

Germe Sistemlerin Yapısal Tasarım İlkeleri

Yrd. Doç. Dr. Fevzi Dansık, Yrd. Doç. Dr. Meltem Şahin

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Fındıklı, İstanbul,
Türkiye

(212) 252 16 00

fevzi.dansik@msgsu.edu.tr, meltem.sahin@msgsu.edu.tr

Öz

Çadır barınakları tarihi çok eskilere dayanan bir taşıyıcı sistem grubu olmasına rağmen günümüzde stadyumlar, spor salonları, pazar yerleri, çatılar, güneşlikler ve bunun gibi iddialı ve büyük açıklıklarda kullanılmaya başlanması teknolojiye ilerleme ile olmuştur ve artık germe sistemler olarak yapı sektöründe yüksek teknolojik sistem olarak anılmaktadır. Sadece çekme yüküne göre tasarlanan germe yapı sisteminin çalışma prensipleri basınç ve eğilmeye çalışan geleneksel yapı sistemlerinden farklıdır. Bu sistemlerin tasarımı sistemlerin çalışma prensiplerinin anlaşılması ile daha da yaygınlaşacaktır.

Bu çalışmada öncelikle germe sistemlerin genel olarak tanıtılması, bu konuda, hakkında bilgisi olmayan ya da az bilgi sahibi olan mimar, mühendislerin ve konuya ilgi duyan kimselerin genel olarak bilgilendirilmesi amaçlanmıştır. Sistemlerin kısa bir tarihi verildikten sonra, germe sistemler ile oluşturulabilecek genel formlar ve form grupları tanıtılmış, fiziksel modelleme yöntemlerinden genel olarak bahsedilmiş, form bulma işlemlerinin yapılaş şekli, analiz için kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

Germe sistemlerin önemli ögesi membran malzemesinin performans özellikleri ana hatları ile belirtilmiştir. Ayrıca, önemli bir diğer malzeme olan halatların tipleri ve özellikleri anlatılırken halat uçlarında uygulanabilecek en yaygın gerdirme aparatları tanıtılmıştır.

İlave olarak, bu sistemlerin detay çizim prensipleri, çizilmiş ve uygulanmış örnekler ile anlatılmıştır.

Son olarak, Türkiye ve dünyada uygulanmış seçilmiş projelerin çizimler, şekiller ve resimler eşliğinde tanıtımı yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Asma germe sistem, membran sistem, kablolu (halatlı) sistem, ETFE sistem, hava şişmeli sistemler

Giriş

Germe yapılar, geleneksel yapı sistemleri olan betonarme, kargir, çelik ve ahşap gibi taşıyıcılıkları eğilme rijitlikleri ve ağırlıkları ile sağlanan yapılardan farklı olarak, ağırlığı ihmal edilebilecek kadar az olan, esnek, sadece çekme dayanımı alan membran

örtülerin ve/veya halatların tamamen ya da kısmen kullanılması ile oluşturulan yapı sistemleridir. Bu nedenle germe sistemlerin yapısal tasarımı ve uygulanması diğer yapı sistemlerinden farklıdır.

İlk insanlar barınma ihtiyaçlarını mağaralarda giderirken, zamanla çevre şartlarının değişmesi, kötüleşmesi ve çevreyi araştırma isteği gibi nedenler göç etme gereğini doğurmuştur. Göçen insanlar barınma ihtiyaçlarını doğada hazır bulunan malzemeleri kullanarak, gerektiğinde taşınabilecek kadar hafif, rahat kurulabilecek ve rahat sökülecek biçimde düşünmüşlerdir. İklim şartlarına göre, soğuk iklimlerde sıcaklığı içeriye hapseden çadırlar tercih edilirken, sıcak iklimin hakim olduğu yerlerde güneşten koruyacak, hava akımını sağlayacak formlar kullanılmışlardır. Bu gereklilikler germe sistemlerin temellerini oluşturmuştur.

Bu bildiride germe yapıların yapısal tasarımından uygulamasına kadar olan süreç anlatılacaktır.

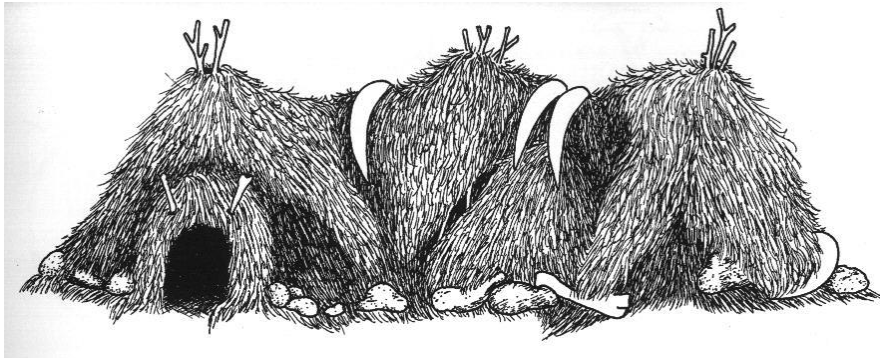
Ayrıca, germe yapılarda kullanılan malzeme çeşitleri, malzemelerin genel özellikleri anlatılacaktır.

Germe yapıların çalışma prensipleri, bilgisayar teknolojisinin bugünkü duruma gelmeden önce yapılan modelleme teknikleri, teknoloji ile birlikte gelişen analiz yöntemleri irdelenecektir.

Bildiri, özellikle mimar ve mühendislere yönelik olmak üzere konuya ilgi duyan herkesin anlayacağı şekilde çok fazla teknik terimlere yer verilmeden hazırlanmaya çalışılmıştır. Bildirinin daha iyi takip edilebilmesi ve germe yapılarda kullanılan terminolojinin anlaşılabilmesi için bazı terimlerin açıklaması yapılmıştır.

Tarihçe

Çadır, diğer bir deyişle tente insanoğlunun mağaradan sonra ilk barınma mekanıdır. Ukrayna civarında bulunan 40.000 yıldan eski mamut kemikleri ve hayvan derilerine ait bulgular bu düşüncüyü kanıtlamaktadır (Berger, 1996).



Şekil 1.

Tarih boyunca çadır, göçebe toplumlar tarafından değişik formlarda kullanılmıştır. İlk çadır destek elemanları olarak ağaç gövde ve dalları kullanılırken örtü elemanı olarak ta hayvan derilerinden yararlanılmıştır. Daha sonra örtü malzemesinin yerini keçe ya da

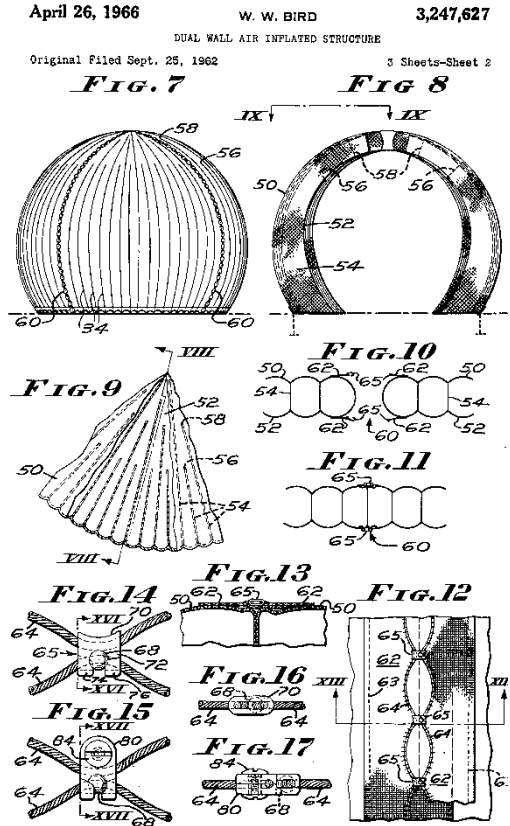
dokunmuş kumaş almıştır. Günümüzde destek malzemesi olarak ahşap yanı sıra çelik, alüminyum ve betonarme kullanılırken, örtü malzemesinin yerini de sentetik dokunmuş, üzerinde dış etkilere karşı koruma tabakası olan malzemeler almıştır. Böylece çadırlar günümüzdeki kalıcı “germe Sistemler” halini almıştır.

Aşağıda, dünyada ve Türkiye’ de uygulanmış birkaç sistem örnek olarak verilmiştir. Türkiye’ de germe yapıların ilk örnekleri yurt dışı teknik destekli olmasına rağmen son yıllarda yaygınlaşmış ve Türk mühendisler tarafından uygulanmaktadır.

Aşağıda verilen yapı, 1946 yılında Walter Bird tarafından tasarlanan hava şişirmeli sistemlere örnektir. Sistem Amerika’ da uygulanmıştır. Bu sistemlerin ilk patenti 1917 yılında William Lanchester tarafından alınmış olsa da ilk uygulaması Birdair firmasının kurucusu Walter Bird tarafından yapılmıştır. Örtü malzemesi olarak neopren kaplı cam lifleri kullanılmıştır. İlk örneğin plandaki çapı 15 metredir. Daha sonraki yıllarda farklı malzemeler kullanılarak 60 metre çapı aşan örnekleri de yapılmıştır (Shaeffer, 1996). Şekil 2 (Shaeffer, 1996) ve Şekil 3 (<https://patentimages.storage.googleapis.com>)’ te sistem ve detayları görülebilir.



Şekil 2.



Şekil 3.

Modern germe yapılar döneminin 1950’li yıllarda Frei Otto ile başladığı söylenebilir. Otto, başlangıçta açıklıkları 25 metreyi geçmeyen fuar kanopileri, giriş kanopileri, dans alanları tasarlamıştır. Otto’ yu tasarımlarında kısıtlayan, o dönemde örtü malzemesinin mukavemetinin daha fazla açıklık geçmeye yeterli olmaması idi. 1955 yılında Almanya’ da Fuar Alanı için tasarladığı sistem Otto’ nun ilk çalışması sayılabilir. Ancak, en önemli çalışması, Günther Behnisch ile tasarladığı, 1972 yılında Almanya’ nın Münih

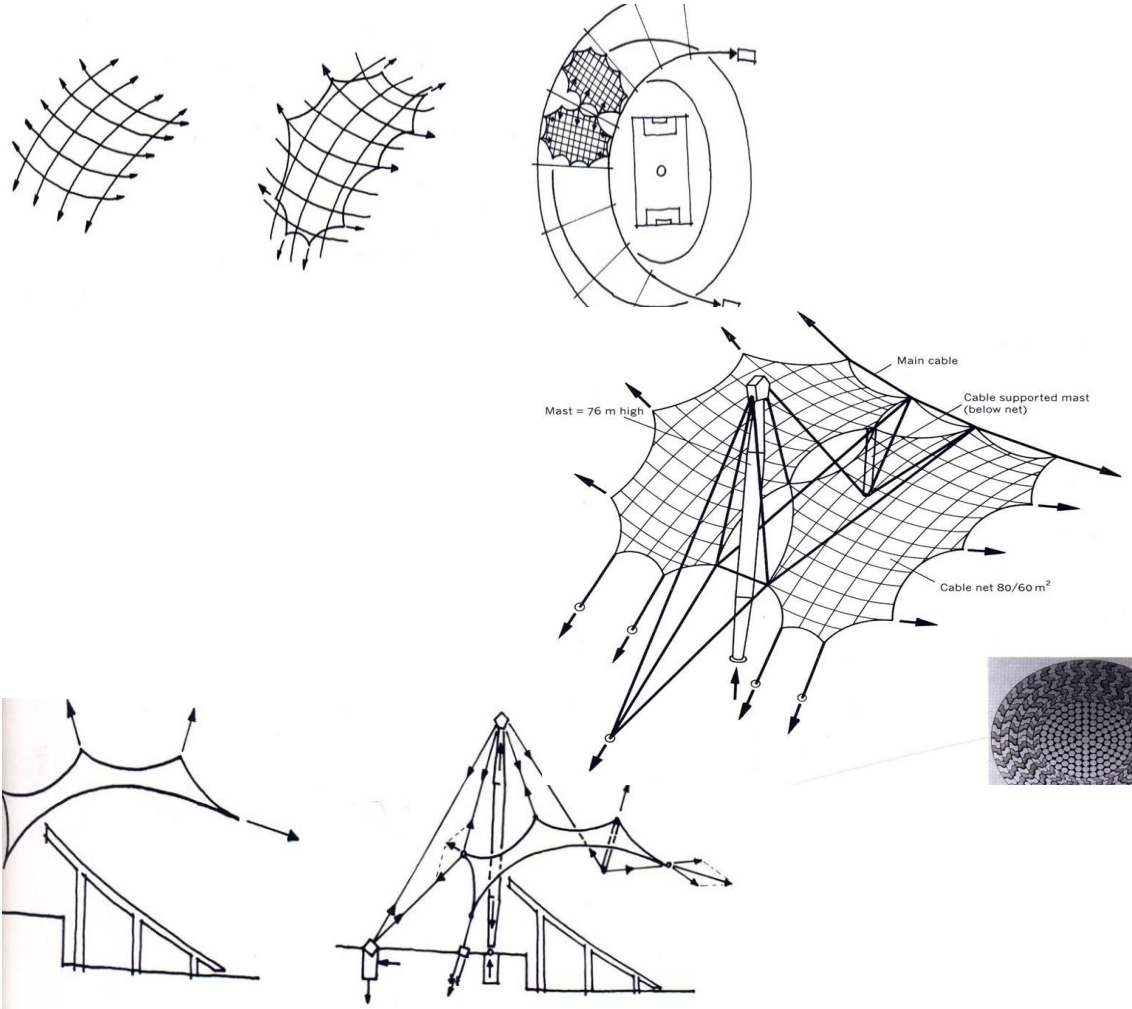
kentinde uygulanan Olimpik Stadyum olmuştur. Halat destekli ağ ile oluşturulan sistem günümüzde hala kullanılmaktadır. Sistemin mühendislik açısından önemi bir özelliği, ağ sisteminin form ve davranışının belirlenmesinde matematik hesapların bilgisayara adapte edildiği bu konuda bilinen ilk çalışma olmasıdır. Minimum yüzey alanına sahip pleksiglas kaplama malzemesi, birbirine bağlı halatların oluşturduğu ağların arasındaki boşluklara asılmıştır. Şekil 4 (patentimages.storage.googleapis.com) ve şekil 5 (Berger, 1996) ' te yaklaşık 74000 m² alanı kaplayan içine havuzları da içine alan örtü sistemlerinden sadece tribün örtüsüne ait resimler verilmiştir. Şekil 6, 7 ve 8 (Otto,1995) ' de halat ağlarının oluşturduğu form ve yük taşıma prensibini gösterir resimler bulunmaktadır.



Şekil 4.

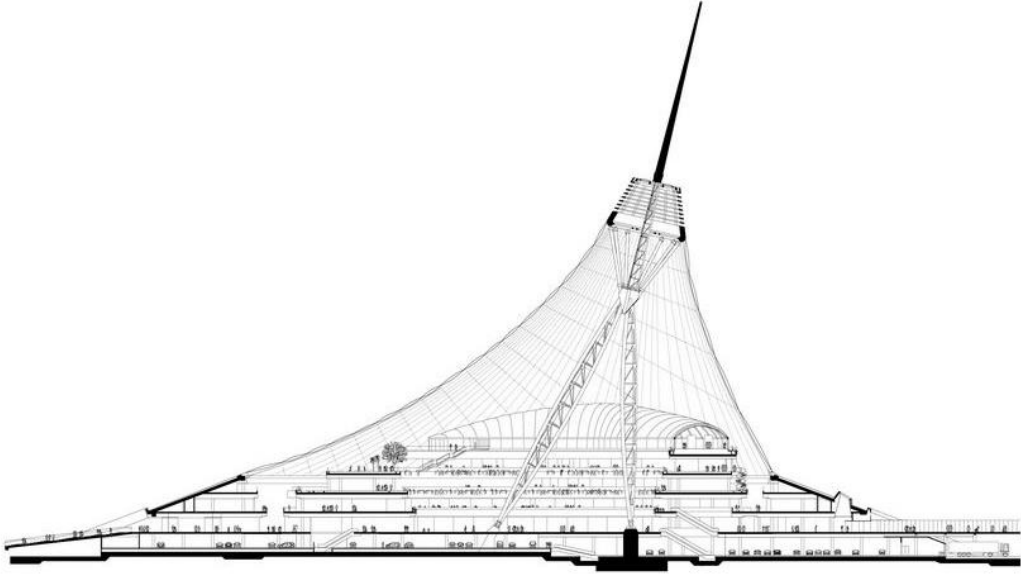


Şekil 5.



Şekil 6, 7 ve 8.

Günümüzde teknolojik ilerleme ile beraber malzeme ve sayısal hesap yöntemlerinin gelişmesi sayesinde germe sistemler artık anıtsal yapılarda da sıkça kullanılmaya başlamıştır. Aşağıda 2010 yılında Kazakistan’ da uygulanan Han Çadırı’ nın resmi görülmektedir. Norman Foster tarafından tasarlanan ve Türk firması tarafından inşa edilen yapı, içerisinde bulunan eğlence ve alışveriş alanları, restoranlar ve -40 derece iklimi bulunan bir bölgede oluşturulan tropikal plajı ile büyük bir sosyal merkez alanıdır. 200 metre çapında elips şeklinde plana oturan örtü sistemi, 150 metre yüksekliğe sahip eğik bir koni şekline sahiptir. Örtü malzemesi olarak doğal gün ışığından yararlanmak için şeffaf bir malzeme olan ETFE tercih edilmiştir. Şekil 9 (www.openbuildings.com)’ da sistem görülmektedir.



Şekil 9.

Türkiye’ de uygulanan yapılara örnek olarak seçilen Fenerbahçe Stadyumu, 2005 yılında yenilenerek yaklaşık 50000 kişi kapasiteli hale getirilmiş ve çatı örtüsü PVC membran örtü ile kapatılmıştır. Şekil 10 (cdn.fenerbahce.org)’ da stadyum görülebilir.



Şekil 10.

Türk mimar ve mühendisler tarafından tasarlanan ve 2013 yılında uygulanan Mersin Stadyumu yaklaşık 25000 seyirci kapasitesine sahiptir. Stadyumun üst örtüsü PVC kaplı polyester dokuma membrandır. Yaklaşık 40 metre konsol uzunluğu bulunmaktadır.



Şekil 11.



Şekil 12.

Germe Yapıların Mekanığı

Geleneksel yapılar olarak tanımlayabileceğimiz betonarme, çelik ve kargir yapıların yük taşıma prensipleri bakımından ağırlıkları ve eğilme rijitlikleri olmak üzere iki ana karakteristik özelliği bulunmaktadır. Geleneksel yapılar bu özellikleri yardımıyla ayakta dururlar ve yük taşırlar.

Taş duvar, rüzgarın neden olduğu devrilme etkisine sadece kendi ağırlığı ile karşı koyar. Kargir yapılarla mekan oluşturmak için sadece basınç kuvvetine dirençli taşıyıcı duvarların üzerine kemer, tonoz ve kubbe formları tasarlanarak, yapının kendi ağırlığı ile oluşturulan sadece “basınca çalışan” bir yapı sistemi kurulmuş olur.

Çelik yapılar ise kargir yapılara nazaran daha hafif olmalarına rağmen, eğilmeye karşı rijit olmaları sayesinde ayakta dururlar.

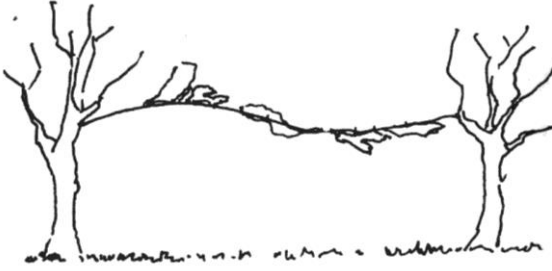
Sadece basınç yüküne karşı dirençli beton ise çelik donatılar ile birlikte kullanılarak eğilme rijitliği kazandırılır. Böylece hem basınç hem de çekme yükü alabilen betonarme taşıyıcı sistemler oluşturulur.

Germe yapılar, ağırlığı ihmal edilebilecek kadar az olan esnek tekstil örtüleri ve/veya halatlardan yapılmış olduğundan, germe yapılarda geleneksel yapıların ayakta durmasını sağlayan ağırlık ve eğilme rijitliği yoktur. Bu tip malzemeler ile nasıl bir taşıyıcı sistem oluşturulabileceği iki ağaç arasına asılmış bir çamaşır ipi üzerinde yapacağımız inceleme ile kolaylıkla görülebilir. Şekil 13’ de iki ağaç arasına asılmış çamaşırılar görülmektedir (Berger, 1996).

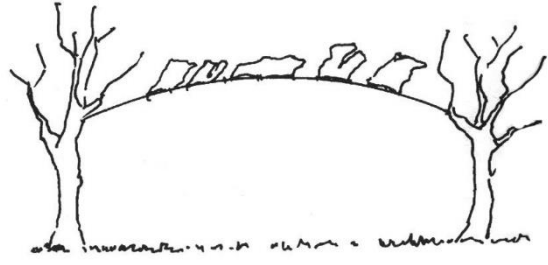


Şekil 13.

Yukarıdaki şekilde ip kendi ağırlığı ve üzerindeki çamaşırların ağırlığında ‘sehim’ yaparak geriliyor ve üzerindeki yükü taşıyor. Üzerindeki yük arttıkça ip gerilip uzayacak ve daha fazla sehim yapacaktır ve ip kopana kadar üzerindeki yükü taşıyacaktır. İpte her hangi bir çamaşır yok iken yine kendi ağırlığı altında ipin uzunluğuna göre sehim yapacaktır ve ipte gerilme olacaktır.



Şekil 14.

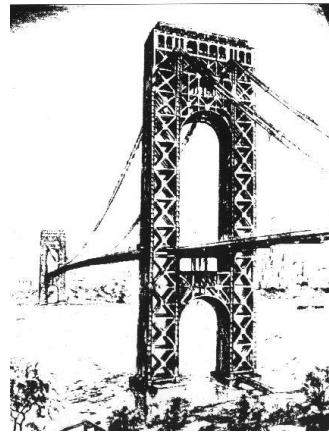


Şekil 15.

Şekil 14 (Berger, 1996)’ te görüldüğü gibi ipe rüzgar etkilediği durumda ise rüzgarın kaldırma etkisi ile ipteki gerilme boşalacak ve üzerindeki çamaşırlarla yukarı doğru hareket edecektir. İp ilk durumdaki sehim pozisyonun tam tersi durumunu aldığı anda gerilmeye başlayacaktır. Bu durumdaki ipin form artık ‘kemer’ şeklindedir. Şekil 15 (Berger, 1996)’ te bu durum görülmektedir. Artık rüzgarın kaldırma etkisi arttıkça ip gerilecek ve kopana kadar çamaşırları taşıyacaktır. Bu durumda bile ip temel olarak fonksiyonunu gerçekleştirmiş olacaktır. İpin stabilitesi rüzgarın kaldırma yüküne bağlı olduğundan, bu tip bir taşıyıcı eleman açık bir şekilde görüleceği üzere yapı sistemlerinde kullanılamaz.



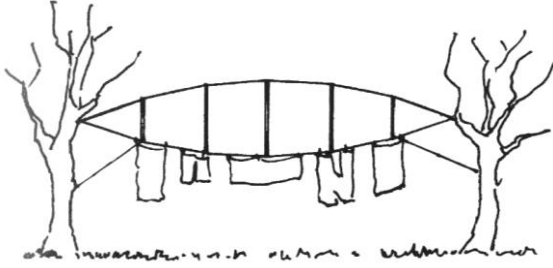
Şekil 16.



Şekil 17.

Şekil 16 (Berger, 1996)’ da görüldüğü gibi ipimize rüzgarın kaldırma etkisini yenmek için ağırlık asılırsa, ipimiz rüzgar olmadığı durumda daha fazla gerilecektir ve üzerindeki

Çamaşırları taşıyacaktır. Rüzgarın olduğu durumda ise ip yukarı doğru hareket etmek isteyecek ancak ağırlıklardan oluşan ilave gerilmeler engel olacaktır. Bu durumda ipte oluşan ilave gerilmeler azalacaktır, ancak ip kararlı dengede kalacaktır. Burada kararlı dengenin sağlanabilmesi için, rüzgarın kaldırma etkisinin çamaşırların ağırlığını aşmaması gerekir. Ayrıca, ip kendisine asılacak ilave ağırlıklardan oluşacak ilave gerilmeleri taşıyabilmelidir. Şekil 16 (Berger, 1996)'daki yaklaşımın en iyi uygulaması asma köprülerdir Şekil 17 (Berger, 1996).

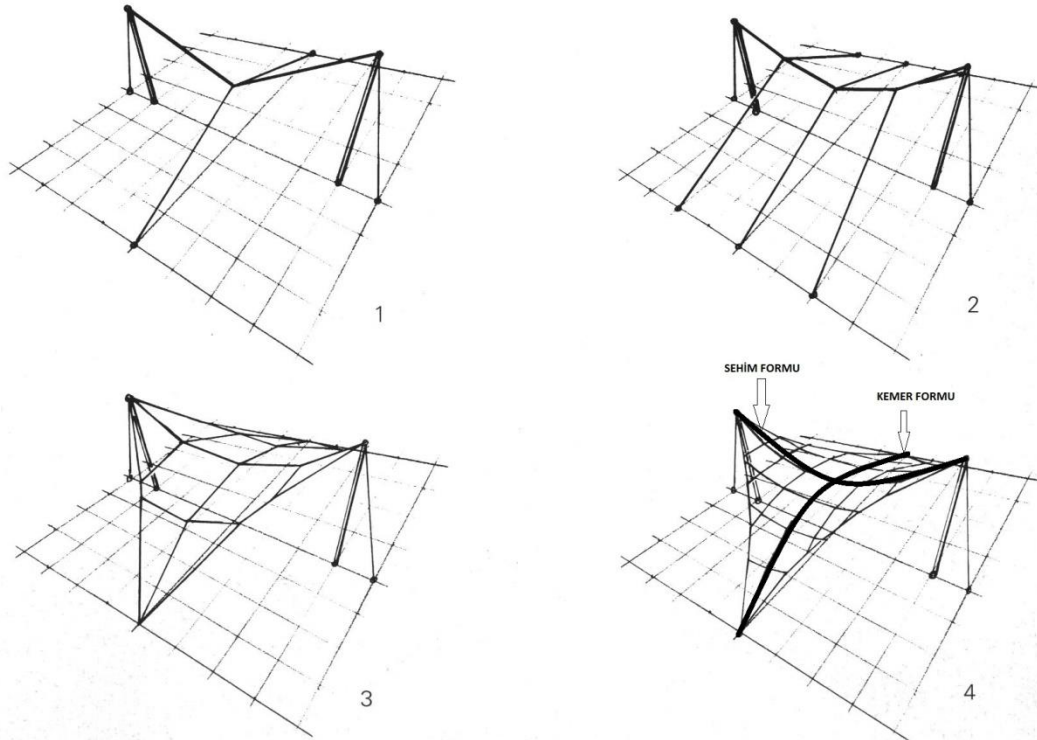


Şekil 18.



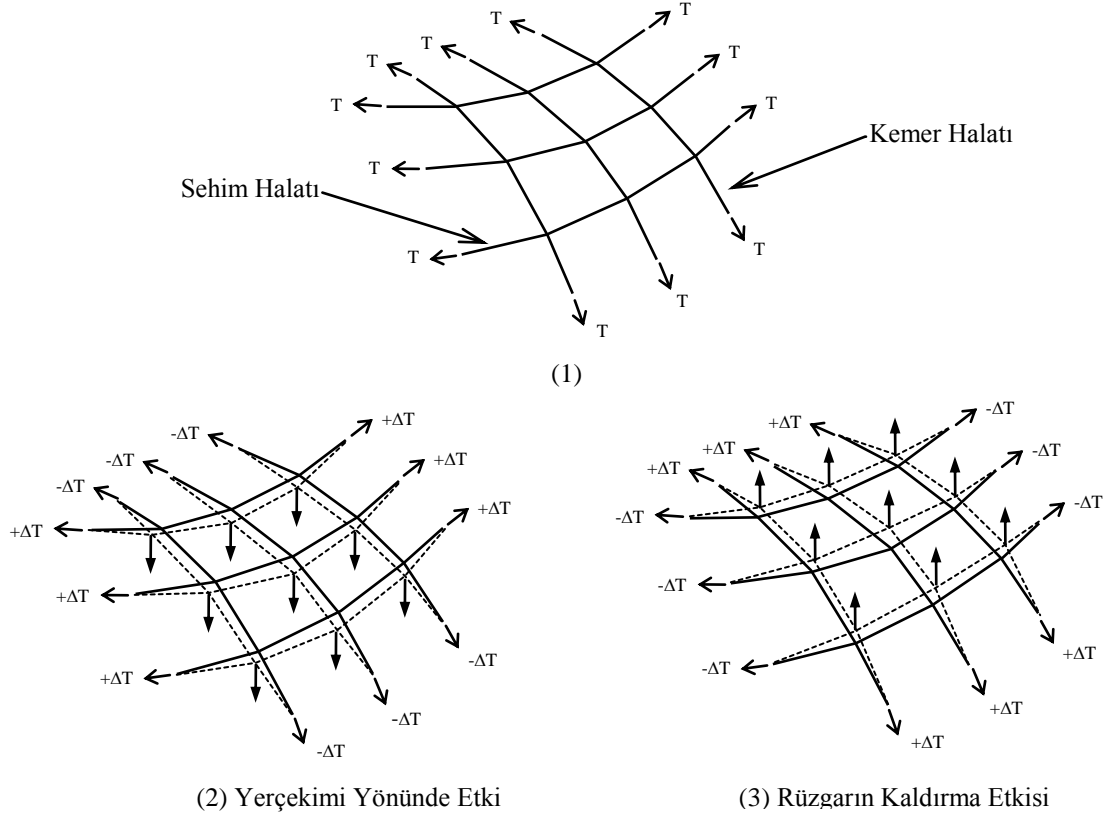
Şekil 19.

İpimize stabilite kazandırmak için ilave ağırlıklar asmak ipe ve ağaca ilave yükler getirdiği için çok efektif bir çözüm olmayabilir. Bu çözümün yerine ipimizin yükü taşımaya başladığı 'sehim' ve 'kemer' formlarının bir arada olduğu sistemler şekil 18 ve 19 (Berger, 1996)'da gösterilmiştir. Şekil 18'de iki ip arasında yerleştirilen ağac dalları ile (basın çubukları) üst ipte kemer formu ve alt ipte sehim formu oluşturularak her iki ipe bir germe (öngerme) uygulanmıştır. Şekil 19'da ise iki ip arasında ilave ipler konularak, alt ipte kemer formu ve üst ipte sehim formu oluşturularak her iki ipe bir germe (öngerme) uygulanmıştır. Her iki sistemde de yer çekimi yönündeki etkilerde sehim yapan ip gerilecek diğer ip boşalacaktır. Rüzgarın kaldırma etkisinde de kemer yapan ip gerilecek diğer ip boşalacaktır.



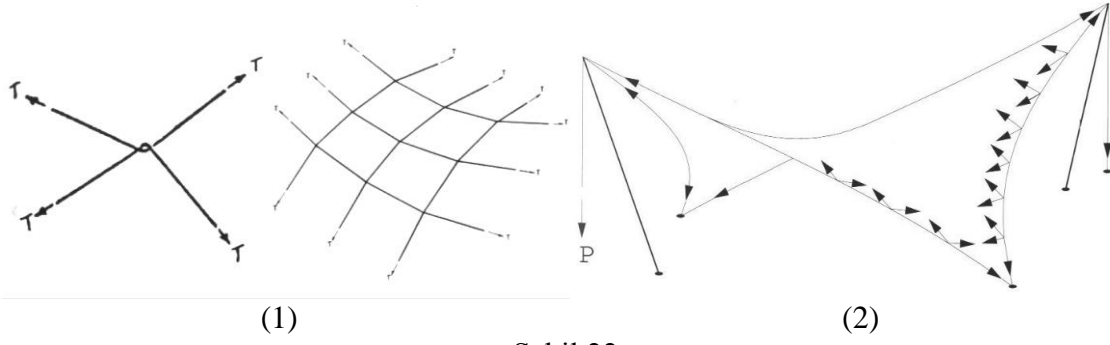
Şekil 20.

Yukarıdaki ağaç örneğinde çamaşır ipimizi sehim ve kemer yapan ipler ve ara bağlantıları ile stabil doğrusal bir taşıyıcı haline getirdik. Aynı prensiple yüzeysel bir halat ağına nasıl geçildiğinin adımları şekil 20 (Berger, 1996)' de gösterilmiştir. Şekil 20.4' de kemer ve sehim yapan iplerin birbirine dik şekilde bağlandığı açıkça görülmektedir. İpler ya da halatlar ortogonal pozisyonları ve birbirlerine göre tam zıt formları ile birbirlerine öngerme uygulamakta ve kararlı dengeyi sağlamaktadır. Üzerlerine gelecek ilave yüklerde yukarıdaki çamaşır ipimiz gibi hareket edeceklerdir.



Şekil 21.

Germe yapıların kararlı dengede kalabilmesi için yüzeyini tanımlayan eğriliklerden biri sehim formundayken diğeri kemer formunda olmalıdır. Daha net bir anlatımla; germe yapıların formları rastgele seçilemez. Halatlar yüzey eğrilikleri doğrultusunda olmalı, bir yöndeki halat diğer yöndekine bir öngerme etkisi uygulamalı ve bu şekilde kararlı denge sağlanmalıdır, şekil 21.1 (Dansık, 1999). Kararlı denge sağlandıktan sonra sistem, üzerine gelen yüklerin doğrultusuna bağlı olarak şekil değiştirecek ve yeni bir gerilme dağılımı oluşacaktır. Kar gibi yerçekimi yönündeki etki altında sehim halatları gerilirken kemer halatları boşalacaktır, şekil 21.2 (Dansık, 1999). Rüzgarın kaldırma etkisi altında ise kemer halatları gerilirken sehim halatları boşalacaktır. Ancak yüzey her zaman gerilme altında olmalıdır, şekil 21.3 (Dansık, 1999). Boşalma oluşan doğrultuda elemanların kuvveti sıfır ya da negatif olmamalıdır. Gerilmenin sıfır ya da negatif olması o halatta burkulma ya da örtüde kırışma olduğunu gösterir. Bu da yerel stabilitenin bozulduğunu gösterir. Diğer taraftan da gerilmenin arttığı doğrultuda oluşan kuvvet elemanın taşıma gücünden fazla olmamalıdır (Dansık, 1999).

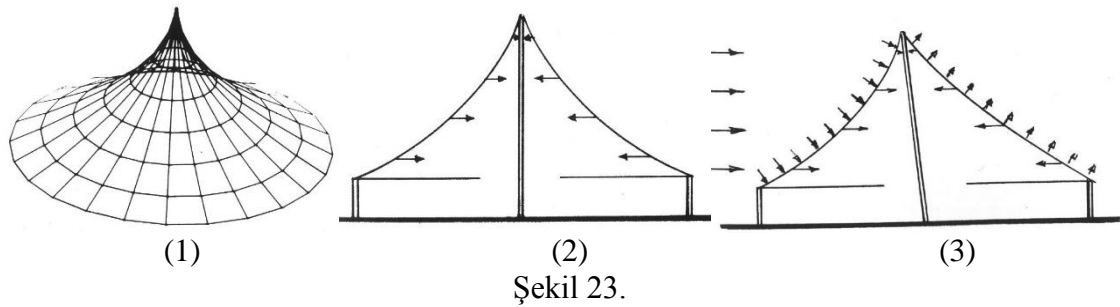


Şekil 22.

Halat ağı yerine membran örtü kullanıldığında, örtünün dokumasındaki sık liflerin her biri bir halat gibi işlev görecektir. Bu nedenle örtülerde esas taşıyıcılığı dokumadaki lifler belirler ve halat ağlarında olduğu gibi liflerin doğrultusu yüzeyin ana doğrultularına paralel olmalıdır şekil 22.1 (Berger, 1996). Şekil 22.2 (Berger, 1996)' de halat ve direklerle gerilmenin membran örtü malzemesinden yapılmış temel HP (Hiperbolik Paraboloid) formunun yüzeyinde nasıl dağıldığı gösterilmektedir.

Denge Formunun Tanımı

Geleneksel yapı sistemlerinde form önceden bilinmektedir. Amaç, verilen forma ve fonksiyona uygun bir taşıyıcı sistem belirleyip yapısal analiz ve detaylarının tasarımını yapmaktır. Yukarıdaki gözlemler açıklıyor ki; esnek membran örtüleri ve/veya halatlar, başka bir deyişle, sadece çekme dayanımı olan yapısal elemanlar kullanılarak tasarlanan germe yapıların ayakta durabilmesi, yüzeyinin formuna ve yüzeyde oluşan gerilmelere bağlıdır. Yüzey öngörme yüklerinin dengelendiği bir formda olmalıdır. Bu forma "denge formu" denir. Germe yapıların yapısal tasarımı, bu formun bulunması ve yüzeydeki öngörmenin belirlenmesi ile başlar. Ayrıca, her yükleme altında yeni bir gerilme dağılımı oluşacağından denge formu değişecektir. Sonuç olarak, her yüklemede germe yapıların formunun geometrisi değişir ve bu şekilde ayakta dururlar. Bu nedenle bu yapıların analizinde geometrik doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmalıdır. Şekil 23' deki örnekte bu davranış anlatılmaktadır.

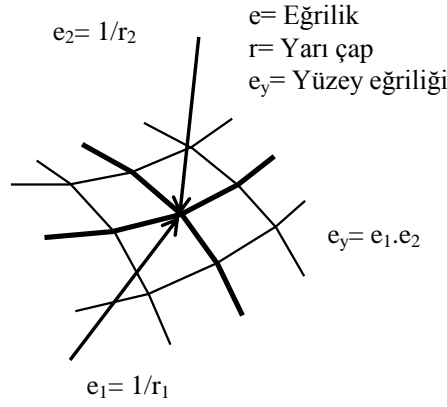


Şekil 23.

Şekil 23.1, 2 ve 3 (Berger, 1996)' te en temel denge formlarından biri olan radyal form verilmiştir. Radyal yüzeydeki paralel hatlar sehime doğrultusudur ve meridyen hatlar kemer doğrultusudur. Şekil 23.2' de verilen kesitte kemer halatlarının sehime halatlarına nasıl bir öngörme uyguladığı görülmektedir. Şekil 23.3' te soldan gelen rüzgar etkisi altında sistemin deforme olmuş hali verilmektedir. Soldan gelen rüzgar etkisi yüzeye sol tarafta basınç sağ tarafta ise emme etkisi yapmaktadır. Bu durumda sol taraftaki sehime halatları gerilirken kemer halatları boşalmaktadır. Sağ tarafta ise yüzeydeki emme etkisi

altında bunun tam aksi durum oluşacaktır. Sonuç olarak, beklentinin tam aksine, ortadaki direk sol tarafa yani rüzgarın estiği tarafa yatmaktadır. Bu davranış ancak geometrik doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile belirlenebilir.

Denge Formlarının Matematiksel İfadesi

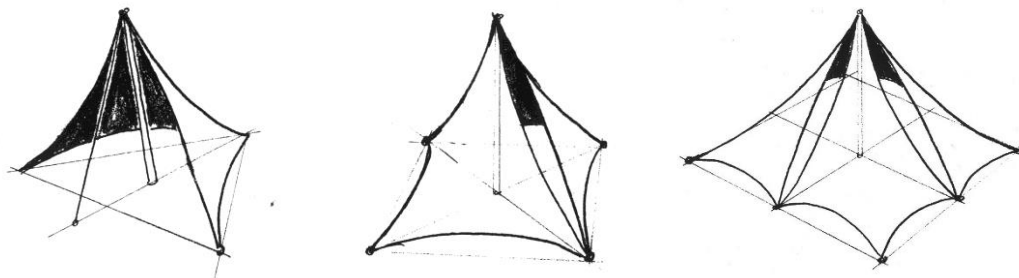


Şekil 24.

Bir yüzeyin Gauss eğriliği; yüzeyi tanımlayan iki ana doğrultudaki eğriliklerin çarpımıdır. Eğer bu eğrilikleri belirleyen yayların birinin merkezi yüzeye göre ters yönde ise bu eğriliklerden biri negatif olarak kabul edilir ve Gauss eğriliği negatif olur. Şekil 24’ deki yüzeyin r_1 yayının merkezi yüzeye göre iç tarafta iken diğeri dış taraftadır. Bu eğrilikler birbirine göreceli olarak negatiftir. Sonuç olarak negatif Gauss eğriliğine sahiptir. Negatif Gauss eğriliğine sahip yüzeylerin en bilinen şekli semer formları iken pozitif Gauss eğriliğine sahip yüzeylerin en bilinen şekli ise kubbe formlarıdır. Negatif Gauss eğrilikli yüzeyler “Anticlastic” formlar, pozitif Gauss eğrilikli yüzeyler ise “Synclastic” formlar olarak ta adlandırılırlar.

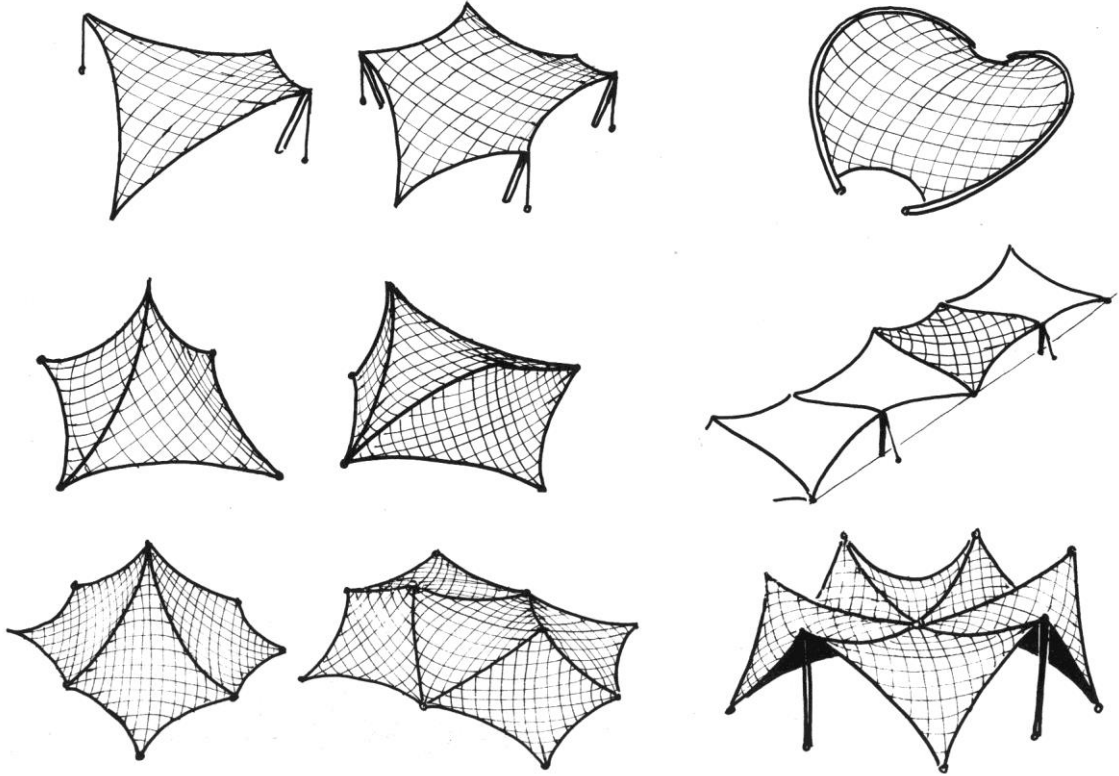
Yukarıda verilen örneklerdeki gibi mekanik yöntemlerle belli noktalardan çekilerek gerilen yüzeylerin dengede olabilmesi için formunun Anticlastic olması gerekir. Synclastic denge formları ise ancak pnematik (hava şişirme) yöntemi ile elde edilebilir.

Temel Denge Formları



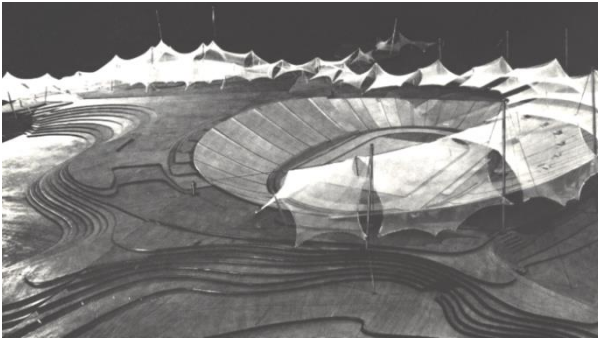
Şekil 25.

Herhangi bir örtüden denge formu elde etmek için örtüyü en az 4 noktadan çekmek gerekir. Bu noktalardan en az birinin diğer üçünün geçtiği düzlemin dışında olması gerekir şekil 25 (Berger, 1996). Aşağıda şekil 26 (Berger, 1996)’ da temel denge formlarına ait örnekler gösterilmektedir.



Şekil 26.

Denge Formlarının Bulunması



Şekil 27.



Şekil 28.



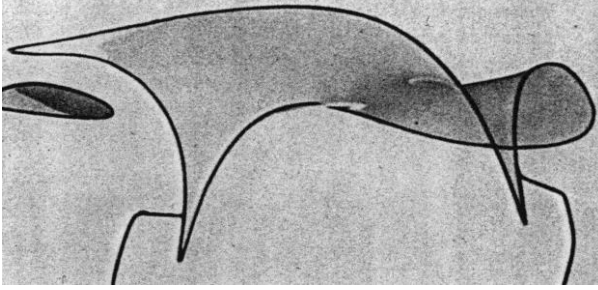
Şekil 29.



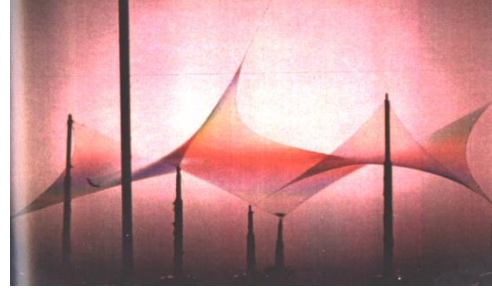
Şekil 30.

Germe yapıların denge formları başlangıçta fiziksel modelleme ve maketler yapılarak bulunmuştur. Maket çalışması, sistemlerin çalışma mekaniğinin daha iyi anlaşılabilmesi

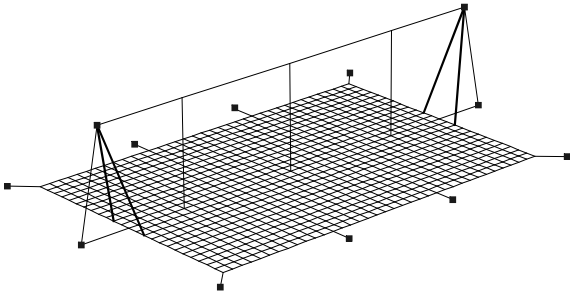
için günümüzde de hem eğitim sürecinde hem de tasarım sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 27 ve 28 (Otto, 1995) Münih Olimpiyat Stadyumunun tasarım ve analizleri aşamasında yapılan maketleri göstermektedir. Şekil 29 ve 30 öğrenci çalışmalarını göstermektedir.



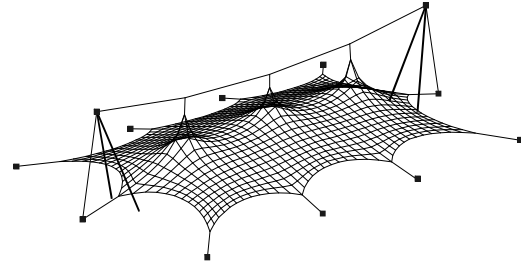
Şekil 31.



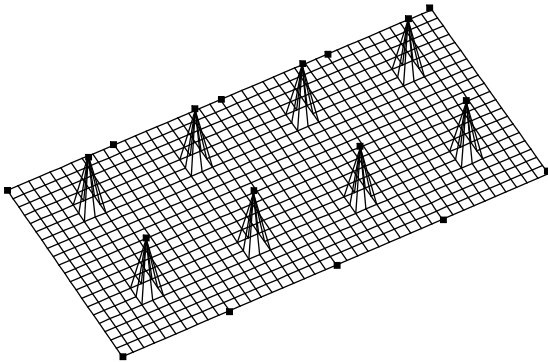
Şekil 32.



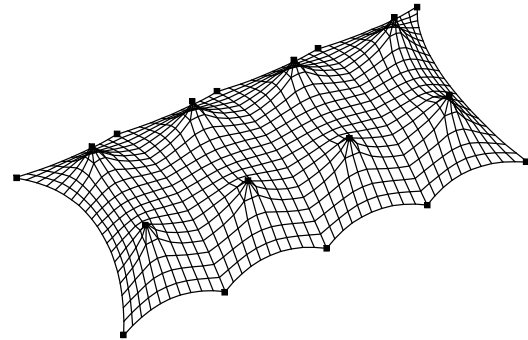
Şekil 33.



Şekil 34.



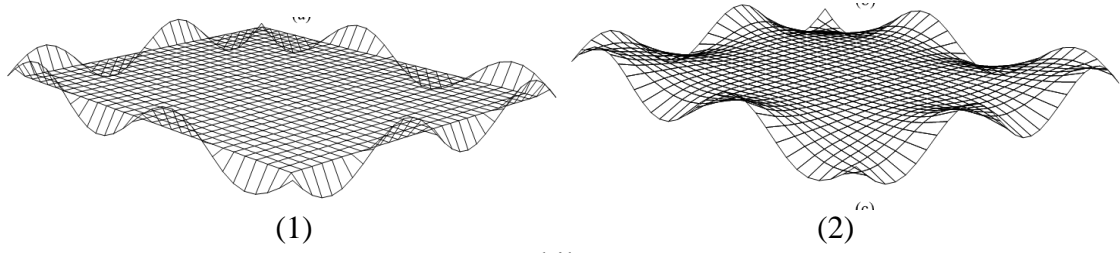
Şekil 35.



Şekil 36.

Denge formların bulunmasında kullanılan diğer yöntem ise sabun köpüğüdür. Örnekleri şekil 31 (Otto, 1965) ve 32 (Otto, 1995)' de görülmektedir. Bu tip modeller denge formunun tasarımına göre önceden hazırlanan telden ve/veya ipten bir çerçevenin sabun-su karışımının içine daldırılması sonucunda çerçevenin içinde oluşan sabun ile elde edilir. Sabun köpüğünden elde edilen formların en önemli özelliği yapılan çerçeve içinde matematiksel olarak oluşması mümkün olan sonsuz sayıdaki yüzey içinde minimum yüzey alana sahip olanı vermesidir. Bu nedenle sabun köpüğünden elde edilen formlar 'minimum yüzey' olarak adlandırılmaktadır. Minimum yüzeylerin fiziksel karşılığı üzerindeki her doğrultuda gerilme farklarının minimum olması ya da gerilme farkı olmamasıdır. Sabun köpüğünün yüzeyde oluşabilecek farklı gerilmeleri tolere edemeyeceği açıktır. Gerilmelerin yüzeye eşit yayılmasından dolayı bazı akademik çevreler minimum yüzeylerin denge formu olarak kullanılması gerektiğini savunmaktadır. Ancak, minimum yüzeyler kenar çerçevelerin orta bölgesine geldikçe düzleşmekte ve hem görsel hem de statik anlamda sorun oluşturabilmektedir.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle denge formları sayısal yöntemler ile bulunmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerde, hesap başlangıçta dengede olmayan tasarımcının oluşturduğu bir ağ (mesh) ile başlar. Ağın sadece mesnet noktaları belirlenir ve yöntemle göre ağ oluşturulan elemanların öngerme, sınır koşulları ve malzemenin karakteristik özellikleri gibi değerleri tanımlanır. Daha sonra hesap yöntemine bağlı olarak ağ oluşturulan bütün noktaların denge pozisyonu hesaplanır ve denge formu bulunur. Şekil 34' teki denge formu şekil 33' teki başlangıç ağı ile oluşturulmuştur. Aynı şekilde, şekil 36, şekil 35' teki başlangıç ağı ile oluşturulmuştur.



Şekil 37.

Sabun köpüğü formlarda sayısal olarak hesaplanabilmektedir. Şekil 37.2' deki minimum yüzey şekil 37.1' deki başlangıç ağı ile oluşturulmuştur. Şekil 37.2' nin şekil 34 ve 36' dan farkı, yüzeyindeki gerilme farklarının minimum olacak şekilde formunun bulunmasıdır. Bu nedenle orta kısmı düze yaklaşan bir form almıştır.

Analiz Yöntemleri

Genel olarak form bulma yöntemleri germe yapıların geometrik doğrusal olmayan statik analizleri için geliştirilmiş yöntemler ile aynıdır.

Dinamik Sönümlenme (Dynamic Relaxation) Yöntemi

Bu yöntemde, form bulmak için kullanılan geometrik olarak lineer olmayan denklemler dinamik probleme dönüştürülerek çözüm sağlanır ve çözümde dinamik analiz prensipleri kullanılır. Bunun için titreşimi belirleyen kütle ve sönüm karakteristik değerlerini belirlemek gerekir.

İteratif olarak yürütülen analizin her adımında her düğüm noktasındaki kuvvetler incelenir. Herhangi bir noktadaki dengelenmemiş iç kuvvetler bu noktadaki kütlede ivme oluşturur. Yapı titreşimi sönümlendiğinde oluşan yüzeyin şekli öngerilmiş denge formunu oluşturur.

Dengelenmemiş kuvvetlerin dinamik davranışının incelendiği bu metotta, başlangıç formlarını tespit etmede iyi sonuç alınabilir, ancak, incelenen noktaların iterasyon sırasında form dışına çıkması gibi stabiliteyi bozacak durumlar da oluşabilir. Kütle, sönüm ve iterasyon zaman adım aralıklarının doğru seçilmesi dinamik analiz sonucunun hızlı yakınsamasını sağlar, aksi takdirde sonuç yavaş yakınsaması yanında ıraksayabilir de (Shaeffer, 1996).

Kuvvet Yoğunluğu (Force Density) Yöntemi

Bu metod, form bulmada kullanılan denklemlerin lineer haline getirilmesi tekniği üzerine kurulmuştur. Bu metotta öncelikle, belirli bir öngerme altındaki denge formu belirlenir. Bunun için, yaklaşık olarak formu, destek noktaları ve halat kuvvetinin halat uzunluğuna oranı gibi bir takım kuvvet yoğunluğu (force density) oranlarının bilinmesi gereklidir. Serbest bulunan noktaların başlangıç konumlarının bir önemi yoktur. Bu metotta, her nokta birbirilerine çerçeve sistemde olduğu gibi elemanlarla bağlıdır. Farklı oranların seçilmesi farklı denge formlarının bulunmasını sağlar. Öngerme altında sistemin denge formu bulunduğu zaman, sisteme dış yükler uygulanır (Shaeffer, 1996).

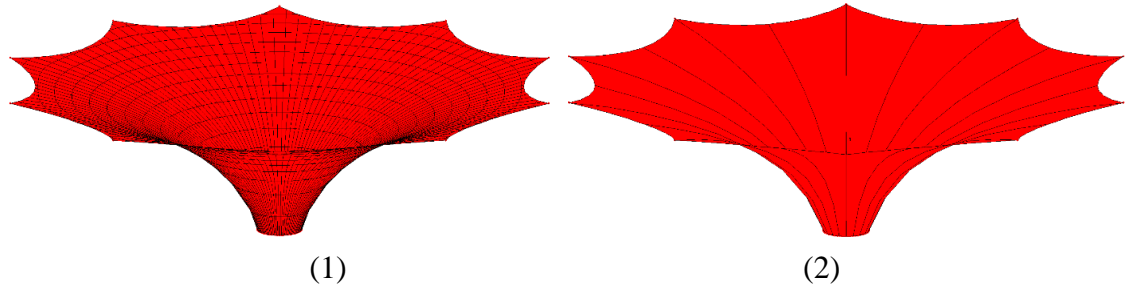
Sonlu Elemanlar (Finite Element) Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin temelini oluşturan eleman rijitlik matrisinin yanı sıra geometrik rijitlik matrisi de denge denkleminde kullanılarak iteratif olarak geometrik doğrusal olmayan analizler yapılabilir.

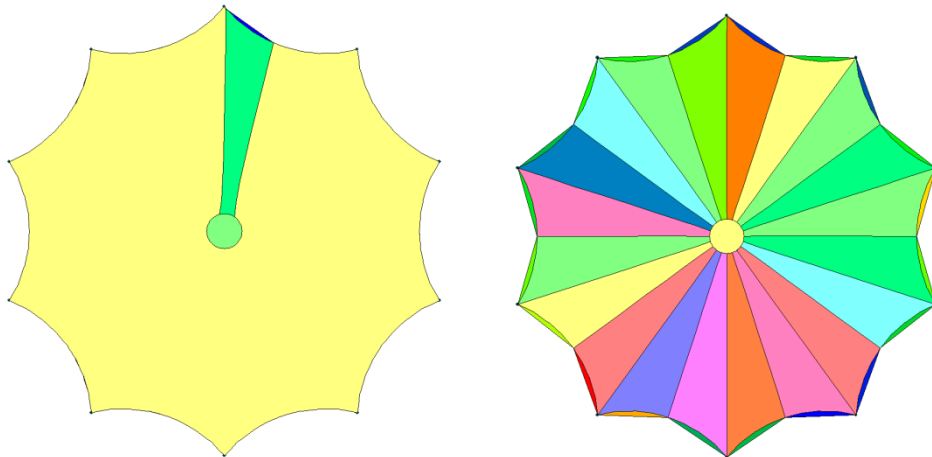
Bu yöntemde başlangıç formunun geometrisinin iyi tanımlanmaması ve öngerme kuvvetlerinin doğru belirlenmemesi durumunda sonuca yavaş yakınsamaktadır hatta sonuç iraksayabilir.

Germe Formlarının İmalatı

Yapılan tasarım ve yapısal analizler sonucunda denge formu 3 boyutlu ve üzerinde belli bir öngerme olacak şekilde belirlenir. Bundan sonraki adımda, bu form belirli bir en ve uzunlukta olan kumaş toplarından çıkarılacak kalıplar kullanılarak imal edilir. Bu süreçte kesme kalıplarının çıkarılması adı verilir. Kesme kalıplarının çıkarılması easy programı kullanılarak aşağıdaki örnek ile anlatılmıştır:



Şekil 35.

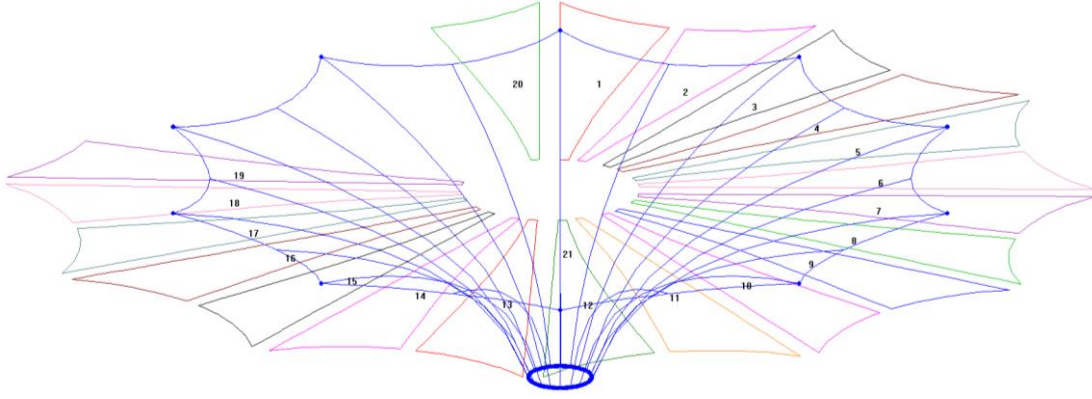


(1)

(2)

Şekil 36.

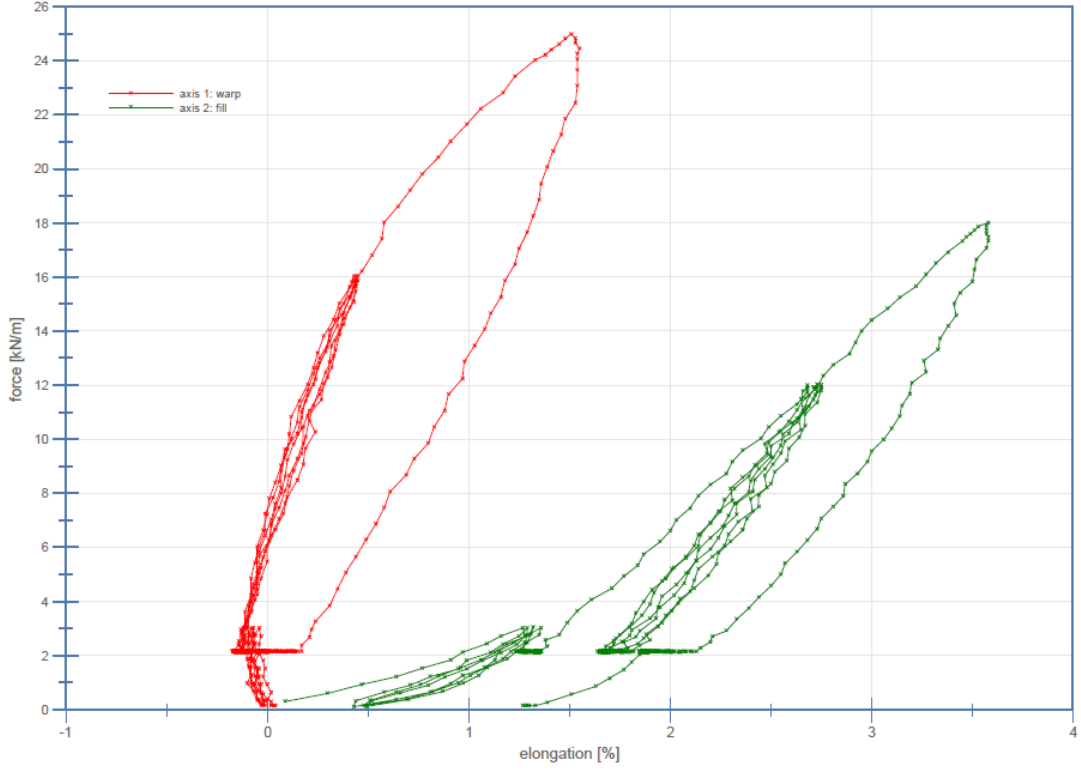
İlk adım olarak denge formunun yüzeyi (şekil 35.1) kullanılacak kumaşın enine sığacak şekilde bölünmelidir (şekil 35.2). Bu parçaların her birine panel adı verilir. Yüzey eğriliğinin büyük olduğu durumlarda ya da küçük örtülerde bir en kumaştan 2 ya da daha fazla panel çıkartılabilir. Paneller bütün yüzey dilimler halinde bölünerek kumaş genişliğini geçmeyecek şekilde belirlenir (şekil 36.1 ve 2).



Şekil 37.

Paneller yüzeyden ayrılırlar. Uzayda eğrisel bir yüzey oluşturan panel düzleme indirilir (şekil 37). Bu işlem harita veya kağıt şeritler yöntemleri kullanılarak yapılır.

Düzleme indirilen her bir panel halen gerilmiş bir yüzeye aittir ve dolayısıyla uzamıştır. Bu nedenle üzerinde gerilme olmayan kumaştan panelleri kesmeden önce panellerdeki gerilmenin kaldırılması, başka bir deyiş ile panelin uzama kadar küçültülmesi gerekir. Küçültme oranı, sadece ilk andaki öngerme değil, malzemenin zaman içerisinde esnemesinden ve yüklemeler altında uzayıp kışalmasından oluşacak gerilme kayıpları ile birlikte ilave uzamanlar da göz önünde tutularak belirlenmelidir. Böylece, yüzeyin devamlı öngerme altında olması sağlanır. Küçültme oranı örtü malzemesi üzerinde yapılacak iki-yönlü çekme testine göre belirlenmelidir (şekil 38). Testin yüklemesi projeye göre her iki yöndeki öngerme, maksimum ve minimum gerilmelere göre hazırlanacak zaman ve yüklemeye grafiğine göre yapılmalıdır. Bu grafik statik analizleri yapan mühendis tarafından belirlenir.



Şekil 38.

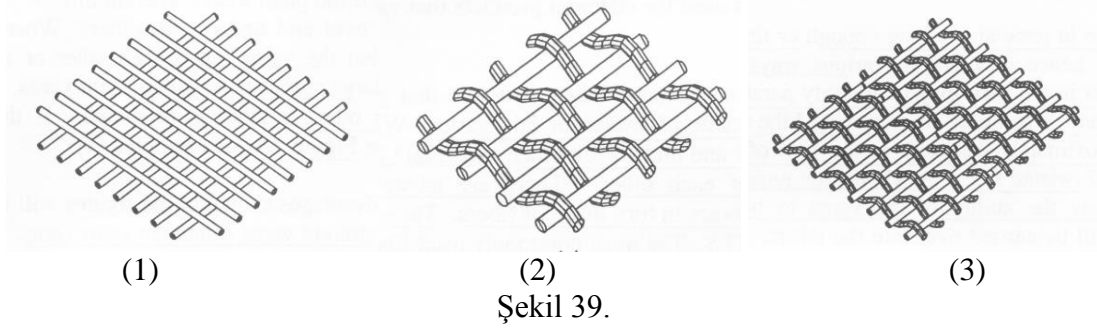
Malzeme

Tarihsel başlangıcından itibaren çadırlar ya da germe sistemler 3 ana öğeden oluşmaktadır; Örtü, Halat ve Destek taşıyıcı elemanlar. Germe sistemlerde örtü malzemesi olarak teknolojik tekstil ürünü olan membranlar kullanılır. Halatlar ise yüksek dayanımlı çelik tellerin değişik şekillerde sarılmasıyla elde edilen germe elemanları olarak kullanılır. Destek taşıyıcı elemanlar ise membran örtünün asıldığı veya sürekli olarak bağlandığı rijit taşıyıcı elemanlardır. Bu elemanlar, çelik boru veya kafes, ahşap eleman ve betonarme kiriş ya da kolon olabilir.

Bu bölümde membran örtü malzemesi, halatlar ve halat uçları ile ilgili genel bilgi verilecektir.

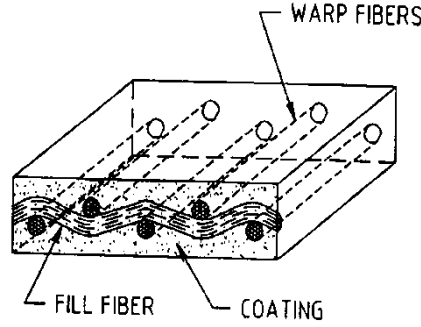
Membran Malzemesi

Temel olarak membran malzemesi, membran sistemlerin esas taşıyıcı elemanları olan, liflerden oluşturulan ipliklerin dokunması ile elde edilen özel bir tür kumaştır. Lifler yeterince kalın ya da uzun olmadıkları için, çeşitli yöntemlerle iplik oluşturmak üzere bir araya getirilirler. Lifler birbirine paralel ve düz ya da döndürülerek birleştirilerek dokuma ipliği haline getirilirler. Düz bir şekilde birleştirilerek oluşturulan dokuma ipliğinin uzama rijitliği bir araya getirilen lif grubunun uzama rijitliği ile yaklaşık olarak aynı olacaktır. Ancak, döndürülerek oluşturulan dokuma ipliğinde yük altında uzama miktarı daha fazla olacak ve iplik eğilmeye karşı daha esnek olacaktır. İpliğin bu özelliği de dokunduğu kumaşa yansacaktır.



Dokuma işleminin de çeşitli yöntemleri mevcuttur. Şekil 39.1 (Shaeffer, 1996)' de görüldüğü gibi birbirine paralel iplerin, bir yönde alta bir yönde üste gelecek şekilde birbirine dik iki yönde yerleştirilmesi ile anılan düz dokuma bulunmaktadır. İplerin birbirleri içinden geçirilmesi ile oluşturulan dokuma şekli bulunmaktadır. Birbiri içerisinden geçirilen iplerin sıkı ya da gevşek dokunması şeklinde gruplama da yapılabilir (şekil 39.2 ve 3).

Dokumadaki düz ipliklere Atkı (warp) iplikleri denir. Dokuma işlemi sırasında gergindirler. Çözü (weft / fill) iplikleri ise atkı yönündeki iplerin arasından, altından ve üstünden geçirilerek örülürler. Yük altında atkı ve çözgü iplikleri farklı davranış gösterirler. Yük altında atkı iplikleri gerilirken çözgü iplikleri ise genişlerler. Çözgü liflerindeki çekme kuvveti nedeniyle atkı ipliklerinde de bir miktar eğilme görülebilir.



Şekil 40.

Yukarıda belirtilen dokuma ipliklerin birbirlerine etkileri nedeni ile ortotropik malzeme davranışı görülür. Bu davranışı ortadan kaldırmak için bazı dokumalarda kaplama öncesi öngerme uygulanabilir.

Genel olarak dokuma ipliğini oluşturan liflerin döndürülme miktarı, alanı, gerginliği ve dokuma yöntemine de bağlı olarak atkı yönünde çözgü yönüne göre daha gergin bir dokuma elde edilir.

Membran yapılarında kullanılan lifler; naylon, polyester, cam, PTFE (PolyTetraFluoroEthylene) ya da aramid olabilir.

Membran örtü dış etkenlere açık olduğundan dokumayı dış etkenlerden korumak ve dokumaya su/hava geçirmezliği sağlamak için kimyasal kaplama işlemi uygulanır. Sıvı kaplama malzemesi kullanıldığında, kaplama sıvı halde dokuma üzerine dökülerek uygun araçlarla yüzey düzeltilir ve sertleşmeye bırakılır. Kaplama tabakalı filmler halinde de olabilir. Bu durumda dokuma, üzerine serilen kaplama malzemesi ile

sıkıştırılır ve bütünleşmeleri sağlanır. Dokuma ve kaplama arasındaki kimyasal yapışma ile iki malzeme bir bütün gibi davranır. Ancak, kaplamanın kompozit hale gelen malzemenin çekme dayanımına katkısı yoktur. Membran dokumanın kaplama malzemesi olarak PVC (PolyVinylChloride), PTFE (PolyTetraFluoroEthylene) ve silikon kullanılmaktadır. Ana kaplamanın üstüne ilave bir kaplama daha yapılarak, örtünün, kendi kendini temizleyen yüzey özelliğinin yanı sıra ultraviyole ve diğer dış etkilere karşı dayanımı artırılır (Shaeffer, 1996). Bu kaplamalar genel olarak lak (lacquer) olarak bilinir. Lak malzemesi olarak en çok kullanılan PVF (PolyVinylFlouride), PVDF (PolyVinylDeneFlouride) ve TiO₂ (titanium dioksit) tir.

Germe membran yapılar bölgelere göre değişebilen dış yük değerlerini taşıyabilecek ve farklı iklim koşullarına karşı dayanım gösterecek özelliktedirler.

Genel olarak membran örtünün karakteristik özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Ağırlığı, 2 kg/m²' den daha az olması nedeniyle hesaplarda ihmal edilebilir. Malzeme ağırlığı çok az olduğundan sismik yükleme yapmak gerekli değildir.
- Çekme dayanımı, sistemin üzerine gelen yükleri hasar görmeden taşıyabilecek büyüklükte olmalıdır. Membran malzeme sistemde sadece çekme yükünü aldığı için çekme dayanımı geleneksel malzemelere göre en önemli özelliğidir.
- Çekme modülü, malzemenin çekme yükleri altında yapabileceği deformasyonu belirleyen bir ölçüdür. Malzemenin çekme dayanımı, numuneler üzerinde yapılan çekme testleri ile belirlenen kopma değerinin güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilir. Malzemenin dış yüzey malzemesi olarak kullanıldığı için, nem, kar, yağmur, UV ışınlar gibi etkiler altında bulunmaktadır. Bu etkiler nedeniyle kaplamasında, ve dolayısıyla dokumasında bozulmalar oluşabilir. Aynı zamanda membran malzeme iki yönde doğrusal olmayan davranış gösterir. Bu davranışı tam olarak gerilme analizinde yansıtmak mümkün değildir. Ayrıca, zaman içinde malzemenin gerilip boşalmasından oluşacak kalıcı uzamalar ve sünmelerin de hesap modeline yansıtılması mümkün değildir. Bu ve bunun gibi sebeplerle test sonucu elde edilen çekme dayanımı direkt olarak hesaplarda kullanılmaz. Bu değerler bir güvenlik sayısına bölünürler. Uygulamada güvenlik katsayısı 4 ya da 5 olarak alınır.
- Çekme dayanımı aşılmadan membranın yırtılması ve yırtığın yayılması sonucu hasar görmemesi için yırtılmaya karşı direncinin de büyük olması gerekir. Kullanılan ana malzeme ve kaplama malzemesi yırtılma direncini belirler.
- Membran malzemenin yangın direncini ölçmek için bazı yangın testleri membran malzemeye adapte edilmiştir. Bu testlere göre membran malzemeler yangın sınıflarına ayrılırlar. Yapılarda kullanılan malzemenin kesinlikle alev yürütmez sınıfta olması gereklidir.
- Işık geçirgenliği kullanılan lifin malzemesine, lifler arasındaki örgü mesafesine ve kaplama malzemesine bağlı olarak değişik oranlarda olabilir. İhtiyaca göre üretilen malzemelerden uygun olan seçilebilir.
- Membran malzemelerin akustik performanslarını değerlendirirken ses dalgalarını yansıtmaya özelliğine bakmak gerekir. Membran örtüler genelde 500 ile 2000

Herz arasında ses dalgalarını yansıtırlar. Bu yüksek yansıtma özelliği nedeni ile müzik performanslarında ses yetersizliği ve konuşmaların yeterince seçilememesi sonucu oluşabilir. Ancak çatıya verilen form ile bu akustik açıdan oluşan olumsuzluk giderilebilir. Hava şişirmeli sistemlerde ya da kemer destekli dış bükey sistemlerde bu sorun ortadan kalkmaktadır.

- Kolay temizlenebilir bir malzeme olan membran malzemesinin ömrü, üzerindeki kaplama malzemesine göre 30 yıla kadar çıkabilir (Shaeffer, 1996).

Halat ve Halat Uçları

Halatlar germe sistemlerin ana öğelerinden bir diğeridir. Her sistemde kullanılması gerekmemekle birlikte çoğunlukla membran kenar gerdirmeye elemanı olarak ya da membran elemandan bağımsız olarak çelik rijitlik sağlayıcı eleman olarak kullanılmaktadır (şekil 41 ve 42).



Şekil 41.



Şekil 42.

Aşağıdaki şekil 43 (Vandenberg, 1996)' te en yaygın kullanılan halat tipleri gösterilmiştir. Bunlara ilave olarak 6x19 tip halat da Türkiye' de yaygın kullanılmaktadır.

	Axial stiffness	Flexural stiffness	Tensile strength
● High tensile rod	High	High	High
● 1 x 19 'Dyform' compact strand	↑	↑	↑
● 1 x 19 strand	↓	↓	↓
● 7 x 19 strand	Low	Low	Low

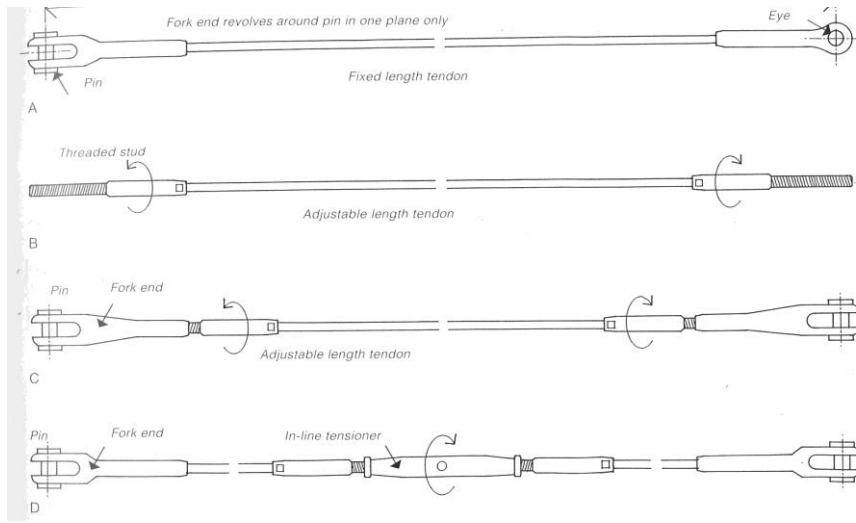
Şekil 43.

Halatlar genelde dinamik ve tekrarlı yükler etkisi altında olduğu için güvenlik katsayıları kullanılmaktadır. Bu değer 1,5 ya da 2,0 olabilir.

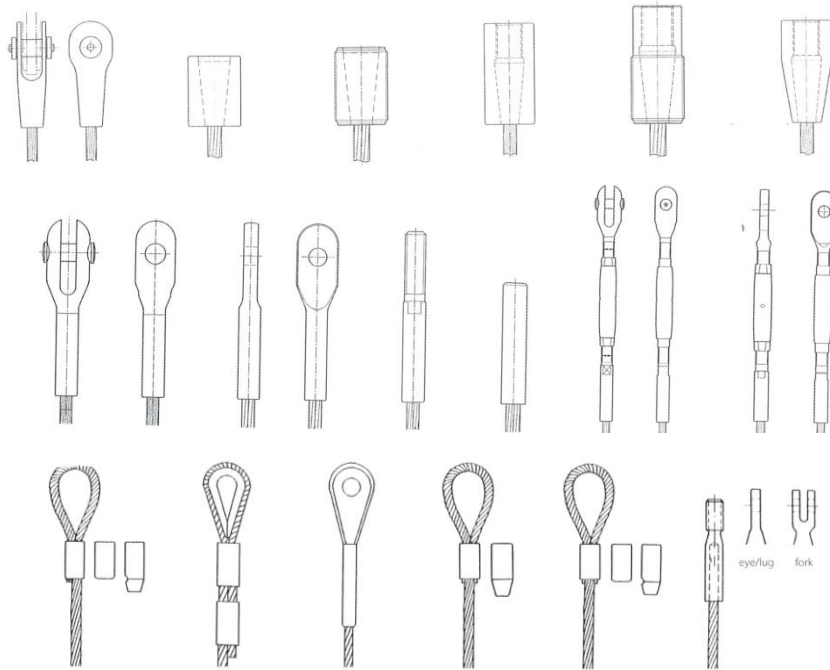
Bazı durumlarda form ya da detay gereği halatların eğilmesi gerekir. Halatlardaki çok keskin eğilmeler halatın mukavemetini kaybetmesine ya da halat tellerinin ayrılmasına neden olabilir. Detay hazırlanırken bu hususa da dikkat etmek gerekir.

Halat uç detayları doğru yük aktarımının sağlanması açısından önemlidir. Halat uçları en az halatın taşıması gereken yük kadar yük taşıyabilecek boyutlarda ve halatın istenilen yöne doğru deforme olmasına izin verecek özellikte olması gerekir.

Halat uçları aynı zamanda sistemin germe kuvvetinin uygulandığı noktaları olduğu için halat uçları tasarlanırken bu germe kuvvetinin de dikkate alınması gerekmektedir. Aşağıdaki şekil 43 (Seidel, 2007) ve şekil 44 ((Vandenberg, 1996)' te çeşitli halat uçlarına ait detay örnekleri bulunmaktadır. Eğer halat ucunda germe yapılması istenmiyorsa bu durumda gerdirme özelliği olmayan halat ucu seçilebilir.



Şekil 44.



Şekil 45.

Birleşimler ve Detay Prensipleri

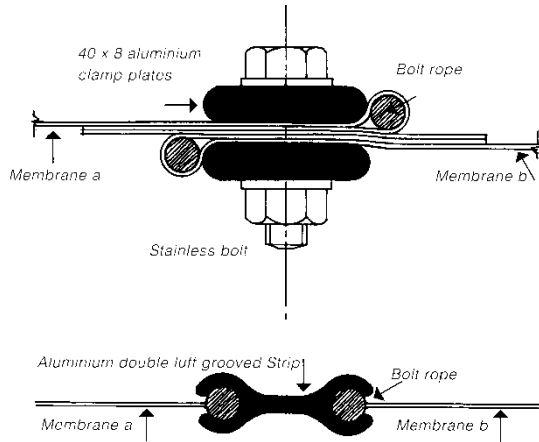
Membran-Membran Kaynak Birleşimi:

Membran malzeme üretici firmaya göre 1,5 m ile 4.7 m arasında değişik genişliklerde toplar halinde piyasaya sunulmaktadır. Membran sistemin imalatı yapılırken, tasarımı yapılarak formu bulunan örtünün üç boyutlu yüzeyi düzleme indirilir. Düzlemdeki yüzey üzerinden kalıplar çıkartılarak bu kalıplar top halindeki membrandan kesilir. Daha sonra membran sistemlere özgü kaynak yöntemleri kullanılarak kalıplar birleştirilir.

Yapılan kaynağın, membran yüzeyinde oluşan gerilmeleri taşıyabilecek kapasitede olması gerekir. Buna göre kaynak genişlikleri ayarlanabilir. Ayrıca, uygulanacak kaynağın membran yüzeyinde bulunan, membranın dış etkilere karşı direncini belirleyen koruyucu tabakaları eritmemesi de önemlidir.

Membran-Membran Mekanik Birleşim:

Membran örtünün çok büyük olması durumunda ya da montaj koşulları gereği sahada membran örtü birkaç parça halinde yapılabilir. Bu durumda membran örtülerin birleştirilmesinde mekanik yöntemler kullanılması tercih edilir. Şekil 46 (Vandenberg, 1996)' da mekanik birleşime ait örnekler gösterilmiştir. Membranın kenarı boyunca fitil (bolt rope) yapılarak metal elemanlar arasında sıkıştırılır ya da özel olarak çekilmiş alüminyum profillere mekanik olarak bağlantı yapılır.



Şekil 46.



Şekil 47.

Örnek Yapı ve Detaylar

Bu kısımda verilen detaylar örnek oluşturması amacıyla verilmiştir. Önemli olan detayın nasıl çalışması gerektiğinin belirlenerek detayın buna uygun olarak tasarlanmasıdır. Aşağıda verilen örnek sistem germe sistemlerde çok sık kullanılan hiperbolik paraboloid (HP) sisteme ait bir örnektir. Bu tür sistemlerin düşey taşıyıcıları yaygın olarak mafsallı kolonlar ve kolonların stabilitesini sağlayan halat ya da halatlar ile düzenlenir.



Şekil 48.



Şekil 49.

Germe sistem kolonunun taban plakasına mafsallı bağlantı detayı aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 50.



Şekil 51.

Şekil 52' deki detayda iki halat elemanı aynı taban plakasına bağlanmıştır. Şekil 53' te radyal formda bir membran örtünün tepe detayı görülmektedir.



Şekil 52.

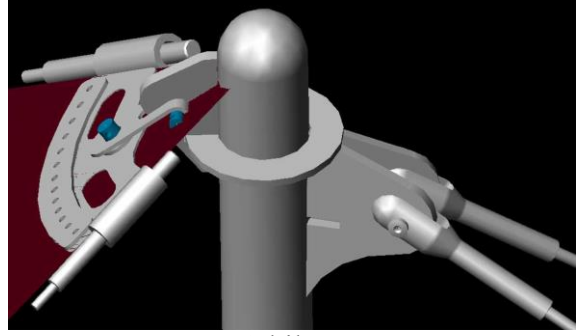


Şekil 53.

Şekil 54’ te birden fazla membran örtünün destek taşıyıcı elemana, kolona bağlantı detayı görülmektedir. Şekil 55’ te membran örtüye ait köşe plaka detayı 3D çizimi görülmektedir.

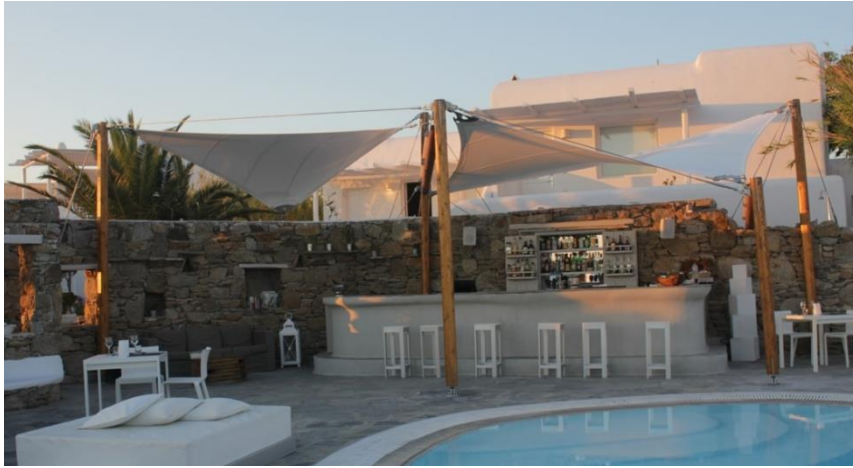


Şekil 54.



Şekil 55.

Şekil 56, 57 ve 58’ de ahşap taşıyıcı sistem ile desteklenen membran örtü sistemi örneği bulunmaktadır.



Şekil 56.



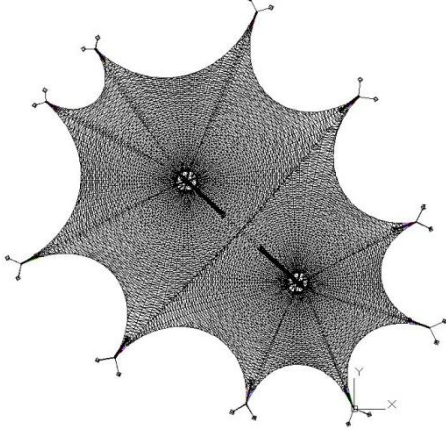
Şekil 57.



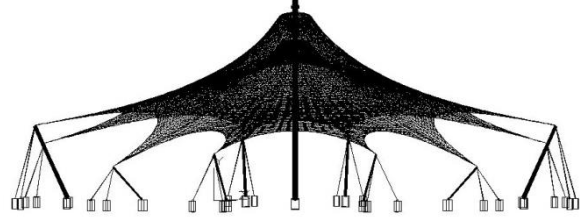
Şekil 58.

Uygulama Örneği

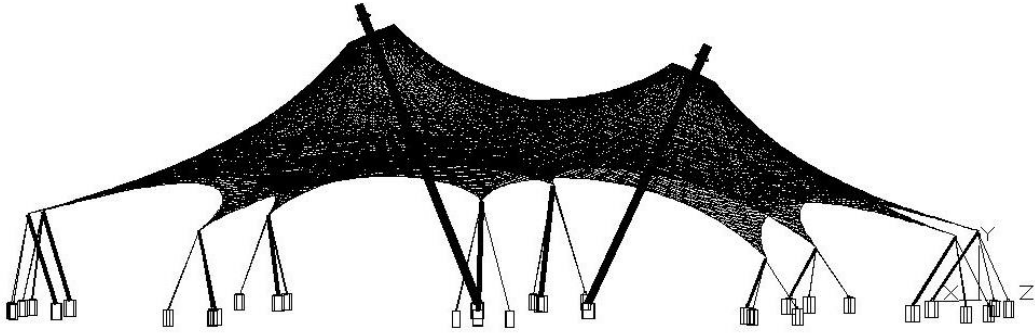
Şekil 59-63' te uygulanmış bir iki tepelikli Radyal membran örtü sisteminin projesine ait çizimler bulunmaktadır. Şekil 64-68'de sisteme ait uygulama resimleri sunulmuştur.



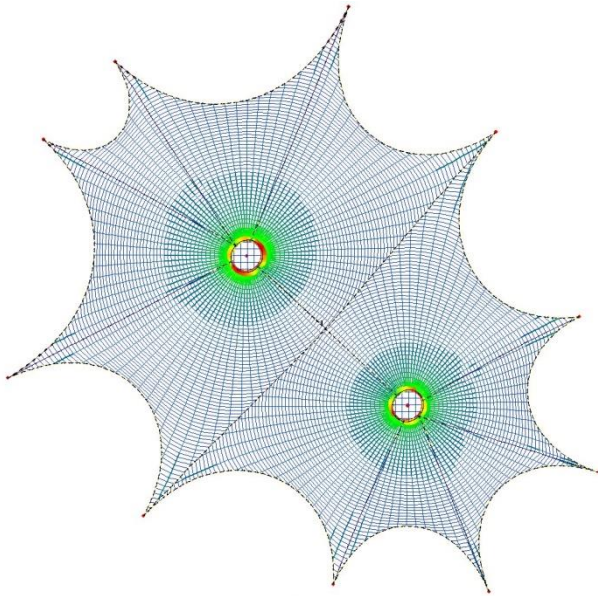
Şekil 59.



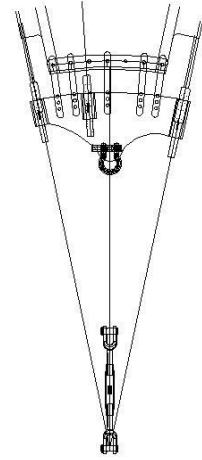
Şekil 60.



Şekil 61.



Şekil 62.



Şekil 63.



Şekil 64.

Şekil 65.



Şekil 66.



Şekil 67.



Şekil 68.

Kaynaklar

Berger, H. (1996), Ligth structures, Structures of Ligth, the Art and Engineering of Tensile Architecture, ISBN 3-7643-5352-X, ISBN 0-8176-5352-X, Berlin, Almanya.

Shaeffer, P. E. and Task committee on Tensioned Fabric Structures of the Tech. Comm. on Special Structures of the Tech. Adm. Comm. on Metals of the Struc. Div. of the ASCE (1996) A Practical Introduction to Tensioned Fabric Structures, ASCE.

<https://patentimages.storage.googleapis.com/pages/US3247627-1.png>

http://www.alpenverein.de/chameleon/mediapool/0/f3/olympiapark-muenchen_id43323.jpg

Dansık, F. (Şubat 1999), Force Density Method and Configuration Processing, Doktora Tezi, Surrey Üniversitesi.

<http://openbuildings.com/buildings/khan-shatyry-entertainment-center-profile-18834#!buildings-media/1>

http://cdn.fenerbahce.org/pic_lib/2008-07-30_stadyum446.jpg

Otto, F. and Rasch B. (1995), Finding Form, Deutscher Werkbund Bayern, Almanya.

Otto, F. and Schleyer F. K. (1965), Basic Concepts and Survey of Tensile Structures, volume2, Almanya.

Vandenberg, M. (1996), Soft Canopies, Academy Group, İngiltere

Seidel M. (2007), Tensile Surface Structures, Ernst&Son, Almanya.