

Bir Dinamik Seperator İncelemesi: Modal Analiz ve Campbell Diagramının Oluşturulması

Buğra ÇAVUŞOĞLU¹, Oğuz GÜVEN², Galip ÇAPÇI³

¹Akana Mühendislik ve Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye, bugracavusoglu@akana.com.tr, ORCID: 0000-0002-5994-0502

²Akana Mühendislik ve Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye, oguzguven@akana.com.tr, ORCID: 0000- 0003 - 2824 - 3277

³Akana Mühendislik ve Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye, galipcapci@akana.com.tr, ORCID: 0000-0002-4401-9315

Akışkan yataklar, akışkan enerjili değirmenler vb. ekipmanlarda parçacıkların boyutlarına göre sınıflandırılması oldukça kritik bir işlem olabilmektedir. Özellikle sürekli süreçlerde sınıflandırma işlemlerinin verimli ve hızlı olması, süreçlerin verimliliğini doğrudan etkileyen unsurlardır. Literatürde “dinamik seperatör” adıyla bilinen ekipmanlar, süreç boyunca aerosol akış içerisindeki parçacıkları iriliğine göre mikron mertebesinde sınıflandırır. Bir çok farklı tasarıma sahip olabilen bu parçalar genel olarak; bir rotor yardımıyla yüksek hızlarda döndürülen ve üzerinde yarıkları bulunan silindirik bir yapıya sahiptirler. Aerosol akışı dinamik seperatör üzerindeki yarıklardan geçer, bu parça hızla dönerek büyük parçaların geçişine izin vermez. Dinamik seperatörlerin geçirgenliğini etkileyen bir çok parameter mevcuttur. Bunlardan seperator geometrisi, aerosol debisi ve dönme hızı en bariz olanlarıdır. Dinamik seperatörün dönme hızı, kontrolü ve takibi kolay bir parametredir. Dönme hızının sınırları yapılacak sınıflandırma işleminin sınırlarını ortaya koyar. Bu çalışmanın amacı, tasarımı gerçekleştirilen dinamik seperatörün modal analizini sonlu elemanlar metodu kullanarak gerçekleştirmek, tasarımın mod şekillerini belirlemek ve Campbell diagramını oluşturmaktır. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler ışığında parçanın dönme hızının kritik değerleri ve böylece hangi dönme hızlarında parçanın kullanımının sakıncalı olduğu belirlenmiştir. 0 rad/s ve 2512 rad/s arasında değişen dönme hızları için modal analiz gerçekleştirildiğinde kritik hızların 1190.5 rad/s, 1700.9 rad/s ve 2417.7 rad/s olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik seperatör, Campbell diagram, mod şekilleri, sonlu elemanlar yöntemi.

© 2022 Published by AInteliala

1. Giriş

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte toz malzemelerin kullanım alanları da hızla artmaktadır. Otomotiv, boya, kimya, tekstil, gıda, ilaç, imalat ve savunma sanayi gibi önemli alanlardaki genişleyen iş hacmi ve gelişen teknolojiler sebebiyle toz malzemelere olan talep giderek artmaktadır [1]. Toz malzemelerin kullanıldığı ilk uygulamaların çoğunda, malzemelerin daha geniş yüzeylere yayılması amacı vardı. Bu genişletme çalışmaları sonucunda gelişen yöntem ve teknolojiler sayesinde günümüzde silisyum karbür, renyum, titanyum diborür, zirkonyum, tantalum, berilyum oksit ve titanyum gibi çok sayıda malzemenin üretimi mümkün olmuştur. İlave olarak, çok yaygın olarak kullanılan alüminyum, silika, alümina, bakır, demir, paslanmaz çelik, bronz ve porselen gibi malzemeleri toz olarak temin etmek mümkündür. Toz malzeme sistemlerinin çoğu eski tarihlerden bu yana kullanılmasına rağmen, teknolojik ürünler için toz kullanımı ancak yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra gerçekleşmiştir [2]. Bununla birlikte tozların istenmediği durumlarda oldukça fazladır. Bir gaz akımının içerdiği katıların tutulması büyük endüstriyel öneme sahiptir. Her türlü malzemenin kontrol altında tutulması; toz üretimi, çevre ve insan sağlığı, geri dönüşüm ve kıymetli malzemelerin kazanımı gibi konular bakımından önemli bir husustur [3]. Toz sınıflandırma teknolojisi, toz hazırlama sürecinin temel parçalarından biridir. Toz malzemeler, geniş spesifik yüzey alanı ve iyi aktivitesi nedeniyle yapı malzemeleri, metalurji, kimya endüstrisi ve tıp alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve toz sınıflandırma teknolojisinin gelişimini önemli ölçüde teşvik etmektedir [4].

Parçacık sınıflandırması, seçilen bir parametreye göre istenen bir tekdüzeliği elde etmek için uygulanan yöntemdir. Sınıflandırıcıların tasarımları genellikle farklı boyutlardaki parçacıkları farklı doğrultularda ve/veya farklı hızlarda yönlendirebilecek şekildedirler. İnce ve kaba ürünler, sınıflandırıcılar yardımıyla zamana veya konuma göre

ayrılabilir. Sınıflandırıcı sistemleri karmaşık bir yapıya sahip olabilir. Çünkü, parçacıkların yörüngelerini belirlemede bir çok kuvvet söz konusu olmaktadır. Bunlar; akışkanların kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri, yerçekimi kuvvetleri, merkezkaç kuvvetleri, elektrostatik ve manyetik alan kuvvetleri, atalet kuvvetleri, basınç gradyan kuvvetleri, konsantrasyon gradyan kuvvetleri ve parçacık-parçacık etkileşimleri gibi kuvvetlerdir. Sınıflandırıcılar geleneksel olarak kullanılan süspansiyon ortamı bakımından yaş ve kuru sınıflandırıcılar olarak iki grupta toplanır. Yaş sınıflandırıcılarda süspansiyon ortamı olarak sıvılar kullanılırken kuru sınıflandırıcılarda gazlar kullanılır. Bununla birlikte, hem sıvı hemde gaz ortamı birlikte kullanan sistemlerde mevcuttur. Sınıflandırıcılar, süspansiyon akışkanından bağımsız olarak mekanik ve mekanik olmayan sınıflandırıcılar olarak iki grupta toplanabilir. Mekanik sınıflandırıcılar, parçacıkların hareketini kontrol eden hareketli parçalar içermektedir. Mekanik olmayan sınıflandırıcılar ise yerçekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti, süspansiyon akışkanının parçacıklar ile etkileşimi vb. fenomenler ile parçacıkları sınıflandırır. Sınıflandırma ekipmanları parçacıkların üzerine uygulanan kuvvetlere göre; yerçekimi sınıflandırıcılar ve merkezkaç sınıflandırıcılar olarak iki gruba ayrılır. Yerçekimi sınıflandırıcıları genellikle çok büyük parçacıkları ayırmak için kullanılır ve çoğunlukla bir ön sınıflandırma elemanı olarak kullanılırlar. Çünkü yerçekimi etkisi ile ince parçaları sınıflandırmak mümkün değildir. Bu noktada, sınıflandırma işleminin daha hassas ve hızlı olması için santrifüj sınıflandırıcılar öne çıkar. Merkezkaç kuvveti, sınıflandırma işleminin gerçekleşmesi için manipüle edilebilmektedir. Böylece, çok daha ince parçalar daha düşük kesim noktalarında sınıflandırılabilir [5].

Dinamik separatörler, sınıflandırma için merkezkaç kuvvetinin kullanıldığı yaş veya kuru süspansiyon ortamında çalışabilen sınıflandırıcılardır. Bunlar; gıda, kimya, ilaç vb. alanlarda ihtiyaç duyulan homojenlik ve yüksek kaliteyi elde etmek için kullanılan ekipmanlardır ve oldukça dar toleranslardaki toz fraksiyon özelliklerini sağlayabilmektedirler. İnce parçacıkların yüksek verimle üretilmesi gereken diğer alanlarda da çeşitli endüstriyel uygulamalara sahiplerdir. Dinamik separatörde; aerosol akışı, hızla dönen rotor kafesi üzerindeki bıçakların arasından veya yarıklardan geçmeye zorlanır. Bu, aerosolün yüksek hızlarda dönen bir girdap formunda akmasını sağlar. Bunun sonucunda iri parçacıkların üzerindeki merkezkaç kuvveti nispeten yüksek olur. Böylece iri parçacıklar girdap merkezinin dışına doğru savrulur. İnce parçacıklar, aerosol akımı ile rotor kafesi üzerindeki kanat aralıklarından veya yarıklardan geçerek doğrudan bir torba filtreye veya bir siklon ayırıcıya taşınır. İnce parçacıklar, sınıflandırılması tamamlanmış ürün olarak toplanırken kaba parçacıklar yeniden öğütme işlemine gönderilir [6].

Sınıflandırılması istenen fraksiyonun boyutu küçüldükçe rotor kafesi dönüş hızını arttırmak gerektiği bilinmektedir. Ancak yüksek dönme hızları ile birlikte rotor kafesinde bazı problemler ortaya çıkabilir. Bu problemler gürültü, ayırma veriminin düşmesi, ekipman arızası vb. sorunlara yol açabileceği gibi can ve mal kayıplarına da sebep olabilecek kazalara yol açabilirler. Bu açıdan, üretilecek rotor kafesinin tasarımı dikkatle yapılmalı ve bu tasarımın istenen çalışma parametrelerinde güvenle çalışabileceği doğrulanmalıdır.

Bir yapının dinamiği söz konusu olduğunda oraya çıkan zorluk; yapının titreşim tepkilerinin analitik, sayısal veya deneysel araçlar veya bunların bir kombinasyonunu kullanarak anlaşılmasıdır. Yapılar, dışarıdan bir etki uygulandığında geometrik özellikleri ve üretildiği malzemeye bağlı olarak farklı frekanslarda titreşirler. Bu frekanslar yapının sahip olduğu doğal frekanslardır ve serbestlik derecesine göre farklı sayılarda olmaktadır. Dışarıdan gelen zorlanmış etkinin frekansı ile yapının doğal frekansına yaklaştıkça; sistemdeki titreşim sönümlenemez ve titreşim kuvvetlenerek artar. Bu durum rözenans olarak adlandırılır. Bu titreşimler farklı şekillerde olabilir. Sistemin yapısına bağlı olarak meydana gelebilecek farklı titreşim şekilleri vardır ve bunlar mod şekilleri olarak adlandırılır. Mod şekli olarak ifade edilen her mod; modal parametreleri olan doğal frekansı, modal sönümlenme faktörü ve karakteristik yer değiştirmesi ile tanımlanır. Bu şekiller, dışarıdan gelen zorlanmış etkinin özelliklerine göre şiddetlenir veya sönümlenir. Sisteme gelen zorlanmış etkinin frekansı, bu mod şekillerinin herhangi birinin doğal frekansında veya buna yakın olabilir. Bu durumda; bir mod şeklinin genliği artarken diğer mod şekilleri sönümlenir. Sisteme uygulanan zorlanmış etkinin şiddeti değiştiğinde sistem üzerinde oluşan titreşimin frekansı da değişir. Bu değişim ile sistemin mod şekillerinin doğal frekansları aynı grafikte incelenir ve bu grafiğe Campbell diyagramı adı verilir. Campbell diyagramı, sistemin çalışma sınırlarını ortaya koyar. Zorlanmış etki ile değişen titreşim frekansı, bir mod şeklinin doğal frekansı ile çakışıyorsa; sistem o koşullarda sönümsüz olarak titreşecek ve sistemin yapısal bütünlüğünü tehdit eden bir durum oluşacaktır. Sistemin doğal frekansları ile mod şekillerinin belirlenmesi işlemine modal analiz denilmektedir ve dinamik sistemlerde modal analiz çok önemli bir araçtır. Mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının önemi iyi anlaşıldıkça, dinamikleri doğru bir şekilde göz önünde bulundurarak tasarım yapmak önemli hale gelmiştir. Sonlu eleman analizi, özellikle dinamik özelliklerin incelenmesi gerektiğinde mühendislere çok yönlü bir tasarım ve doğrulama aracı olmuştur. Dinamik sistemlerde sonlu elemanlar analizinin önemli bir kısmı modal analizdir [7].

Bu çalışmada, firmamızda geliştirilen dinamik seperatör ekipmanı için tasarlanan rotor kafesi için modal analiz yapılmış ve sonuçların Campbell diyagramındaki incelemesi sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

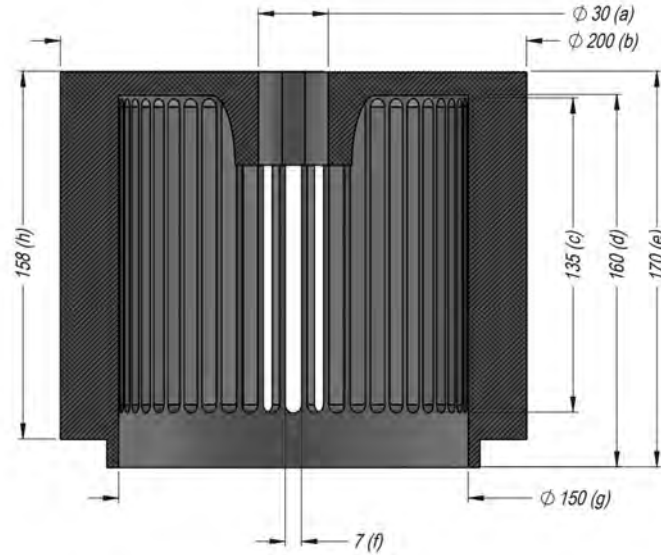
Bu bölümde rotor kafesinin özellikleri, rotor kafesinin modal analizi için kullanılan yöntem ve analiz çıktıları verilecektir.

A. Rotor Kafesi Yapısı

Rotor kafesi, Şekil.1’de verilen ölçülerde ve ASTM B209-01 standartlarındaki 7075-T6 alüminyum alaşımı malzemesinden üretilmiştir. Şekil.2’de izometrik görüntüsü verilmiş olan rotor kafesi 50 adet kanala sahiptir. Rotor kafesi malzemesinin analiz için gerekli fiziksel özellikleri Tablo.1’de verilmiştir.

Tablo 1: Rotor kafesi malzemesinin fiziksel özellikleri

Malzeme	Kütle yoğunluğu, kg/m ³	Young modülü, GPa	Poission oranı
7075-T6	3000	70	0,32



*Ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 1: Rotor kafes yapısı (a. Mil bağlantı delik çapı, b. Rotor kafesi dış çapı, c. Kanal uzunluğu, d. Rotor kafesi iç derinliği, e. Rotor kafesi uzunluğu, f. Kanal genişliği, g. Rotor kafesi iç çapı, h. Kanal gövdesi uzunluğu.)

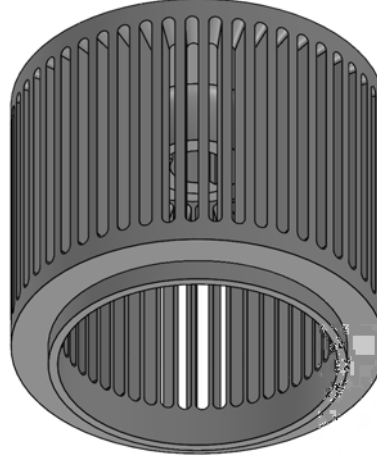
B. Nümerik Modelleme

Modal analiz, sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak ANSYS yazılımı (ANSYS v14.6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizin gerçekleştirildiği bilgisayarın donanım özellikleri aşağıdaki gibidir:

- i7-8700K cpu @3.7 GHz,
- 32 gb RAM,
- NVIDIA Quadro P4000.

Tet10 tipi hücreler kullanarak çözüm ağı oluşturuldu. Oluşturulan çözüm ağında toplam 675 871 düğüm noktası ve 413 295 hücre kullanılmıştır. Çözüm ağını oluşturan hücrelerin ortalama kalitesi 0.82’dir. Dönme merkezi geometrik merkezdedir. Rotor kafesi sınır koşulları için 0, 314, 628, 1256 ve 2512 rad/s dönme hızı değerleri programa

verilmiştir. ANSYS analiz ayarları; 20 mod şekli için verilen hızlardaki doğal frekansları belirleyecek ve çıkan sonuçların Champbell diagramını gösterecek şekilde yapılmıştır.



Şekil 2: Rotor kafesi izometrik görüntüsü

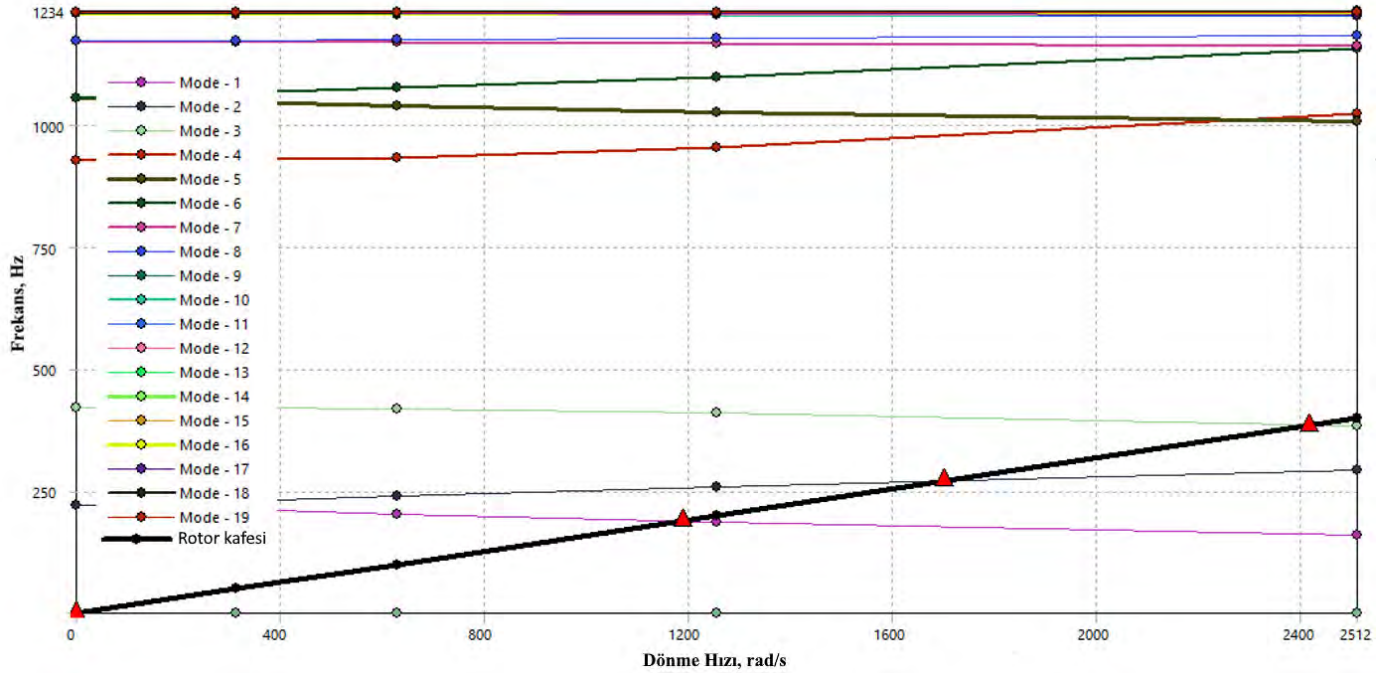
C. Analiz Sonuçları

Mod şekillerinden bir tanesinin frekans değerleri belirlenen hız aralığında 0 (sıfır) Hz olarak belirtildiği için analiz sonuçlarında belirtilmemiştir. Yapılan analizde 19 farklı mod şekli için farklı dönme hızlarındaki frekansları Tablo.2’de verildiği gibi bulunmuştur.

Tablo 2: Mod şekillerinin farklı dönme hızlarındaki frekansları

Mod	Dönme Hızı, rad/s					Frekans, Hz
	0	314	628	1256	2512	
1	221,14	212,42	203,94	187,78	159,15	
2	221,14	230,06	239,15	257,64	294,53	
3	421,84	421,1	418,91	410,6	382,69	
4	927,92	929,54	934,39	953,31	1022,8	
5	1057,1	1048,6	1040,9	1027,5	1008,3	
6	1057,1	1066,4	1076,5	1099,3	1156,2	
7	1172,	1170,7	1169,3	1166,6	1161,3	
8	1172,1	1173,4	1174,7	1177,4	1182,9	
9	1228,2	1227,7	1227	1225,8	1223,3	
10	1228,3	1227,9	1227,4	1226,3	1224,2	
11	1228,4	1228,3	1227,6	1226,2	1223,4	
12	1228,5	1228,7	1228,3	1227,4	1225,6	
13	1228,9	1228,9	1229,5	1230,9	1233,3	
14	1229,1	1229	1229,6	1230,7	1230,8	
15	1229,2	1229,6	1230,4	1231,8	1234,6	
16	1229,2	1229,6	1230,1	1231	1232,8	
17	1230,1	1229,7	1229,3	1228,6	1227	
18	1230,1	1230,5	1230,9	1231,5	1233,1	
19	1230,8	1230,8	1230,8	1230,6	1232,8	

Şekil.3’te gösterilen Campbell diyagramı yardımı ile 2500 rad/s’nin altındaki dönüş hızlarında 3 farklı mod şekli için rözenans oluşturacak dönme hızı (kritik hız) belirlenmiş ve Tablo.3’te gösterilmiştir.

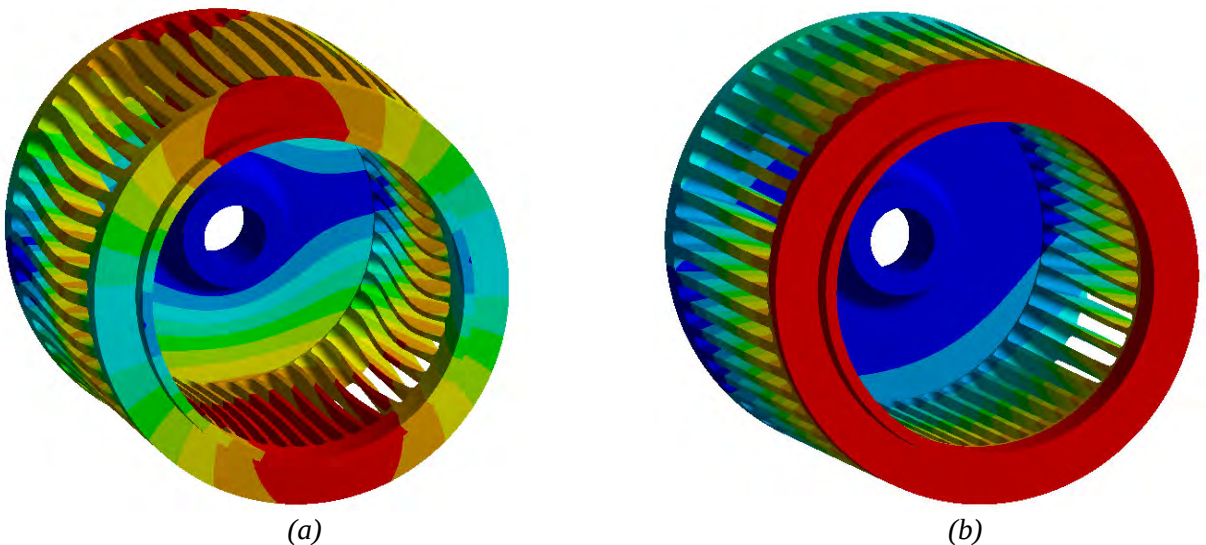


Şekil 3: Rotor kafesi için Campbell diyagramı

Tablo 3: Kritik hızlar

Mod	Kritik Hız, rad/s
1	1190,5
2	1700,9
3	2417,7

Tasarlanan dinamik seperatörde rotor kafesi en fazla 700 rad/s (7000 RPM) hızla dönebilecektir. 3 numaralı mod şekli sistemin en yüksek dönme hızının 3 katından daha yüksek bir değerdir. Bu sebeple risk değerlendirmesi yalnızca 1 ve 2 numaralı mod şekilleri üzerinden yapılmıştır. Bu mod şekilleri ile rotor kafesinde meydana gelecek deformasyon Şekil.4'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4: Mod şekilleri deformasyon gösterimi (a. 1 numaralı mod şekli, b. 2 numaralı mod şekli)

3. Tartışma

AKANA Mühendislik ve Ticaret A.Ş. tarafından geliştirilen dinamik seperatör ayırıcının rotor kafesi için yapılan modal analiz ile görülmüştür ki:

- Rotor kafesinde meydana gelmesi muhtemel iki adet mod şekli vardır.
- Rotor kafesinin en düşük kritik hız değeri yaklaşık 1190 rad/s'dir.
- Rotor kafesinin rözenansa girmesine sebep olacak diğer kritik hız değerleri 1700,9 rad/s ve 2417,7 rad/s'dir.
- Rotor kafesinin en yüksek çalışma hızı olan 700 rad/s'dir. Bu hız değeri, 1190 rad/s olan en düşük kritik hız değerinin altında kalmaktadır.
- Bu rotor kafesinin modal analizi, sistemin titreşim rözenansına girmeden çalışacağını göstermektedir.

Bu çalışma, 7075-T6 alüminyum alaşımından yapılmış bir rotor kafesinin modal analizini kapsamaktadır. Dinamik seperatörde sınıflandırılacak malzemenin özelliklerine göre kafes malzemesi seçimi yapmak ekipman ömrünü uzatacaktır. Bu bağlamda, farklı malzemelerden imal edilecek rotor kafeslerinin modal analizlerinin incelenmesi mühendislik açısından anlamlıdır.

Bu çalışmada, sınıflandırılacak aerosol akışın modal analize etkileri ihmal edilmiştir. Ancak, zorlayıcı etki olan aerosol-rotor kafesi arasındaki momentum aktarımlarında bu analize dahil edilmesi tasarım sürecine faydalı bilgiler sağlayacaktır.

Bu çalışma, yalnızca bir tek geometriye sahip rotor kafesi üzerinde yapılmıştır. Rotor kafesinin geometrik değişkenlerinin olduğu bir çalışma yapmak; rotor kafesinin modal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] K. Kumar and W. P. Davim, Composites and advanced materials for industrial applications, Hershey, USA, 2018.
- [2] D. Alman and J. Newkirk, Powder Metallurgy Alloys and Particulate Materials for Industrial Applications, The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, USA, 2000.
- [3] J. R. Couper, W. R. Penney, J. R. Fair and S. M. Walas, Solid-gas separation, Chemical Process Equipment Selection and Design, 3rd ed., Burlington, USA, 2010.
- [4] F. Jia, X. Mou, Y. Fang and C. Chen, A New Rotor-Type Dynamic Classifier: Structural Optimization and Industrial Applications, Processes, 9(1033), June, 2021.
- [5] K. Heiskanen, Particle Classification, Chapman & Hall, London, 1993.
- [6] Guizani, R.; Mokni, I.; Mhiri, H.; Bournot, P. CFD modeling and analysis of the fish-hook effect on the rotor separator's efficiency. Powder Technology, 264, 149–157, 2014.
- [7] J. He and Z. Fu, Modal Analysis, Butterworth-Heinemann, Delhi, 2001.