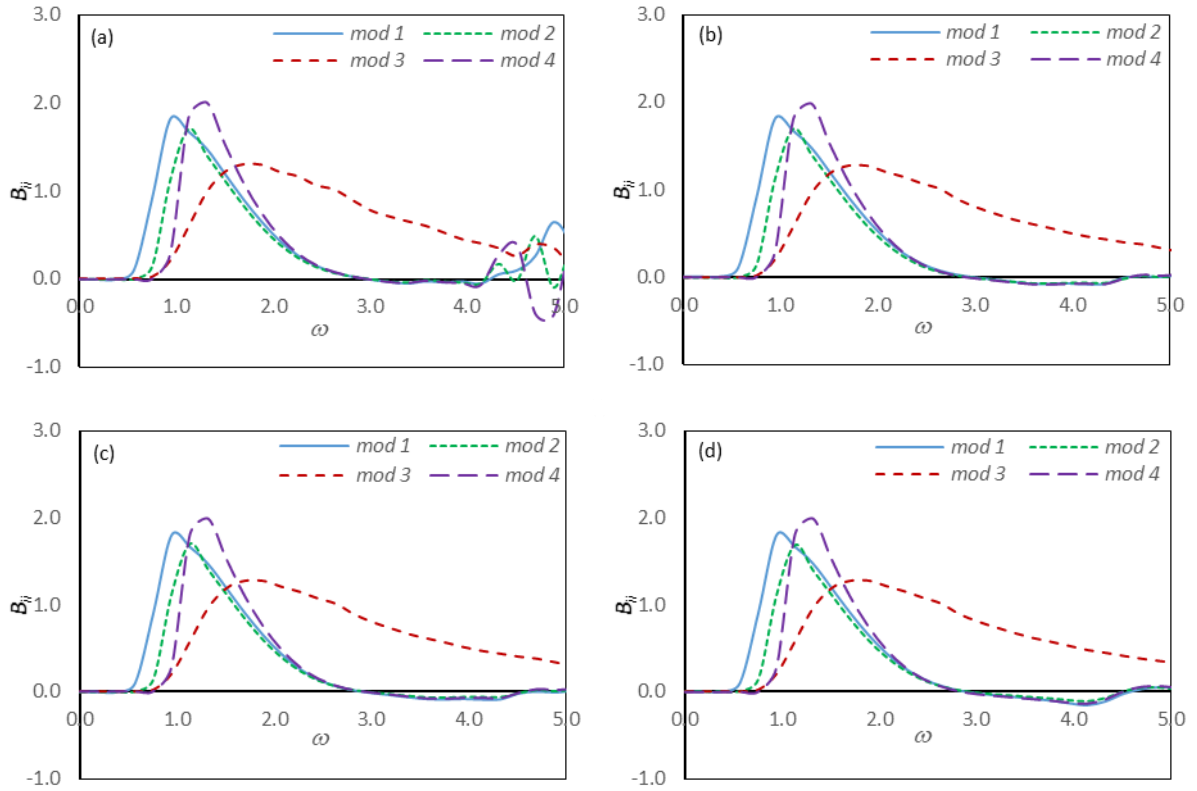
Şekil 5 Lineer yaklaşım: $ne = 992$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş ek su kütlesi katsayısı değerleri (kgm^2) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$



Şekil 6 Kuadratik yaklaşım: $ne = 992$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş ek su kütlesi katsayısı değerleri (kgm^2) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$



Şekil 7 Lineer yaklaşım: $ne = 992$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm katsayısı değerleri (kgm^2/s) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$



Şekil 8 Kuadratik yaklaşım: $ne = 992$ için ilk dört elastik moda ait diyagonal genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm katsayısı değerleri (kgm^2/s) (a) $nef = 90$, (b) $nef = 160$, (c) $nef = 250$, (d) $nef = 360$

Şekil 1-2’de, $ne = 624$ için sırasıyla lineer ve kuadratik sınır eleman modelleriyle hesaplanan A_{ii} değerleri verilmiştir. Her iki grup içinde de, nef değeri yükseldikçe düzensiz frekans etkileri, (i) azalmakta, (ii) daha sınırlı bir bölgede oluşmakta ve (iii) daha yüksek frekans değerlerine ötelenmektedir. Kuadratik elemanlar, ek olarak, az sayıda elemanla sonuçları düzgülendirebilmekte ve daha hızlı yakınsamaktadır. Şekil 3-4’de verilen B_{ii} değerleri için etkiler daha kuvvetlidir ve eleman mertebesine ve eleman sayısındaki artışa bağlı değişimler daha belirgin olarak görülebilmektedir. Kuadratik elemanlı modellerde A_{ii} için $nef = 160, 250, 360$ sonuçları arasında pratik olarak fark olmaması durumunun bir benzeri, burada da $nef = 250, 360$ sonuçları için büyük ölçüde geçerlidir. Şekil 5-6 ve Şekil 7-8’de, aynı nef değerleri ve $ne = 992$ için verilen sırasıyla A_{ii} ve B_{ii} eğrilerinde, ne değerindeki artışın da sonuçları düzgülendirdiği, eşlik eden nef değerindeki artışla birlikte ve özellikle kuadratik modellerle, düzensiz frekans etkilerinin çok sınırlı bir bölgede kısıtlı kaldığı görülmektedir.

SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, serbest yüzey akışkan-yapı etkileşim problemlerinin frekans bölgesinde Green fonksiyonu temelli sınır eleman çözümlerinde karşılaşılan, belirli frekans değerleri civarında sayısal çözümün hatalı sonuçlar üretmesi şeklindeki düzensiz frekans etkileri ve bu etkilerin ortadan kaldırılması için uygulanan genişletilmiş sınır integral yönteminde, iç serbest yüzey ayrıklaştırmasının yöntemin performansı üzerindeki etkileri, levha şekilli prizmatik bir duba için radyasyon problemi çözümlerinde araştırılmıştır. İlgili akışkan-yapı etkileşim kuvvetlerinin belirli bir frekans aralığında gözlenen değişimleri, gerek ıslak yüzey, gerekse iç serbest yüzey sınır eleman modellerindeki iyileştirmelerin düzensiz frekans etkilerinin giderilmesi bakımından belirleyici olduğuna işaret etmekte, ayrıca, kuadratik serbest yüzey elemanlarının lineer elemanlara kıyasla daha etkin olduğunu ortaya koymaktadır. Artan eleman sayılarına rağmen incelenen frekans bölgesinde bütünüyle ortadan kaldırılamayan ve daha iyi sınır eleman modellerinin kullanımını gerektiren düzensiz frekans etkileri, hareket frekansının yükselmesiyle birlikte daha sık olarak gözlenecek ve sınırlandırılmaları için eleman sayısının daha da artırılması gerekecek olsa da, serbest yüzey problemlerinin çözümünün anlamlı olduğu frekans aralığı göz önüne alındığında bu durum pratik olarak önemsizdir.

KAYNAKLAR

- [1] ISSC, Report of Technical Committee II.2: Dynamic Response, Proceedings of the 16th ISSC, 2006: s. 257-352.
- [2] R.E.D. Bishop, W.G. Price, Y. Wu, A general linear hydroelasticity theory of floating structures moving in a seaway, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 316 (1986) 375-426.
- [3] Y. Liu, J.M. Falzarano, Irregular frequency removal methods: theory and applications in hydrodynamics, *Journal of Marine Science and Technology*, 12 (2016) 49-64.
- [4] C.-H. Lee, J.N. Newman, X. Zhu, An extended integral equation method for the removal of irregular frequency effects, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 23 (1996) 637-660.
- [5] S.M. Lau, G.E. Hearn, Suppression of irregular frequency effects in fluidstructure interaction problems using a combined boundary integral equation method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 9 (1989) 763-782.
- [6] C.-H. Lee, P.D. Sclavounos, Removing the irregular frequencies from integral equations in wave-body interactions, *Journal of Fluid Mechanics*, 207 (1989) 393-418.
- [7] H.R. Riggs, K.M. Niimi, L.L. Huang, Two benchmark problems for three-dimensional linear hydroelasticity, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129 (2007) 149-157.