

ORTA BÜYÜKLÜKTE BİR NAKLİYE UÇAĞININ EKİPMAN RAFI TASARIMI

Mehmet Efruz YALÇIN¹
ODTÜ, TAI, Ankara

Yavuz YAMAN²
ODTÜ, Ankara

Muvaffak HASAN³
TAI, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada orta büyüklükte bir nakliye uçağı için 29 adet ekipman taşıyacak olan bir ekipman rafının tasarımı ve analizi yapılmıştır. Nakliye uçağına yeni ekipmanlar eklenerek uçağın kullanım alanlarının artırılması hedeflenmiştir. Tasarlanan ekipman rafı uçağın uçuş koşullarında maruz kalacağı nihai yükler olan 3 ana eksendeki 7g'lik ivmelere dayanmakta ve genel havacılık kurallarına uygun olan minimum 0.2 değerindeki güvenlik faktörlerini sağlamaktadır. Bu çalışmada ekipman rafının tasarımı ve analizi Unigraphics, MSC.Patran® ve MSC.Nastran® ticari yazılımları kullanılarak yapılmış, ek olarak el ile yapılan bağlayıcı analizlerini kolaylaştırmak amacıyla MS Excel ve FORTRAN yazılımları kullanılarak iki adet program oluşturulmuştur.

GİRİŞ

Havacılık endüstrisi gelişen teknolojiden en fazla etkilenen endüstri dallarından biridir. Gelişen teknoloji hem uçakların kullanım alanlarında hem de kullanılan sistemlerin fonksiyonlarında geliştirmeler yapılmasını gerektirmektedir. Gelişen teknolojiye ve ortaya çıkan gereksinimlere uygun olarak, sürekli olarak yeni uçaklar tasarlanmaktadır. Ancak, gerek bu uçakların tasarlanmasının uzun zaman ve yüksek harcamalar gerektirmesi, gerekse de kullanılmakta olan uçakların yeni uçaklarla değiştirilmesinin maliyetinin çok yüksek olması, kullanımda olan uçakların yeni sistemlerle geliştirilmesini genel olarak benimsenen bir yöntem yapmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan ekipman rafı bahsedilen geliştirme çalışmalarından biri çerçevesinde orta büyüklükte bir nakliye uçağına eklenecek olan 29 adet yeni ekipmanı taşıyacak olan bir tasarımdır. Bu ekipmanların toplam ağırlığı yaklaşık olarak 343 kg olup buna ek olarak yaklaşık 51 kg konektör ve kablolarla birbirlerine bağlanacaktır. Raf yapısının boyutlarına göre yaklaşık olarak 46 kg'lık kapaklar ve raf yapısını oluşturulan ve toplamda 65 kg olan parçalar da eklenince yapının toplam ağırlığı yaklaşık 505 kg olmaktadır. Bu yapı uçuş sırasında maruz kalınabilecek nihai ivmeler olan uçağın üç ana eksenindeki 7g'lik ivmelerde kırılmayacak, ayrıca limit yükler altında plastik deformasyona uğramayacak şekilde tasarlanmıştır. Genel havacılık kurallarına göre yapı her yük altında en az 0.2 değerinde bir güvenlik faktörünü (margin of safety) sağlamaktadır [3].

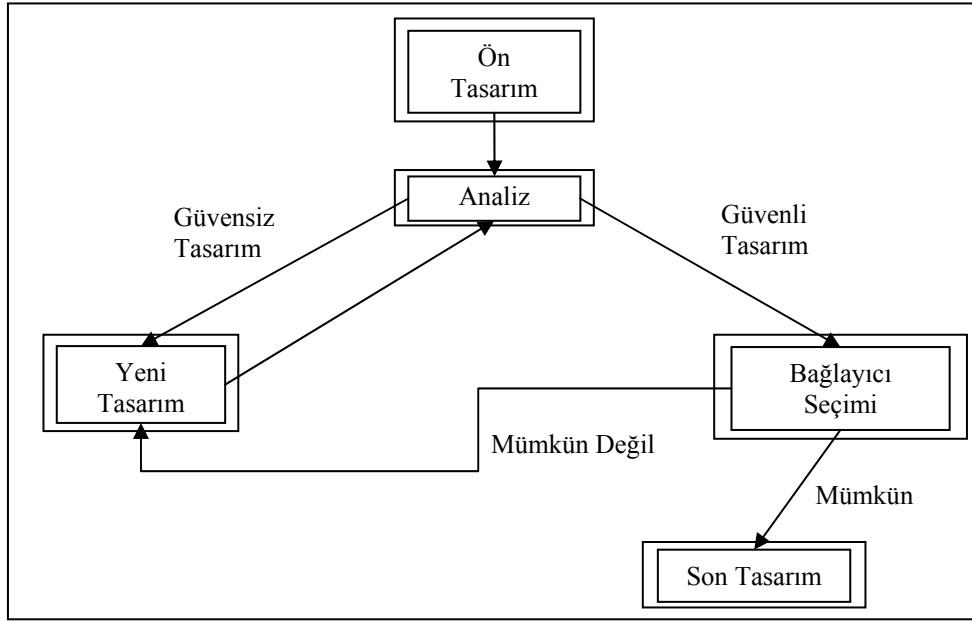
Ekipman rafının tasarım sürecinde izlenen yaklaşım Şekil 1'de verilmiştir [1]. Bu süreç Unigraphics programında yapılan ön tasarım safhasıyla başlamış ve yapısal analizler MSC.Patran® ve MSC.Nastran® kullanılarak yapılmıştır. Güvenli bir tasarım yapıldıktan sonra bağlayıcı (fastener)

¹ Doktora Öğrencisi, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh., E-posta: e129895@metu.edu.tr,
TAI Yapısal Analiz Birimi, E-posta:eyalcin@tai.com.tr

² Prof. Dr., ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh., E-posta: yaman@metu.edu.tr

³ Dr., TAI Yapısal Analiz Şefi, E-posta: mhasan@tai.com.tr

seçimi ve analizi, el hesaplamaları ve geliştirilen bilgisayar programları kullanılarak yapılmış; tasarım tamamlanmıştır.

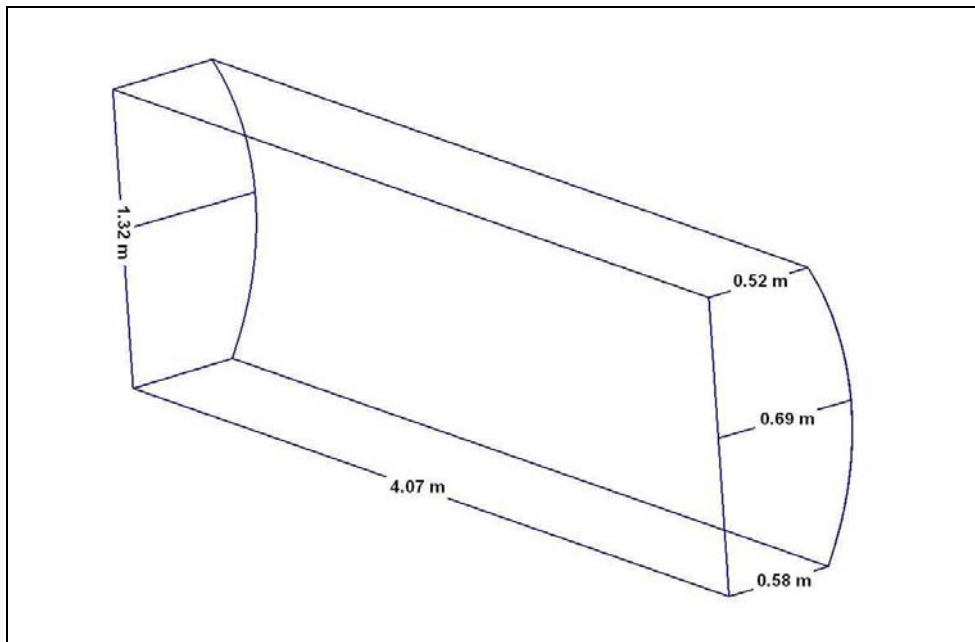


Şekil 1 Tasarım Süreci

Bu çalışmada geliştirilen iki bilgisayar programının temel amacı, genelde el ile yapılan bağlayıcı seçimi işlemini mümkün olduğunca otomatikleştirerek, gereken zamanı, hata yapma olasılığını ve kullanıcının sarf edeceği emeği azaltmaktır.

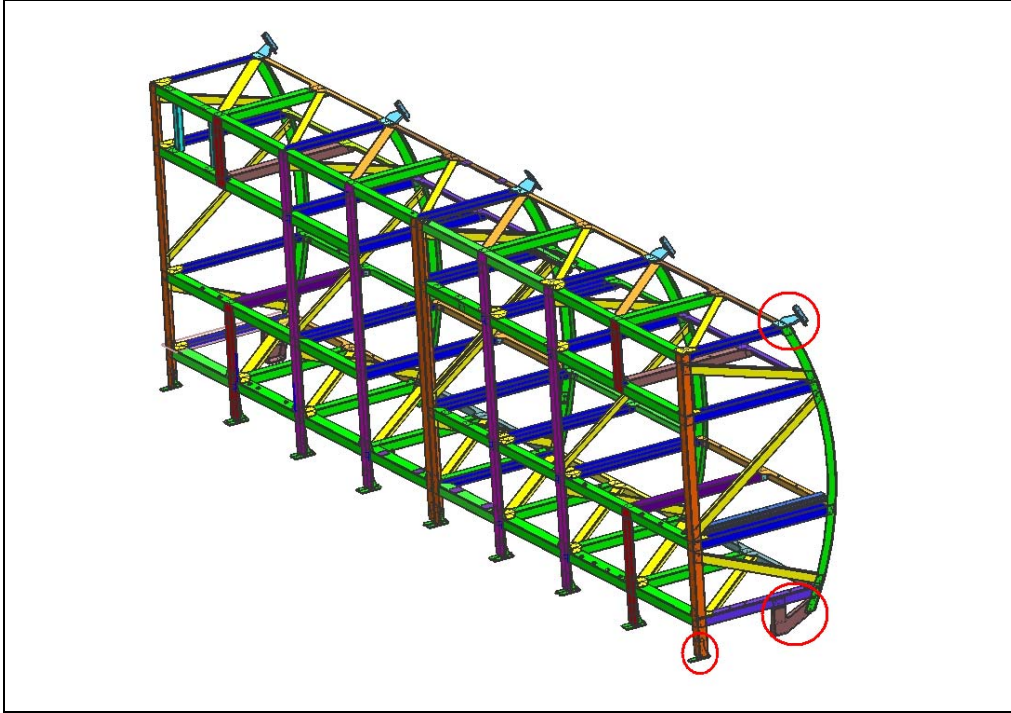
EKİPMAN RAFI TASARIMI VE ANALİZİ

Bu çalışmada tasarlanmış olan ekipman rafının dış geometrisi ve boyutları uçtaki mevcut yapıların geometrik özellikleri de göz önüne alınarak Şekil 2'de gösterildiği gibi belirlenmiştir [1].



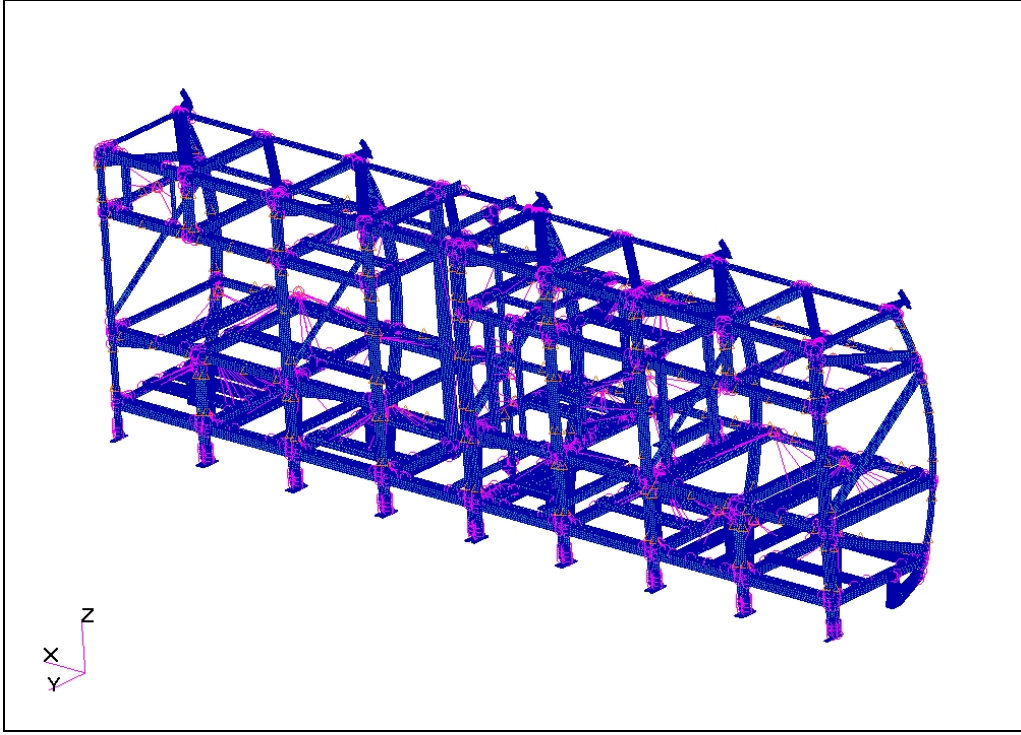
Şekil 2 Ekipman Rafı Boyutları ve Dış Geometrisi

Uçaklarda çerçeve (frame) ve kiriş (stringer) gibi yapılar birincil yapılar olarak; bu çalışmada tasarlanan ekipman rafı gibi yapılar da ikincil yapılar olarak tanımlanır. İkincil yapıların tasarımlarındaki en önemli etmenlerden biri bu yapılarda oluşacak yüklerin birincil yapılara mümkün olduğu kadar düzgün olarak iletilmesidir. Bu çalışmada ivme değerlerinin parçalar üzerinde yaratacağı yüklerin birincil yapılara dağıtılması için raf yapısıyla birincil uçak yapısı arasında bağlantı elemanı (fitting) adı verilen ve yüksek yüklerle dayanıklı olan özel parçalar kullanılmış, analizler sonucu elde edilen güvenli ekipman rafı tasarımı Şekil 3'te gösterilmiştir [1]. Ekipman rafında kullanılan bağlantı elemanlarından üç tanesi şekilde kırmızı çemberler içine alınmıştır. Bu elemanlar ekipman rafının uçağın birincil yapılarına bağlandığı bölgelerde bulunmaktadır.



Şekil 3 Güvenli Ekipman Rafı Tasarımı

Ekipman rafının yapısal analizi için MSC.Patran® ticari yazılımı kullanılarak bir sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Raf üzerindeki ekipmanların modellenmesinde genel yaklaşıma uygun olarak tek boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Bu tek boyutlu elemanlara temsil ettikleri ekipmanların ve kabloların ekipman destekleri tarafından taşınan kısımlarının toplam kütleleri atanmıştır. Bu kütleler de ekipmanların desteklere bağlandığı noktalara MSC.Patran® yazılımında yük dağıtımı için kullanılan RBE3 tipi elemanlar kullanılarak bağlanmıştır. Ekipman rafının sonlu elemanlar modeli Şekil 4'te gösterilmiştir [1].

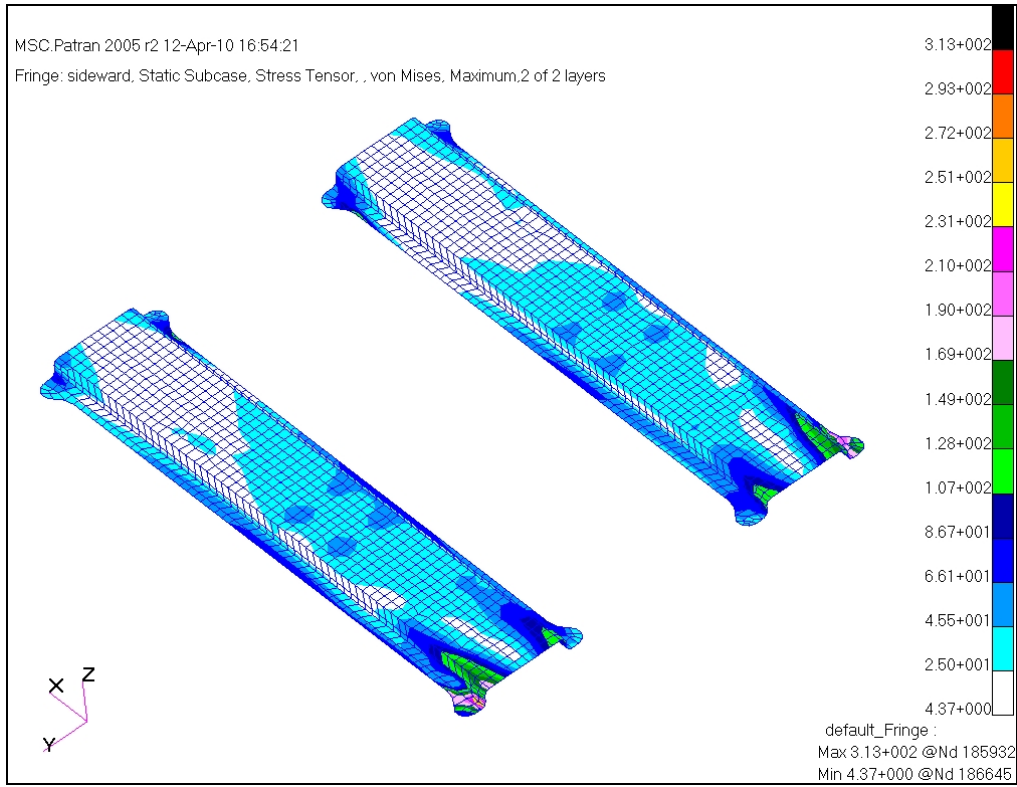


Şekil 4 Ekipman Rafının Sonlu Elemanlar Modeli

Oluşturulan yapının üç ana eksendeki davranışının incelenebilmesi için, Şekil 4'te gösterilen sonlu elemanlar modeline her ekseninde 7g değerindeki ivmeler uygulanmıştır. Uygulanan bu ivmeler nihai yük olarak adlandırılan ve uçağın uçuş sırasında maruz kalacağı en yüksek yükler olan limit yüklerin bir katsayıyla çarpılmasıyla bulunan yüklerdir. Bu çalışmada genel havacılık uygulamalarına uygun olarak 1.5 katsayısı kullanılmıştır [3].

Uygulanan ivme değerleri uçuş yönüne göre ileri (forward), sağa (sideward) ve aşağı (downward) olarak belirlenmiştir. Ekipman rafını oluşturan tüm parçalar bu üç ivme durumu altında tasarım gereksinimi olan 0.2 değerinden daha büyük güvenlik faktörlerini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

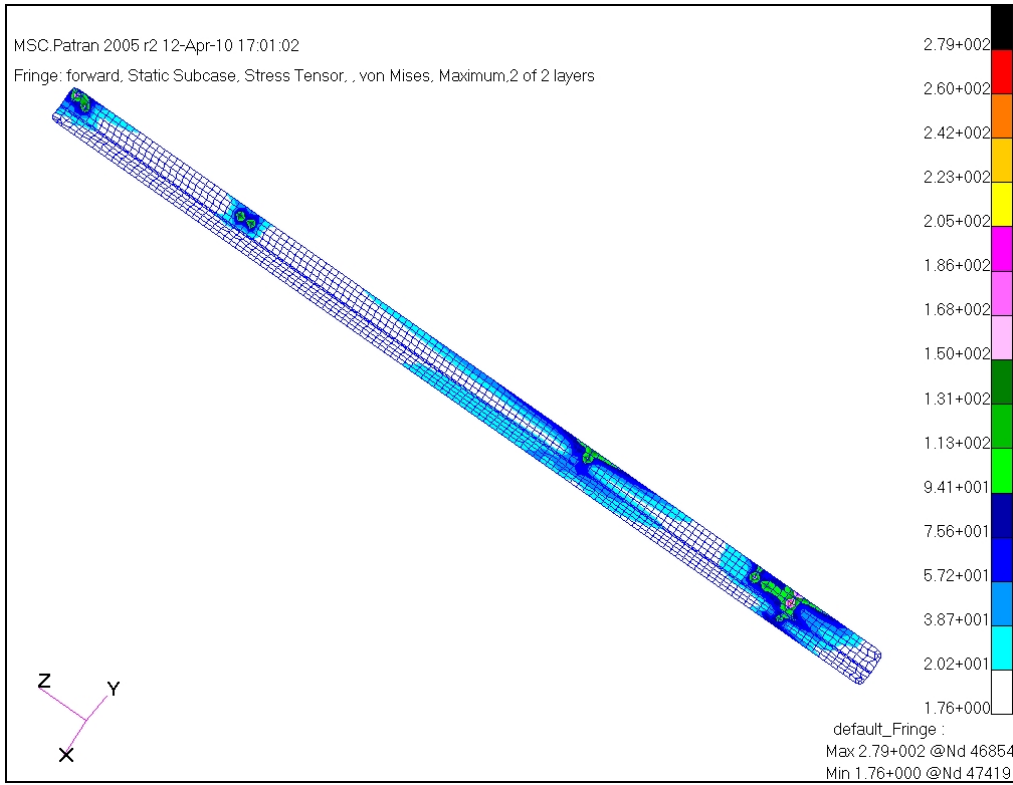
Raf yapısında kullanılan parçalardan bazıları örnek teşkil etmesi açısından bu çalışmada incelenmiştir. Bunlardan ilki ekipmanları taşıyan ekipman desteklerinden biri olup, bu parça için en küçük güvenlik faktörünü veren yük durumu olan sağa ivme altındaki von Mises gerilimi dağılımı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5 Sağa 7g'lik İvme Altında, Ekipman Desteği Üzerindeki, von Mises Gerilimi Dağılımı [MPa]

Şekil 5'te görülen ekipman desteği için geçerli olan malzemeye bağlı nihai gerilim dayanımı 489 [MPa], iken aynı malzemenin limit yükler altındaki dayanımı 420 [MPa]'dır. Analizlerde kullanılan yöntemin lineer statik olduğu bilgisi kullanılarak, bu materyal üzerinde limit yükler altında oluşacak en yüksek gerilim değeri nihai yükler altındaki en yüksek gerilim değerinin kullanılan 1.5 katsayısına bölünmesiyle bulunabilir. Bu durumda nihai yükler için malzeme üzerindeki en büyük von Mises gerilimi değeri 313 [MPa] iken limit yükler için bu değer 208.67 [MPa] olmaktadır. Buna göre nihai ve limit yükler altındaki en küçük güvenlik faktörü değerleri sırası ile 0.358 ve 0.750 olmaktadır.

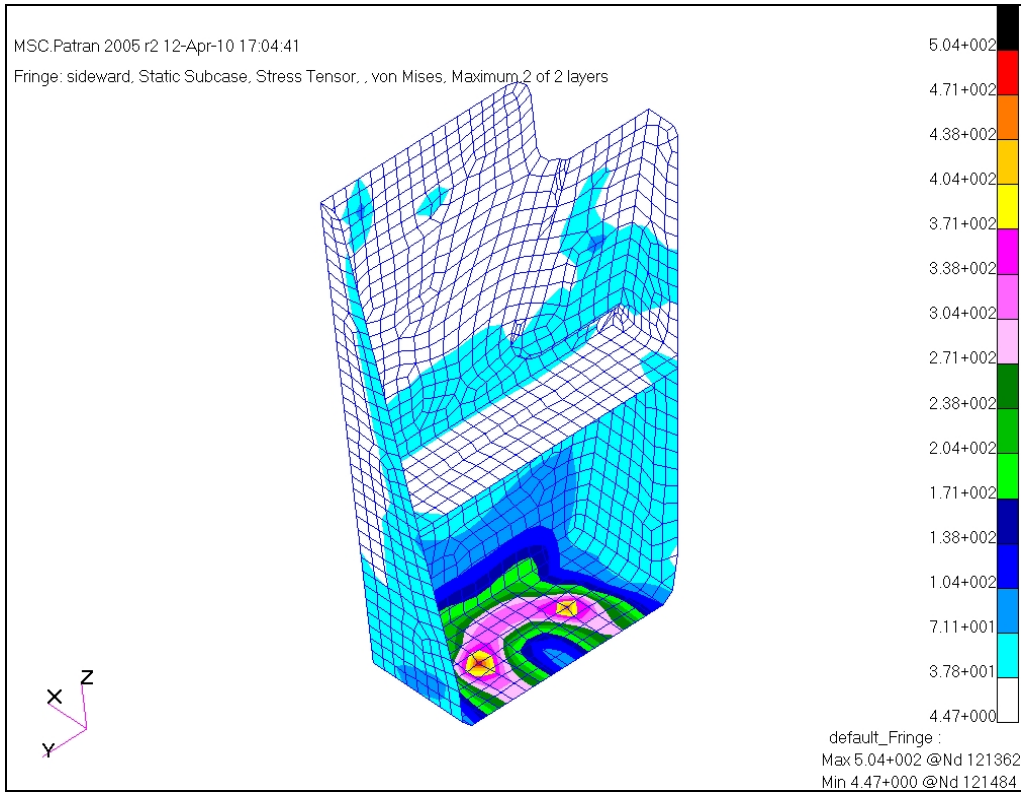
Ekipman desteklerinin bağlandığı ve bu desteklerle bağlantı elemanları arasında bulunan yatay ve dikey profillerinden bir tanesi üzerindeki ve en düşük güvenlik faktörünü veren ivme durumundaki gerilim dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Bu gerilim dağılımını veren yük koşulu ileri uygulanan 7g'lik ivmedir.



Şekil 6 İleri 7g'lik İvme Altında, Dikey Parça Üzerindeki, von Mises Gerilimi Dağılımı [MPa]

Şekil 6'da verilen parçanın nihai yükler altındaki malzemeye bağlı gerilim dayanımı 462 [MPa] iken limit yükler altındaki gerilim dayanımı 386 [MPa]'dır. Bu durumda nihai ve limit yükler altındaki en yüksek von Mises gerilimi değerleri olan 279 [MPa] ve 186 [MPa] değerleri sırası ile 0.440 ve 0.804 değerinde güvenlik faktörleri vermektedir.

Ekipman rafının dikey ve yapay profillerini uçağın birincil yapılarına bağlayan bağlantı elemanlarından birisi için sağa ivme altındaki gerilim dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. Bu yük koşulu şekilde verilen parça için en düşük güvenlik faktörü değerini veren yük koşuludur.



Şekil 7 Sağa 7g'lik İvme Altında, Bağlantı Elemanı Üzerindeki, von Mises Gerilimi Dağılımı [MPa]

Şekil 7'de verilen parça için nihai yükler altındaki malzemeye bağlı gerilim dayanımı 1068 [MPa] limit yükler altındaki gerilim dağılımı 999 [MPa]'dır. Elde edilen en yüksek von Mises gerilimi değeri nihai yükler için 504 [MPa] limit yükler için ise 336 [MPa]'dır. Bu değerler nihai ve limit yükler için güvenlik faktörü değerlerini sırasıyla 0.842 ve 1.585 olarak vermektedir.

Ekipman rafının bu çalışmada örnek olarak verilenler haricindeki parçaları da gerekli güvenlik faktörü değerlerini sağladığı için tasarımın güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bağlayıcı seçimi sürecinde genel yaklaşım her bağlayıcının tek tek kontrol edilmesidir. Fakat bu işlemin yapılması çok uzun zaman aldığı ve fazla emek gerektirdiği için hesaplamalar genellikle en yüksek yük alan bağlayıcılar için yapılmaktadır. Bu çalışmada bağlayıcı seçimi safhasını hızlandırmak, bağlayıcı analizlerinin her bağlayıcı için yapılmasını sağlamak ve hata olasılığını azaltmak amacıyla iki adet program yazılmıştır.

BAĞLAYICI ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN PROGRAMLAR

MSC.Patran® ve MSC.Nastran® kullanılarak yapılan yapısal analizlerde kullanılan genel yaklaşım bağlayıcıların RBE2 tipi elemanlarla modellenmesidir. Analiz sonuçlarında bu elemanların boyu doğrultusunda olan çekme yükleri ve bu doğrultuya dik gelen kesme yükleri belirlenir. Daha sonra bu yükler kullanılarak bağlayıcının çekme kuvvetiyle kopması, bağlayıcının kesme kuvvetiyle kırılması, bağlayıcının çekme ve kesme yüklerinin bileşkesiyle kırılması, bağlanan profilin ezilmesi ve bağlayıcının profili yırtıp çıkması analizleri yapılır [2]. Bu çalışmada oluşturulmuş olan iki program bu analizleri otomatik olarak yapmaktadır. İlk program FORTRAN tabanlı bir uygulama dosyası olup; MSC.Patran® programı tarafından otomatik olarak oluşturulan analiz dosyasını, kullanıcı tarafından yine aynı program kullanılarak alınabilecek olan kuvvet raporunu ve yine kullanıcı tarafından girilecek olan yük koşulu sayısı ve bağlantı katsayıları (fitting factor) bilgilerini kullanarak bağlayıcılar üzerine gelen en büyük çekme ve kesme kuvvetlerini hesaplar. Bu kuvvetler

çıktılara çeşitli şekillerde yazdırılabilmektedir. Örnek olarak sadece en büyük bağlayıcı yüklerini veren çıktı Şekil 8'de verilmiştir [1].

File	Edit	Format	View	Help	
102		141.61	1	440.12	1
103		82.17	2	3241.09	1
104		38.12	2	1667.88	1
105		270.93	2	694.65	1
106		202.38	1	778.57	1
107		122.66	2	3623.11	1
108		119.24	2	2022.39	2
109		287.94	2	818.42	2
110		133.82	2	466.78	2
111		428.33	2	279.36	1
112		94.46	2	606.52	2
113		91.12	3	966.54	2
114		31.45	3	1560.69	2
115		147.26	1	3412.14	2
116		80.00	3	2679.81	2
117		109.98	2	447.23	2
118		429.77	2	896.26	1
119		203.20	2	1233.36	2
120		347.63	2	3228.32	1
121		242.79	3	3816.69	2
122		265.00	3	2286.29	3
123		15.23	1	3189.35	2
124		157.66	1	3578.55	2
125		145.01	2	278.83	2
126		281.04	2	654.65	3
127		76.12	1	1088.69	3
128		58.01	1	1798.95	3
129		41.68	2	505.18	1
130		369.24	2	815.69	1
131		58.88	2	496.83	1

Şekil 8 Geliştirilen FORTRAN Tabanlı Programın Sadece En Yüksek Kuvvetleri Gösteren Çıktı Örneği

Şekil 8'de verilen çıktıdaki kolonlar sırasıyla bağlayıcı numarası, bu bağlayıcıdaki maksimum çekme kuvveti, bu kuvveti veren yük koşulu numarası, bağlayıcıdaki maksimum kesme kuvveti ve bu kuvveti veren yük koşulu numarasını göstermektedir. Eğer kullanıcı programdan MS Excel tabanlı arayüze girdi olarak kullanılacak bir çıktı isterse, sonuç Şekil 9'da gösterildiği gibi olmaktadır [1].

File	Edit	Format	View	Help						
102	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	141.61	1	440.12	1	1.150	1.150
103	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	82.17	2	3241.09	1	1.150	1.150
104	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	38.12	2	1667.88	1	1.150	1.150
105	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	270.93	2	694.65	1	1.150	1.150
106	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	202.38	1	778.57	1	1.150	1.150
107	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	122.66	2	3623.11	1	1.150	1.150
108	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	119.24	2	2022.39	2	1.150	1.150
109	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	287.94	2	818.42	2	1.150	1.150
110	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	133.82	2	466.78	2	1.150	1.150
111	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	428.33	2	279.36	1	1.150	1.150
112	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	94.46	2	606.52	2	1.150	1.150
113	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	91.12	3	966.54	2	1.150	1.150
114	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	31.45	3	1560.69	2	1.150	1.150
115	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	147.26	1	3412.14	2	1.150	1.150
116	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	80.00	3	2679.81	2	1.150	1.150
117	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	109.98	2	447.23	2	1.150	1.150
118	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	429.77	2	896.26	1	1.150	1.150
119	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	203.20	2	1233.36	2	1.150	1.150
120	A1_7075_T7351	2.50000	A1_7075_T7351	2.00000	347.63	2	3228.32	1	1.150	1.150
121	A1_7075_T7351	2.50000	A1_7075_T7351	2.00000	242.79	3	3816.69	2	1.150	1.150
122	A1_2024_T3511	2.00000	A1_7075_T7351	2.00000	265.00	3	2286.29	3	1.150	1.150
123	A1_7075_T7351	2.50000	A1_7075_T7351	2.00000	15.23	1	3189.35	2	1.150	1.150
124	A1_7075_T7351	2.50000	A1_7075_T7351	2.00000	157.66	1	3578.55	2	1.150	1.150
125	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	145.01	2	278.83	2	1.150	1.150
126	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	281.04	2	654.65	3	1.150	1.150
127	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	76.12	1	1088.69	3	1.150	1.150
128	A1_7075_T7351	2.50000	A1_2024_T3511	2.00000	58.01	1	1798.95	3	1.150	1.150
129	A1_7075_T7351	2.00000	A1_2024_T3511	2.00000	41.68	2	505.18	1	1.150	1.150
130	A1_7075_T7351	2.00000	A1_2024_T3511	2.00000	369.24	2	815.69	1	1.150	1.150
131	A1_7075_T7351	2.00000	A1_2024_T3511	2.00000	58.88	2	496.83	1	1.150	1.150

Şekil 9 Geliştirilen MS Excel Tabanlı Arayüz için Oluşturulan Çıktı Örneği

Bu çıktıdaki kolonlar sırası ile bağlayıcı numarası, bağlayıcının bağlandığı ilk profilin malzemesi ve kalınlığı, ikinci profilin malzemesi ve kalınlığı, maksimum çekme yükü ve buna denk gelen yük

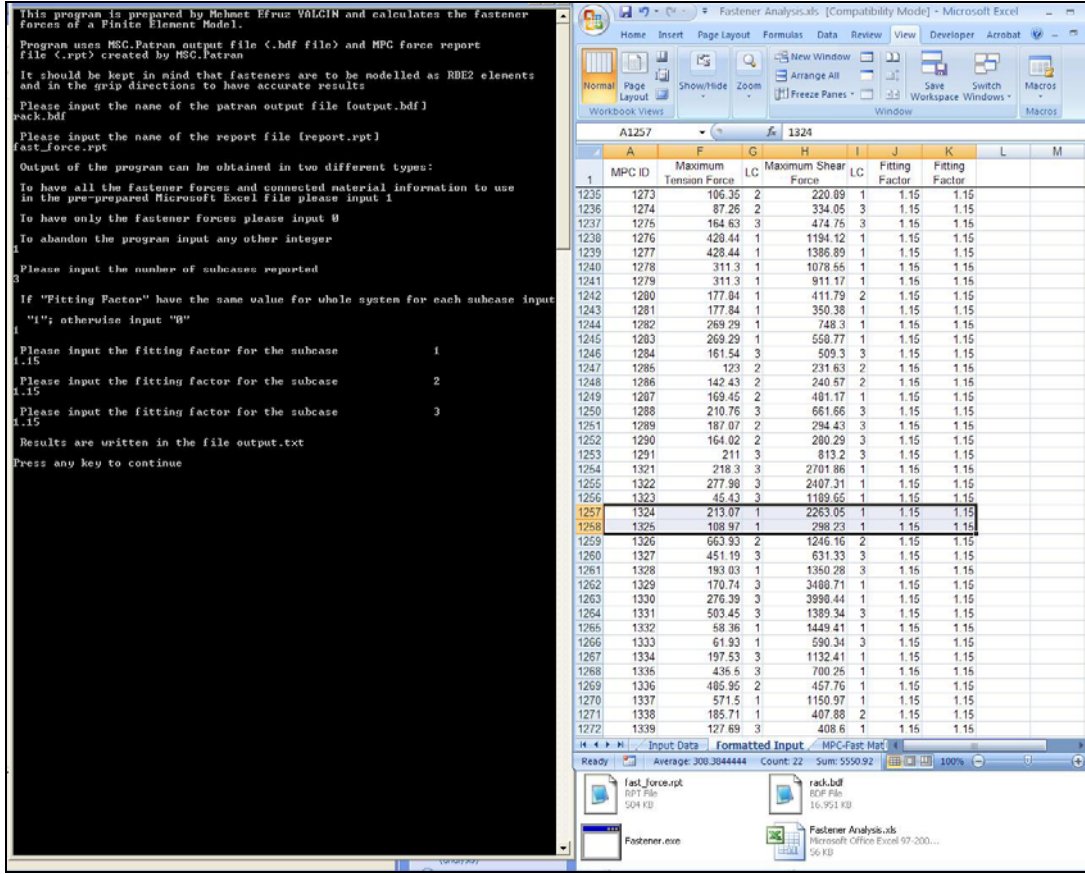
koşulu numarası, maksimum kesme yükü ve bu değeri veren yük koşulu numarası ve sıralanan iki yük koşulu için kullanılacak olan bağlantı katsayılarını belirtmektedir. Daha sonra MS Excel tabanlı arayüz programı bu çıktıyı ve kullanıcı tarafından girilecek bağlayıcı ve malzeme bilgilerini kullanarak bağlayıcı analizlerini yapar. Bu program kullanılarak elde edilen sonuçların bir örneği Şekil 10'da verilmiştir [1].

MPC ID	Fastener	Grip Length (Dash Number)	MS Tension	MS Shear	MS Combined	MS Bearing	MS Pull Through	MS Bearing Material #1	MS Pull Through Material #1	MS Bearing Material #2	MS Pull Through Material #2
941	MS20470E5		105.1949	6.496139	0.982115	11.60367806	183.7032115	11.60367806	183.7032115	11.6036781	183.7032115
942	MS20470E5		48.42647	5.531186	0.976148	9.981247932	84.96671627	9.981247932	84.96671627	9.98124793	84.96671627
943	MS20470E5		96.84385	5.733932	0.977843	10.32213725	169.1783465	10.32213725	169.1783465	10.3221373	169.1783465
944	MS20470E5		125.1194	4.695327	0.969108	8.575871892	218.3575665	8.575871892	218.3575665	8.57587189	218.3575665
945	MS20470E5		61.25571	4.995122	0.971919	9.079933261	107.2804249	9.079933261	107.2804249	9.07993326	107.2804249
946	MS20470E5		113.5119	3.238505	0.94426	6.126435928	198.1689055	6.126435928	198.1689055	6.12643593	198.1689055
947	MS20470E6		121.9734	8.029634	0.987669	12.58897129	216.4251885	12.58897129	216.4251885	12.5889713	216.4251885
947	MS20470E6		161.3925	8.029634	0.987697	12.58897129	286.1207337	12.58897129	286.1207337	12.5889713	286.1207337
948	MS20470E6		35.94897	9.058974	0.989384	14.13805656	64.32823864	14.13805656	64.32823864	14.1380566	64.32823864
949	MS20470E6		44.37287	3.781932	0.955783	6.196475033	79.22225531	6.196475033	79.22225531	6.19647503	79.22225531
950	MS20470E6		293.7773	3.667287	0.954082	6.023942613	520.185878	6.023942613	520.185878	6.02394261	520.185878
950	MS20470E6		298.348	3.667287	0.954083	6.023942613	528.2671616	6.023942613	528.2671616	6.02394261	528.2671616
951	MS20470E6		120.9659	15.71	0.996351	2.14739201	214.6439323	2.14739201	214.6439323	2.147392	214.6439323
952	MS20470E5		102.8928	3.718994	0.955002	6.934308405	179.6992077	6.934308405	179.6992077	6.93430841	179.6992077
953	MS20470E5		26.05949	0.863068	0.710535	2.13248122	46.06417047	2.13248122	46.06417047	2.13248122	46.06417047
954	MS20470E5		34.32582	2.021517	0.889664	4.08024517	60.44167709	4.08024517	60.44167709	4.08024517	60.44167709
955	MS20470E5		11.02924	1.44184	0.825377	3.105601704	19.92227045	3.105601704	19.92227045	3.1056017	19.92227045
956	MS20470E5		36.63772	1.883543	0.879027	3.848261708	64.46272926	3.848261708	64.46272926	3.84826171	64.46272926
957	MS20470E5		14.97019	1.258069	0.799958	2.796618369	26.77671869	2.796618369	26.77671869	2.79661837	26.77671869
958	MS20470E6		51.46753	4.636515	0.968161	7.482562612	91.76609886	7.482562612	91.76609886	7.48256261	91.76609886
959	MS20470E5		77.82942	12.62924	0.994456	21.91560228	136.1068311	21.91560228	136.1068311	21.9156023	136.1068311
960	MS20470E5		47.40388	3.025186	0.937853	5.767770087	83.18814457	5.767770087	83.18814457	5.76777009	83.18814457
960	MS20470E5		52.93851	3.025186	0.937936	5.767770087	92.81444901	5.767770087	92.81444901	5.76777009	92.81444901
961	MS20470E5		57.16154	7.659728	0.986369	13.56008579	100.1594958	13.56008579	100.1594958	13.5600858	100.1594958
961	MS20470E5		62.68036	7.659728	0.986418	13.56008579	109.7582988	13.56008579	109.7582988	13.5600858	109.7582988
962	MS20470E5		139.5472	6.851256	0.983727	12.20075505	243.4515705	12.20075505	243.4515705	12.2007551	243.4515705
962	MS20470E5		219.4404	6.851256	0.983757	12.20075505	382.4086255	12.20075505	382.4086255	12.2007551	382.4086255
963	MS20470E5		168.4807	5.864002	0.97874	10.54083083	293.7751974	10.54083083	293.7751974	10.5408308	293.7751974
964	MS20470E5		11.32631	1.507942	0.83443	3.216743746	20.4389735	3.216743746	20.4389735	3.21674375	20.4389735
964	MS20470E5		15.02557	1.507942	0.837118	3.216743746	26.87304021	3.216743746	26.87304021	3.21674375	26.87304021
965	NAS1143	8	2.85244	16.00099	0.929161	9.152690396	0.946714981	23.26274667	3.964123202	9.1526904	0.946714981
966	NAS1143	8	2.844173	10.53487	0.924815	5.888422436	0.942537437	15.46184824	3.953470465	5.88842244	0.942537437
967	MS20470E5		15.1184	5.077807	0.96908	9.218957299	27.03448719	35.63166548	106.2319135	9.2189573	27.03448719
968	MS20470E5		6.241894	2.637481	0.905354	5.115900633	11.59571832	20.9235309	47.17862258	5.11590063	11.59571832
968	NAS1143	8	2.899262	11.34072	0.927663	6.369660262	0.970375105	25.41785473	6.536684775	6.36966026	0.970375105
969	NAS1143	8	4.244294	17.3553	0.960672	9.961463338	1.650046921	38.29331011	9.136429472	9.96146334	1.650046921
969	MS20470E5		206.2034	4.410306	0.965814	8.096650073	359.3856896	31.60855611	1377.475263	8.09665007	359.3856896
970	MS20470E5		6.237862	0.214674	0.303144	1.042299131	11.58870473	5.100819648	39.12649633	1.04229913	11.58870473
971	MS20470E5		6.399485	0.941042	0.716318	2.26358284	11.86981348	8.749076429	40.02253046	2.26358284	11.86981348
972	MS20470E5		20.11594	1.97345	0.884653	3.999427989	35.72664216	13.93444718	116.0661719	3.99942799	35.72664216

Şekil 10 Geliştirilen MS Excel Tabanlı Arayüz Tarafından Yapılan Bağlayıcı Analiz Sonuçları

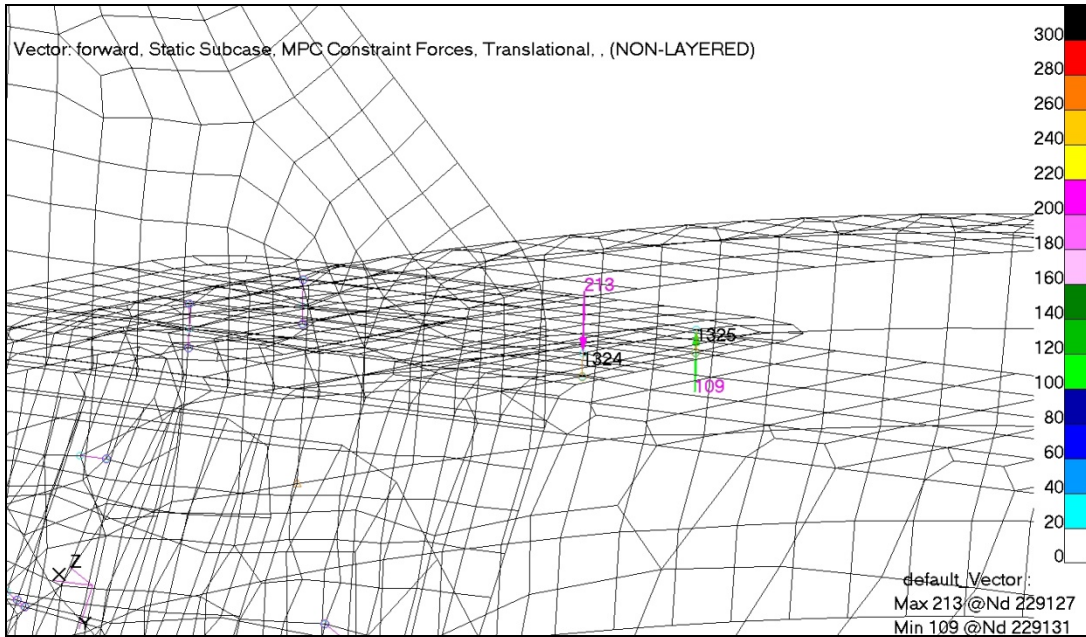
Şekil 10'daki kolonlar sırasıyla sonlu eleman modelindeki RBE2 eleman numarasını, bu elemanın temsil ettiği bağlayıcıyı, bağlayıcı boyunu, sırasıyla çekme, kesme, bileşke kuvvetleri için hesaplanan güvenlik faktörlerini, bağlantı bölgesindeki minimum ezilme ve çıkma güvenlik faktörlerini ve bağlayıcının bağlandığı her iki profil için ayrı ayrı ezilme ve çıkma güvenlik faktörlerini göstermektedir. Bağlayıcı boyu sadece vida tipi bağlayıcıların (bolt, hi-lok) analizleri için gerekli olduğundan perçin tipi (rivet) bağlayıcılar için bu bilgi bulunmamaktadır.

Geliştirilen programların doğrulanması için çalışmada kullanılan ekipman rafı modelinden iki adet bağlayıcıya ait sonuçlar MSC.Patran® programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Seçilmiş olan 1324 ve 1325 numaralı RBE2 elemanları için geliştirilen FORTRAN tabanlı programın verdiği en yüksek çekme ve kesme kuvvetleri Şekil 11'de gösterilmiştir [1].

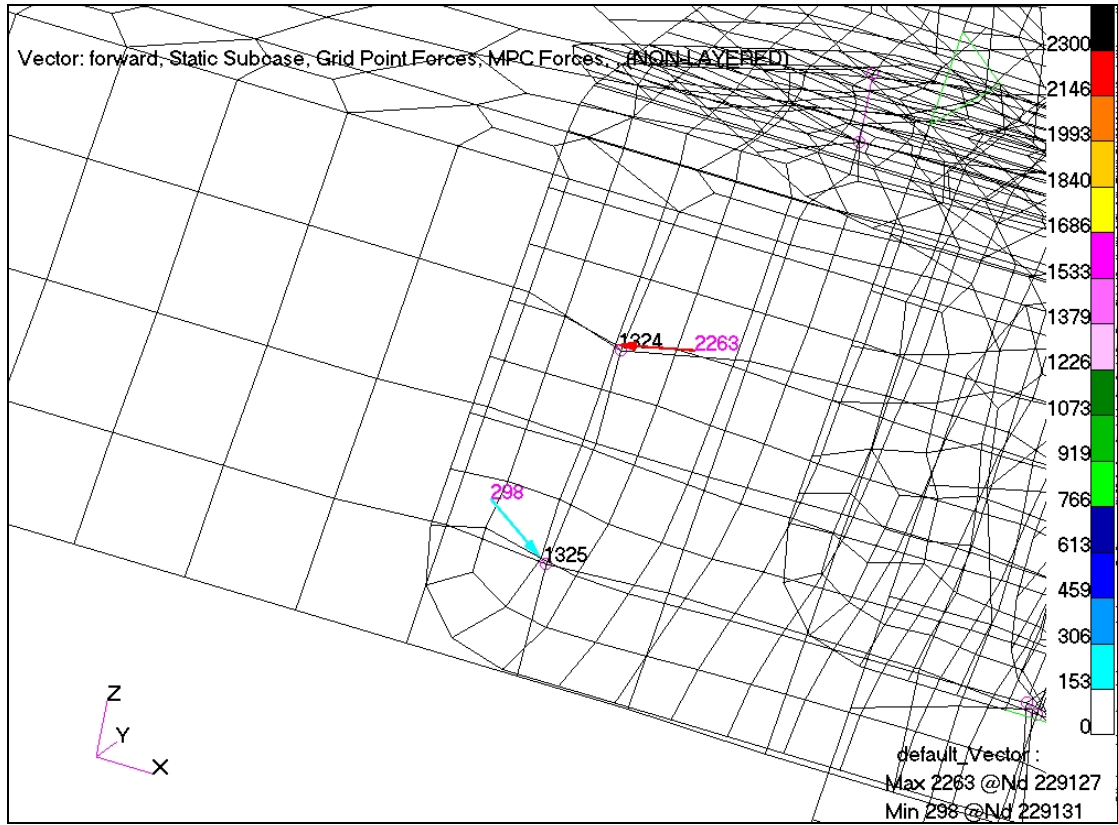


Şekil 11 Bağlayıcı Kuvvetleri (Geliştirilen FORTRAN Tabanlı Uygulama) [N]

En yüksek kuvvetler forward olarak adlandırılan ve uçak doğrultusunda ve uçuş yönünde olan ivme durumunda elde edilmiştir. MSC.Patran® kullanılarak bu elemanlar üzerinde elde edilen çekme ve kesme kuvvetleri sırası ile Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilmiştir [1].



Şekil 12 Bağlayıcı Çekme Kuvvetleri (MSC.Patran®) [N]



Şekil 13 Bağlayıcı Kesme Kuvvetleri (MSC.Patran®) [N]

Şekil 12 ve Şekil 13'te siyah numaralar eleman numaralarını, oklarsa bu noktalarındaki kuvvetlerin yönlerini göstermektedir. Okların üstündeki sayılar da bu kuvvetlerin [N] cinsinden büyüklüğünü ifade etmektedir. Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi FORTRAN tabanlı uygulamanın sonuçları ile MSC.Patran® programından alınan sonuçlar hemen hemen aynıdır.

Geliştirilen MS Excel programının doğruluğunu sınamak için de 1324 numaralı eleman için el ile yapılan hesaplamaların sonuçları programın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan bilgiler aşağıda verildiği gibidir:

- Bağlayıcı:
Tip: NAS1143-8 (Vida)
Çekme Kuvveti Dayanımı: 14145 N, Kesme Kuvveti Dayanımı: 12010 N
Çap: 4.82 mm, Baş Çapı: 9.48 mm
Ön Gerilme Kuvveti: 2662 N
- 1. Profil:
Malzeme: 17-4 PH Paslanmaz Çelik
Kalınlık: 3 mm
Malzemenin Kesme Gerilimi Dayanımı: 655 MPa
Malzemenin Ezilme Gerilimi Dayanımı: 1723 MPa
- 2. Profil:
Malzeme: Alüminyum 2024 T3511
Kalınlık: 2 mm
Malzemenin Kesme Gerilimi Dayanımı: 200 MPa
Malzemenin Ezilme Gerilimi Dayanımı: 744 MPa

- Uygulanan Maksimum Çekme Kuvveti: 213 N
Uygulanan Maksimum Kesme Kuvveti: 2263 N

Bu bağlayıcı için el hesaplamaları ile belirlenen güvenlik faktörü değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1 1324 Numaralı Bağlayıcı için Güvenlik Faktörleri (GF Değerleri)

Bağlayıcı Numarası	Çekme GF	Kesme GF	Bileşke GF	Ezilme GF	Çıkma GF
1324	3.502	3.615	0.690	1.756	1.274

Bu bölge için (1324 numaralı RBE2 elemanı ve bağladığı profiller) geliştirilen MS Excel tabanlı arayüzün verdiği güvenlik faktörü sonuçları Şekil 14'te verilmiştir.

1	MPC ID	Fastener	Grip Length (Dash Number)	MS Tension	MS Shear	MS Combined	MS Bearing	MS Pull Through	MS Bearing Material #1	MS Pull Through Material #1	MS Bearing Material #2	MS Pull Through Material #2
1243	1281	NAS1801-08	8	6.3000	21.0779	0.8557	14.3993	2.6945	14.3993	2.6945	19.5876	4.4240
1244	1282	NAS1801-08	8	6.1072	9.3376	0.8293	6.2105	2.5970	6.2105	2.5970	8.6398	4.2808
1245	1283	NAS1801-08	8	6.1072	12.8441	0.8418	8.6562	2.5970	8.6562	2.5970	11.9096	4.2808
1246	1284	NAS1801-08	8	6.3355	14.1888	0.8486	7.8522	2.4065	9.5942	2.7125	7.8522	2.4065
1247	1285	NAS1801-08	8	6.4207	32.3966	0.8620	18.4639	2.4460	22.2941	2.7556	18.4639	2.4460
1248	1286	NAS1801-08	8	6.3775	31.1555	0.8609	17.7406	2.4260	21.4285	2.7337	17.7406	2.4260
1249	1287	NAS1801-08	8	6.3182	15.0768	0.8499	8.3697	2.3985	10.2135	2.7037	8.3697	2.3985
1250	1288	NAS1801-08	8	6.2294	10.6913	0.8374	5.8138	2.3572	7.1547	2.6588	5.8138	2.3572
1251	1289	NAS1801-08	8	6.2801	25.2733	0.8575	14.3124	2.3807	17.3256	2.6844	14.3124	2.3807
1252	1290	NAS1801-08	8	6.3300	26.5987	0.8588	15.0849	2.4039	18.2501	2.7097	15.0849	2.4039
1253	1291	NAS1801-08	8	6.2289	8.5126	0.8263	4.5441	2.3570	5.6350	2.6585	4.5441	2.3570
1254	1321	NAS1143	8	3.4988	2.8653	0.6589	1.3083	1.2734	2.4477	2.6232	1.3083	1.2734
1255	1322	NAS1143	8	3.4667	3.3382	0.6787	1.5907	1.2571	2.8695	2.5972	1.5907	1.2571
1256	1323	NAS1143	8	3.5947	7.7786	0.7543	2.3289	0.4743	4.2424	1.3218	2.3289	0.4743
1257	1324	NAS1143	8	3.5017	3.6148	0.6897	1.7559	1.2748	8.5733	10.1749	1.7559	1.2748
1258	1325	NAS1143	8	3.5590	34.0182	0.7788	19.9123	1.3038	71.6448	10.3172	19.9123	1.3038
1259	1326	NAS1143	8	3.2692	7.3805	0.7371	4.0047	1.1573	4.0047	1.1573	4.9801	1.7506
1260	1327	NAS1143	8	3.3758	15.5420	0.7636	8.8786	1.2112	8.8786	1.2112	8.8786	1.2112
1261	1328	NAS1143	8	3.5126	6.7343	0.7434	3.6188	1.2803	3.6188	1.2803	3.6188	1.2803
1262	1329	NAS1143	8	3.5248	1.9935	0.5995	0.7877	1.2865	1.6701	2.6441	0.7877	1.2865
1263	1330	NAS1143	8	3.4675	1.6119	0.5565	0.5598	1.2575	1.3297	2.5979	0.5598	1.2575
1264	1331	NAS1143	8	3.3492	6.5169	0.7344	3.4889	1.1977	3.4889	1.1977	3.4889	1.1977
1265	1332	NAS1143	8	3.5874	6.2053	0.7416	3.3029	1.3181	13.9474	10.3877	3.3029	1.3181
1266	1333	NAS1143	8	3.5854	16.6906	0.7747	9.5645	1.3171	35.6989	10.3827	9.5645	1.3171
1267	1334	NAS1143	8	3.5101	8.2223	0.7532	4.5074	1.2791	4.5074	1.2791	4.5074	1.2791
1268	1335	MS20470E5		5.8727	3.3959	0.7300	6.3911	10.9535	10.0395	18.0509	6.3911	10.9535
1269	1336	MS20470E5		5.1592	5.7246	0.7798	10.3065	9.7125	15.8875	16.0731	10.3065	9.7125
1270	1337	MS20470E5		4.2372	1.6745	0.5802	3.4968	8.1089	5.7165	13.5174	3.4968	8.1089
1271	1338	MS20470E5		15.1168	6.5470	0.8537	11.6892	27.0316	17.9527	43.6754	11.6892	27.0316
1272	1339	MS20470E5		22.4399	6.5337	0.8606	11.6668	39.7687	11.6668	39.7687	11.6668	39.7687
1273	1340	MS20470E5		63.7425	15.5347	0.9376	26.8007	111.6056	26.8007	111.6056	26.8007	111.6056
1274	1341	MS20470E5		143.7313	73.4620	0.9849	124.1972	250.7290	124.1972	250.7290	124.1972	250.7290
1275	1342	MS20470E5		90.7549	29.0465	0.9650	49.5188	158.5878	49.5188	158.5878	49.5188	158.5878
1276	1343	MS20470E5		598.8083	151.7673	0.9932	255.8562	1042.2376	255.8562	1042.2376	255.8562	1042.2376
1277	1344	MS20470E5		153.5195	70.5043	0.9846	119.2242	267.7535	119.2242	267.7535	119.2242	267.7535

Şekil 14 Bağlayıcı Analizi Sonuçları (Geliştirilen MS Excel Tabanlı Arayüz Uygulaması)

Şekil 14'te verilen MS Excel tabanlı arayüz sonuçları Tablo 1'de gösterilen el hesabı sonuçları ile karşılaştırılınca sonuçların neredeyse birbiriyle aynı olduğu görülebilir. Bu sonuçlar oluşturulan iki programın da doğrulandığını göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada orta büyüklükte bir nakliye uçağında kullanılacak ve 29 adet ekipmana yer ve destek sağlayacak olan bir ekipman rafı tasarlanmıştır. Tasarlanan ekipman rafı, üzerindeki ekipman, kablo ve kapak kütleleriyle birlikte yaklaşık olarak 505 kg gelmektedir. Ekipman rafındaki profiller bu kütleyi uçağın 3 ana ekseninde uygulanabilecek olan 7g'lik ivme değerlerinde de taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Ekipman rafının tasarım sürecinde bağlayıcı analizlerinin otomatik olarak yapılmasını sağlayacak iki adet program geliştirilmiştir. Bu programlardan ilki FORTRAN tabanlı olup bağlayıcı modellemesinde en sık kullanılan eleman olan RBE2 tipi elemanları inceleyerek bu elemanlar üzerindeki kuvvetleri çekme ve kesme yönlerine ayırmaktadır. İkinci program olan MS Excel tabanlı arayüz programının görevi ise ilk programdan gelen bilgiler ve malzeme bilgilerini kullanarak, genelde el ile yapılan, bağlayıcı analizlerini yapmaktır. Çalışmada iki program da doğrulanmış ve bu tür programların ekipman rafı gibi büyük ve çok bağlayıcılı tasarımlarda büyük zaman kazancı sağlayabileceği gösterilmiştir [1].

Kaynaklar

- [1] Yalçın, M. E., *Design and Analysis of an Equipment Rack Structure for a Medium Transport Aircraft (Yüksek Lisans Tezi)*, ODTÜ, 11 Eylül 2009
- [2] Niu, M. C. Y., *Airframe Stress Analysis and Sizing*, Hong Kong Conmilit Press Ltd., 1999
- [3] Joint Service Specification Guide, *Aircraft Structures*, Department of Defense, 1998