

# Asma germe membran yapı sistemleri

## temel tasarım ve imalat prensipleri

Onelli Membran Yapı  
Yavuz Vural  
Şubat-2016  
Versiyon 1.2  
*Taslaktır.*

### Not:

*Bu dökümanda membran olarak kastedilen dokunmuş tekstilden oluşan yapısal malzeme, membran yapı olarak kastedilense çift eğrilikli karşıt yönlü yüzeyden oluşan, öngerilimli yapısal sistemlerdir. Form ve malzeme olarak farklı nitelik taşıyan pnömatik sistemler bu dökümanın kapsamında değildir.*

Geleneksel yapı elemanlarından farklı olarak yapısal membran malzemelerinin eğilme ve basınç rijitliği yoktur. Yapısal membranların yeğane taşıyıcı özelliği çekme dayanımıdır.

**Kabaca 1kg/m<sup>2</sup> ağırlığında ve 1mm inceliğinde, çekme dayanımından başka kayda değer bir rijitliği olmayan malzemenin rüzgar ve kar yüküne karşı direnç gösteren bir yapı sistemi malzemesi olarak kullanılması nasıl mümkün olmaktadır?** Sorunun cevabı asma germe membran yapı sistemlerini mümkün kılan, birbiriyle ilişkili, iki temel prensibe dayanmaktadır; form ve öngerilim.

### Bir membran yapı sistemi örneğinin yapısal çalışma modeli

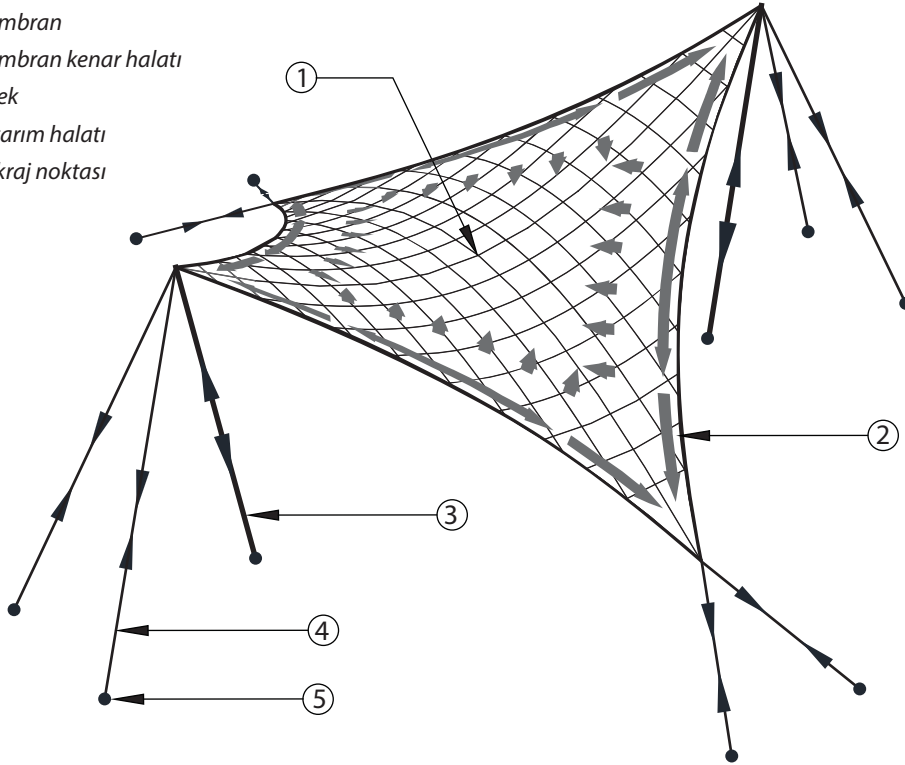
1- Membran

2- Membran kenar halatı

3- Direk

4- Aktarım halatı

5- Ankraj noktası

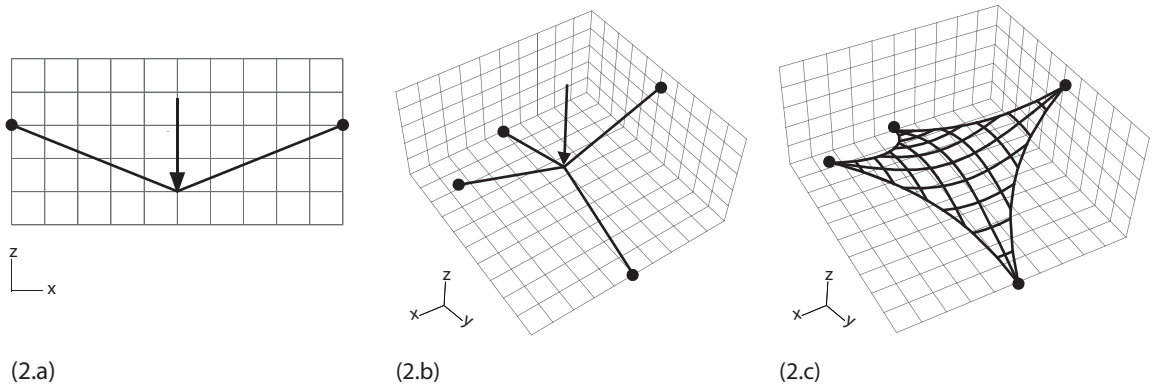


Figür 1. Öngerilim altındaki hiper formda elemanların davranışı

4 noktadan oluşan hiperbolik paraboloid yüzeyin kenarları halatlarla çevrili. Bu sistemde direkler hariç tüm elemanlar çekmeye çalışıyor. Sisteme köşe noktalardan etkiyen çekme kuvveti membran yüzeyin gerilmesini sağlamakta. Yüzey ters yönlü karşıt eğrilikli bir geometriye sahip. Yüzey geometrik olarak tüm yönlerden gelecek etkilere karşı stabil durumda. Yukarı çeken yöndeki eğriler dikey yönde gelen yüklere, aşağı doğru çekmeye çalışan eğriler yatay yönde gelen yüklere karşı sistemi stabil hale getiriyor. Yapı bu haliyle kar ve rüzgar yüklerinden kaynaklanan yatay ve dikey etkilere karşı direnç gösterebilecek durumda. Sistemde oluşan tüm yükler direklerde basınç, aktarım halatlarında çekme kuvveti olarak temellere aktarılmakta.

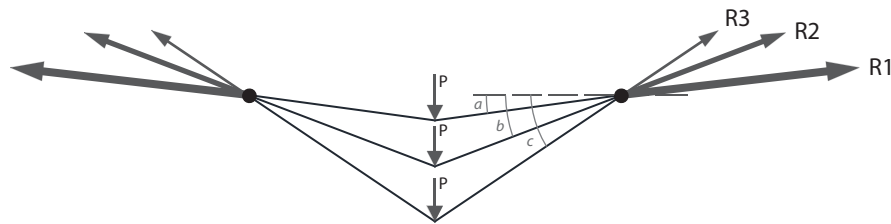
## 1. Form

Asma germe membran yapı sistemlerinin temel formu karşıt yönlü çift eğrilikli (antiklastik) bir yüzeydir. Kar ve rüzgar yüklerine direnç gösterecek bir yüzey hedeflediğimizde bu form yapısal bir zorunluluktur. Membran yapı formunu oluşturan karşıt yönlü çift eğrilikli yüzey, sadece geometrik bir şekil olmayıp yüzeyi oluşturan tüm noktaların denge içinde bulunduğu fiziksel bir durumun sonucudur. Eğilme ve basınç rijitliği bulunmayan sabun köpükleriyle 3 boyutlu bir tel çerçeve içinde oluşturulacak yüzeyler bu forma örnektir. Formun çıkış noktası estetik, görsel kaygılar olmayıp yapısal anlamda doğanın bir taklidine dayanmaktadır.



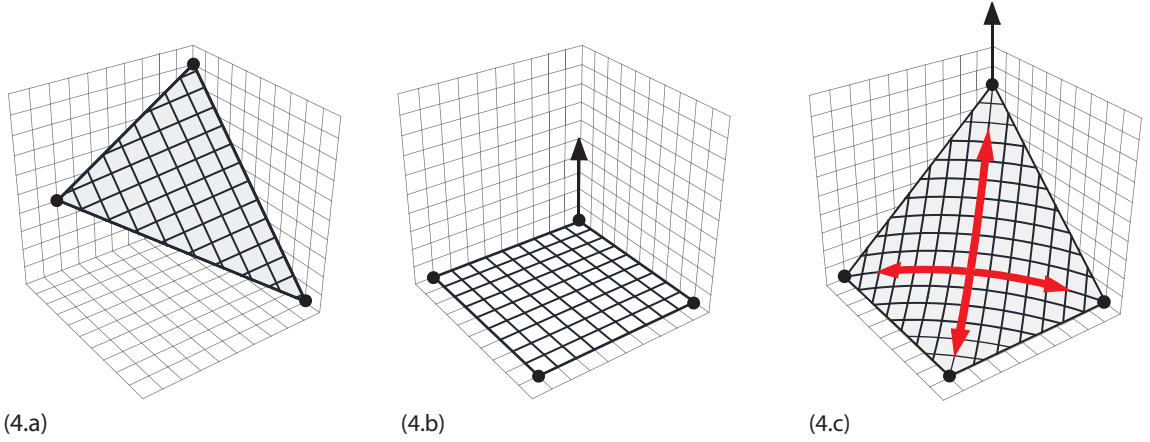
Figür 2. Form ve stabilite

Karşıt yönlü, çift eğrilikli bir sistemi kabaca tanımlamak amacıyla; iki ucundan sabitlenmiş boşlukta sallanan ağırlığı önemsiz bir halata orta noktasından bir ağırlık astığımızda halat bu yöndeki olası hareketini sonlandırarak görece bir stabilite kazanır. (Figür 2.a) Ancak halat mevcut düzlemine dik olarak gelecek ikinci bir kuvvet yönünde stabil değildir. Bu stabiliteyi mevcut düzleme dik düzlemde ekleyeceğimiz ikinci bir halatla sağlayabiliriz. (Figür 2.b) Bu şekilde sistemin her iki yöndeki hareketi engellenerek görece bir stabilite kazanması sağlanmış olur. Bu temel prensibi, her noktası bu ilişkiyi sağlayacak bir yüzey olarak ifade ettiğimizde 2.c formunu elde ederiz. Bir asma germe membran yapı sisteminde yüzeyi oluşturan tüm düğüm noktalarının 2.b de gösterilen ilişkiye sahip olması ve fiziksel bir denge durumunda olması beklenir. Form bulma olarak adlandırılan bu işlem, yüzeyin tamamı için bir denge durumunun elde edilmesiyle sağlanır.



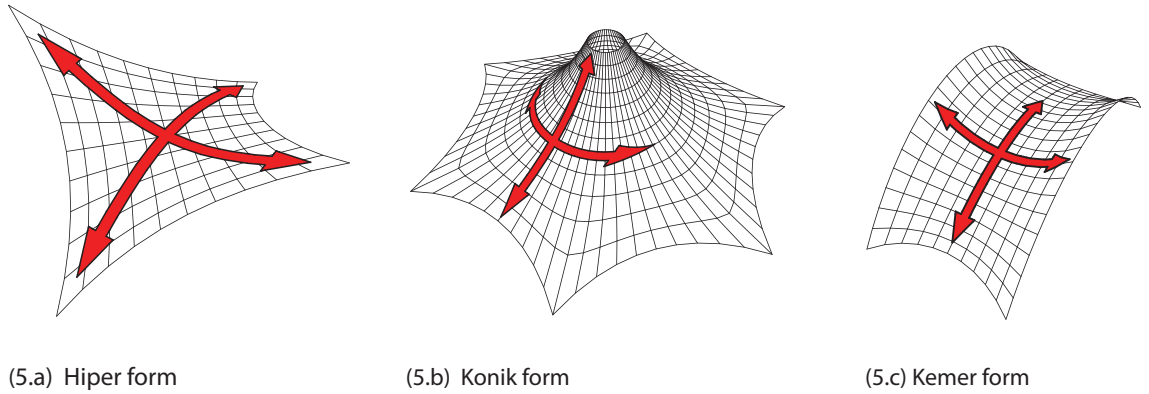
Figür 3. Düğüm noktasının açısına bağlı olarak değişen reaksiyonlar

Düğüm noktasına uygulanan kuvvet aynı olmasına rağmen oluşan reaksiyonlar düğüm noktasının düzlemle olan açısına bağlı olarak değişmekte.



Figür 4. 2 ve 3 boyutlu yüzeyler

3 noktadan oluşan bir yüzey her koşulda düz, 2 boyutlu bir form oluşturur. Noktaların koordinatlarını değiştirdiğimizde yüzeyin açısı değişecek fakat düz bir yüzey olarak kalacaktır. (Figür 4.a) 4 noktadan oluşan tek düzlemlili bir yüzey, 3 noktadan oluşan bir yüzeyle yapısal olarak aynı özelliktedir. (Figür 4.b) Yüzeyin asma germe formunda olması için en az 4 noktadan oluşması ve bu noktalardan birinin farklı bir kotta olması gerekir. (Figür 4.c) Ancak bu şekilde karşıt yönlü çift eğrilikli bir yüzey elde edebiliriz. Yüzey, karşıt yönlü eğrilikleri kazandıkça gerekli yapısal rijitliği sağlamak için gereken kuvvet miktarı azalacak, yapının dış yüklere olan direnç kapasitesi artacaktır.



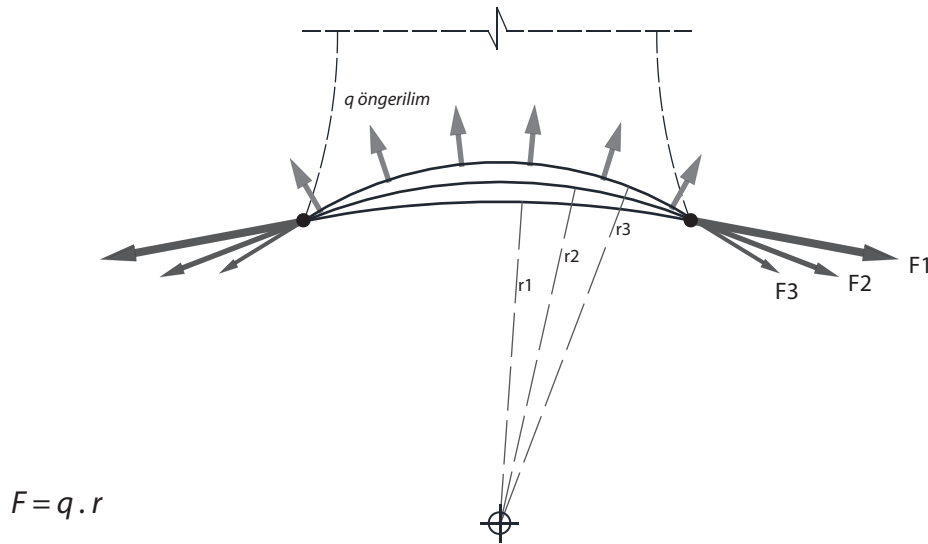
Figür 5. Asma germe membran yapı formları

Karşıt yönlü çift eğrilikli yüzeyler tipolojik olarak 3 temel formda sınıflandırılmaktadır. Olası tüm asma germe membran yapı yüzeyleri bu formlardan türetilmektedir. Hepsinin ortak özelliği karşıt yönlü çift eğrilikli bir yüzeyden oluşmalarıdır. Bu formların kendilerine özgü yapısal davranışları vardır. Çözülmesi gereken tasarım problemine bağlı olarak, farklı yapısal, fonksiyonel, estetik çözüm olanakları sunarlar. Hiper ve kemer formda karşıt eğrilik yay çaplarının eşit olması mümkünken koniklerde dikey yöndeki eğrilğin yay çapı her zaman daha büyüktür. Kemer formlar en az bir cephede sabit bir konstrüksiyon desteğiyle sağlanırlar.

## 2. Öngerilim

Öngerilim form bulma aşamasında, gerekli eğrilikleri oluşturacak şekilde yüzeye uygulanan çekme kuvvetidir. Membran yapının formunu, bu çekme kuvvetinden kaynaklanan gerilmelerin yüzeyde dağılımı şekillendirmektedir. Montajı tamamlanmış bir membran yapı sistemi için yüzeyi oluşturan bu yükler sabit bir yüküdür ve öngerilim olarak adlandırılır. Öngerilimini yitiren bir membran yapı sistemi bu anlamda kar ve rüzgar yüklerine karşı direncini ve stabilitesini dolayısıyla yapı niteliğini kaybeder. Yüzeye uygulanan öngerilim miktarının yapıyı oluşturan diğer tüm elemanlar üzerinde etkisi vardır.

Membran yüzey ancak gerekli öngerilime sahipse dış yüklerden oluşan etkilere direnç gösterebilir, yükleri taşıyıcı sisteme güvenli bir şekilde aktarabilir. Öngerilimin temel amacı yüzeye dış yüklerle direnç gösterecek stabiliteyi kazandırmaktır. Öngerilim yüzeyin montaj esnasında mekanik olarak gerilmesiyle sağlanır. Germe işlemi halatlarla çevrili bir sistemde köşe noktalarda çekme kuvvetiyle uygulanır. Membran yüzeyin kenarlarda iç bükey olması halatlara uygulanan germe kuvvetinin membranın kenar halatı boyunca gerilmesine neden olur. Diğer bir söyleyişle membran yüzeyindeki gerilimin nedeni halatlardaki eksenel çekme kuvvetidir. Halata uygulanacak çekme kuvveti ve membran yüzeyin kenar yay derinliği arasında bir ilişki vardır. Hedeflenen öngerilim, yay derinliği düşük olan bir sistemde daha büyük bir kuvvetle sağlanabilir. (Figür 6)



Figür 6. Öngerilimi çevre halatlarıyla sağlanan bir sistemde yay derinlikleri ve öngerilim ilişkisi

Membran yüzeyin sahip olması gereken en düşük öngerilim miktarı belirlenirken temel kriterlerden biri projede kullanılacak malzemedir. Kullanılacak membran öngerilim, kar, rüzgar yüklerinin analizi sonucu sistemde oluşan en yüksek gerilmeler dikkate alınarak belirlenir. Form bulma aşamasında elde edilen gerilmeler analiz sonucunda öngörülen membrandan daha yüksek mukavemette bir malzeme gerektirirse form bulma işlemi sırasında kullanılan öngerilim miktarları artırılarak analiz yenilenir.

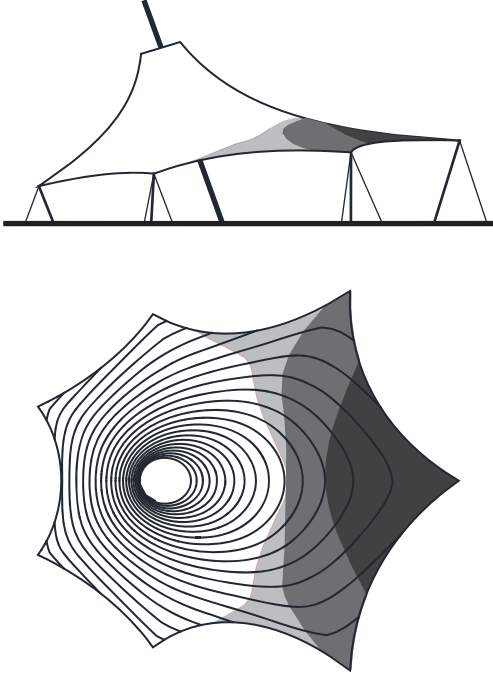
PVC/PES membranlar için önerilen en düşük öngerilme miktarları

| Tip -1    | Tip -2    | Tip -3    | Tip -4    | Tip -5 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 0.70 kN/m | 0.90 kN/m | 1.30 kN/m | 1.60 kN/m | 2 kN/m |

*Kaynak: European Design Guide for Tensile Surface Structures (2004)*

Gereğinden düşük öngerilim kadar aşırı öngerilimde yapı için olumsuz sonuçlar doğurur. Membranlar yüksek kopma mukavemetlerine karşın düşük yırtılma mukavemetine sahiptirler. Aşırı öngerilim bu anlamda yüzeyin zarar görmesine neden olabilir. Bu türden forma bağlı olası zorunlu alanlarda kalınlaştırma uygulanması gerekir.

### 3.1. Form bulma

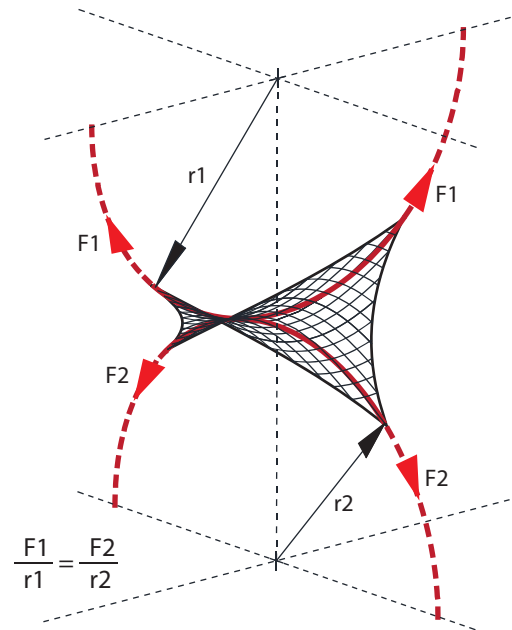


Figür 7. Yüzeyde kar birikebilecek alanlar

Form bulma aşamasında yapılan düzenlemeler yapının dış yüklerle olan direnç gösterme kapasitesini belirler. Stabil bir form için yüzeyin yeterince eğriliğe sahip olması gerekir. Gerilimin yüzeyde düzgün dağılımı içinse karşıt eğriliklerin birbirine oranı belirleyicidir. Eğriliklerin oranları farklı amaçlara yönelik olarak değiştirilebilir. Bir hiper formda üst yay derinliğini azaltmak yüzeyin kar tahliye kabiliyetinin artmasını sağlayabilir. Bu anlamda eğriliklerin birbirine olan oranını değiştirmek, yüzeyde oluşan gerilme dağılımını değiştirmek demektir. Buradan anlaşılacağı gibi form ve gerilim arasında interaktif bir ilişki vardır. Yüzeyi iki farklı karşıt derinlikte yaydan oluşan bir sistemde membranın düşük yay derinliği doğrultusunda daha yüksek gerilime sahip olduğunu söyleyebiliriz. (Figür 8)

Asma germe membran yapı sistemlerinin zengin çözüm olanakları bulunmakta. Mimari konsept çerçevesinde estetik ve fonksiyonel farklı alternatifler geliştirmek mümkün. Form bulma aşamasında, mimari kaygılar öncelikli olmakla birlikte, temel hedef oluşturulan formun rüzgar ve kar yüklerine karşı direnç gösterebilecek bir yüzey geometrisine sahip olmasıdır. Bu bağlamda formun yüklerden yola çıkılarak belirlenmesi gerekmektedir. Tasarım sürecinde kar yükü rüzgar yükünden daha kritik bir öneme sahip. Antalya Belek için uygun olan bir form, Bolu Gerede için uygun olmayabilir. Tasarımın uygulanacağı alana ilişkin çevresel, bölgesel koşulların bilinmesi form bulma aşamasında doğru karar vermek için gerekli.

Yapının olası tüm yüklerle karşı direncini yükseltecek düzenlemelerin yapılması ve yüklerden kaynaklanan risklerin en aza indirilmesi form bulma aşamasında sağlanmalıdır. Tasarlanan sistem mevcut bir yapıya entegre edilecekse karşılıklı etkiler göz önünde bulundurulmalıdır.

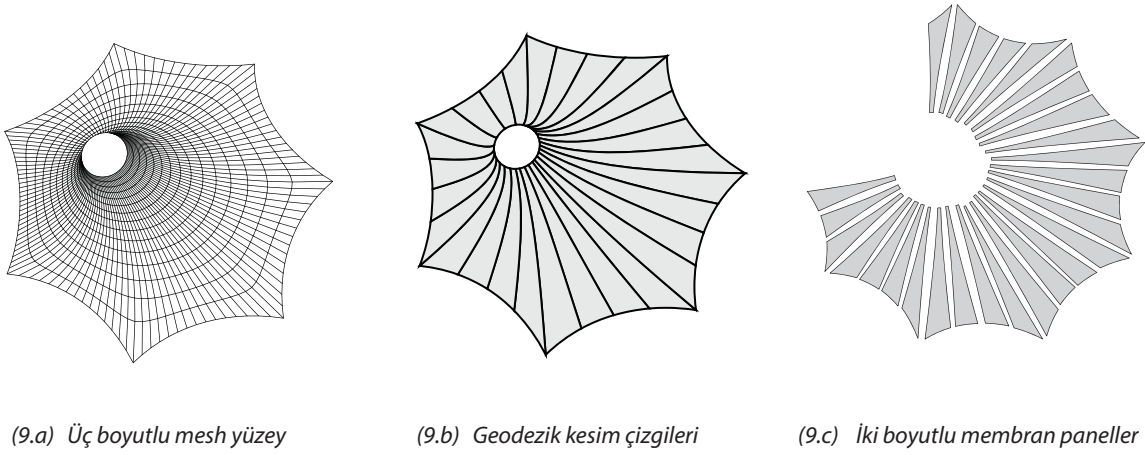


Figür 8. Yüzeyde eğrilik ve gerilme ilişkisi

$$\frac{F1}{r1} = \frac{F2}{r2}$$

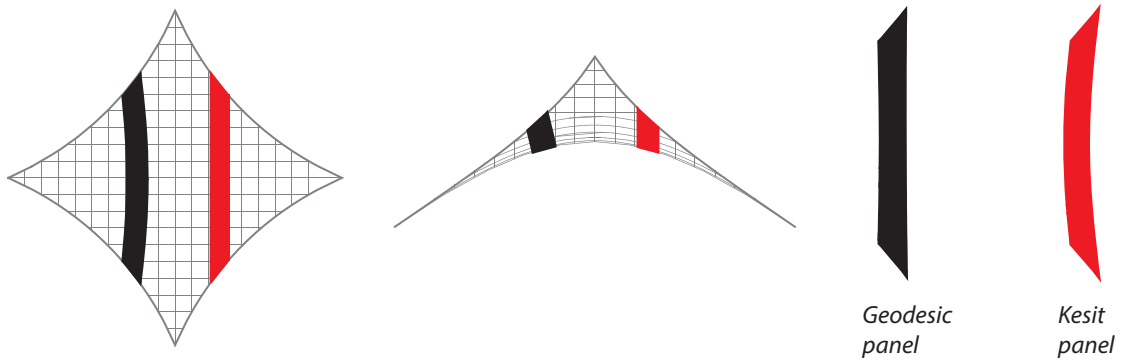
## 3.2 Pannelleme

Uygulamada bir asma germe membran yapı yüzeyi düz membran parçaların birleştirilmesiyle elde edilir. Pannelleme tasarlanan üç boyutlu membran yüzeyin imalat için parçalara bölünerek iki boyuta indirgenmesi işlemidir. Belirlenmesi gereken temel noktalar panellerin doğrultuları ve genişlikleridir.



Figür 9. Üç boyutlu mesh yüzeyin iki boyuta indirilmesi

Panelleri oluşturacak kesme çizgilerinin 3 boyutlu membran yüzeyinde izlediği yol farklı geometrik özelliklerde olabilir. Kesme çizgisinin yüzeyde kesme hattı boyunca mümkün olan en kısa yolu izlemesi yani geodezik olması gerekir. Bu yol aynı zamanda gerilmelerin izlediği yoldur.

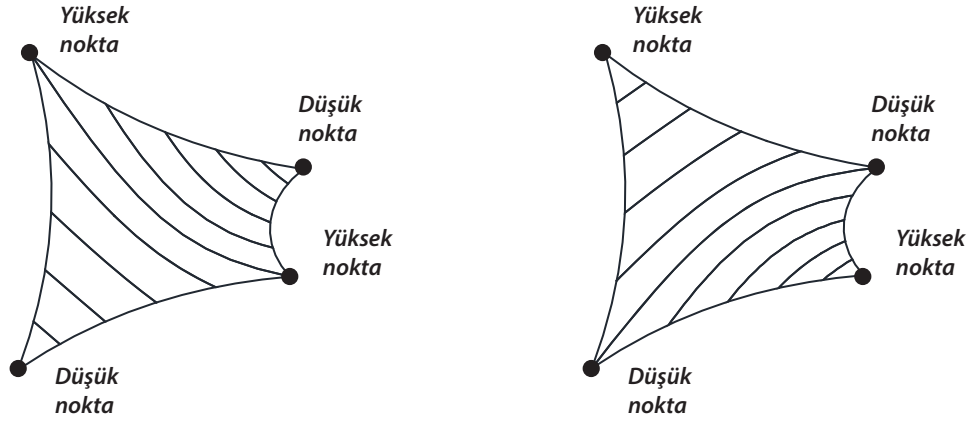


Figür 10. Membran kesim çizgisi geometrisi

### 3.2.1 Panel doğrultularının belirlenmesi

Temel belirleyici tasarlanan membran yüzeyinde kar ve rüzgar yüklerinden kaynaklanan gerilmelerin yönüdür. Yapısal anlamda temel hedef membranın güçlü dokuma yönünün gerilimin yüksek olduğu doğrultuya paralel olmasını sağlamaktır. Bu şekilde membran panellerini birleştiren kaynaklara gelen yüklerin de daha düşük olması sağlanmış olur.





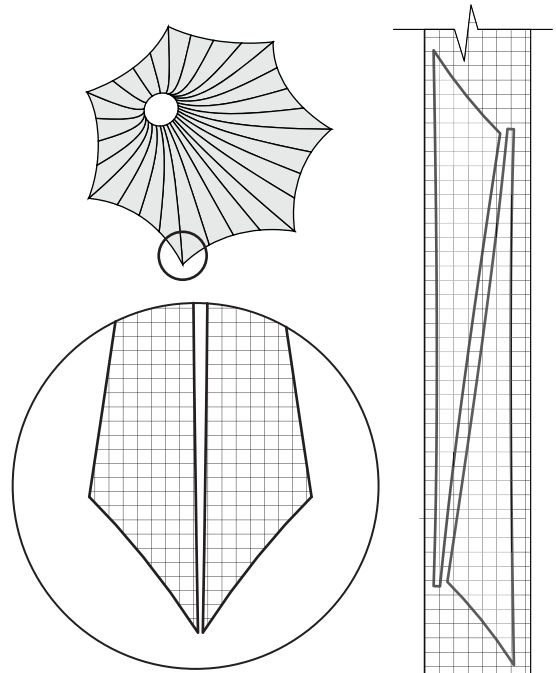
Figür 11. Hiper form için iki farklı panel doğrultusu

### 3.2.2 Panel genişliklerinin belirlenmesi

Görel olarak büyük bir yüzeyde formu elde etmek için elverişli olan panel genişliği aynı formdan oluşan daha küçük bir sistem için uygun olmayabilir. Bu bağlamda yüzeyi oluşturan panellerin genişlikleri kullanılacak membranın rulo genişliğine, yüzeyin büyüklüğüne, forma bağlı olarak değişir. Burada temel belirleyici kullanılan malzemenin esneklik limitlerinin aşılmasıdır. Kompleks bir membran yüzeyinde tüm karşıt eğrilikler birbirine aynı oranda değildir. Yüzeyde derin karşıt yaylardan oluşan alanlar varsa bu bölgelerde panel sayısını artırmak yüzeydeki gerilim dağılımının kesintisiz devam etmesi için gereklidir. Bu alanlar için panel sayısı arttıkça yüzeydeki gerilim dağılımı daha elverişli hale gelecektir. Projede kullanılacak membranın rulo genişliği esas olmakla birlikte fire miktarını aza indirecek düzenlemeler yapılmalıdır.

### 3.2.3 Dokuma yönü optimizasyonu

Membran doğrultuya göre farklı yapısal özellikler gösteren bir malzemedir. Membran yüzeyini oluşturacak paneller birleştirildiğinde gerilmelerin panelden panele aktarılabilmesi için dokuma doğrultularının bu amaca uygun olarak belirlenmesi gerekir. Yüzeyde yüklerin akışını sağlamak için yapılması gereken en önemli aşamalardan biri panellerin dokuma yönlerinin gerilmeleri aktaracak şekilde yana yana gelmesidir. Bu amaçla dokuma yönleri optimize edilmelidir.



Figür 12. Dokuma yönü optimizasyonu

### 3.2.4 Compensation değerlerinin belirlenmesi

Tüm malzemeler gibi membranda çekme yükü altında bir miktar uzar. Compensation, form bulma aşamasında hedeflenen final geometriyi elde etmek için membran yüzeyini oluşturan panellerde yapılan küçültme işlemidir. Temel belirleyici form bulma aşamasında oluşan gerilimin hedef yüzeyde sağlanmasıdır. Membran yüzeyinin istenen rijitliği elde etmesinin temel koşulu compensation oranlarının doğru belirlenmesidir. Membranların asıl taşıyıcı unsuru olan dokuma iplikleri her iki yönde farklı geometriye sahiptir. (Figür 13.) Bu durum membranların iki yönde farklı mekanik davranış sergilemesine neden olur. Bir yönde uygulanan gerilim diğer yönde uygulanan gerilim miktarı üzerinde etkiye sahiptir. Compensation oranlarının belirlenmesi için membran numunesinin iki yönlü gerilme testlerinin yapılması gerekir.

### 3.2.5 Kaynak genişliklerinin tespiti

Temel hedef analiz sonucunda membran yüzeyinde oluşan maksimum gerilmeleri güvenle diğer panele aktaracak bir kaynak genişliğinin belirlenmesidir. Bu genişlik malzemeye ve kullanılan kaynak yöntemine bağlı olarak değişir. Projede kullanılacak membran, analiz sonucu oluşan maksimum gerilme değerlerinin emniyet faktörleriyle çarpılması sonucu oluşan değerleri karşılayacak bir kopma mukavemetinde malzeme olması gerekir. İmalat detaylarının hazırlanması aşamasında malzeme ve öngörülen kaynak genişliklerinin bu değerleri karşıladıkları yapılan testlerle kontrol edilmelidir. Kaynak testleri imalat süresince belirli aralıklarla sürekli olarak tekrarlanmalıdır. PVC/PES membranlar için ideal kaynak yöntemi yüksek frekans kaynağıdır.

PVC/PES membranlar için tipik örnek kaynak genişlikleri

| Tip - 1  | Tip - 2  | Tip - 3  | Tip - 4  | Tip - 5   |
|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 30-40 mm | 40-60 mm | 40-80 mm | 40-80 mm | 80-100 mm |

*Kaynak: Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures (2015)*

PVC/PES membranlar için kaynak genişliği önerisi

| Tip - 1 | Tip - 2 | Tip - 3 | Tip - 4 | Tip - 5 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 40 mm   | 60 mm   | 80 mm   | 80 mm   | 100 mm  |

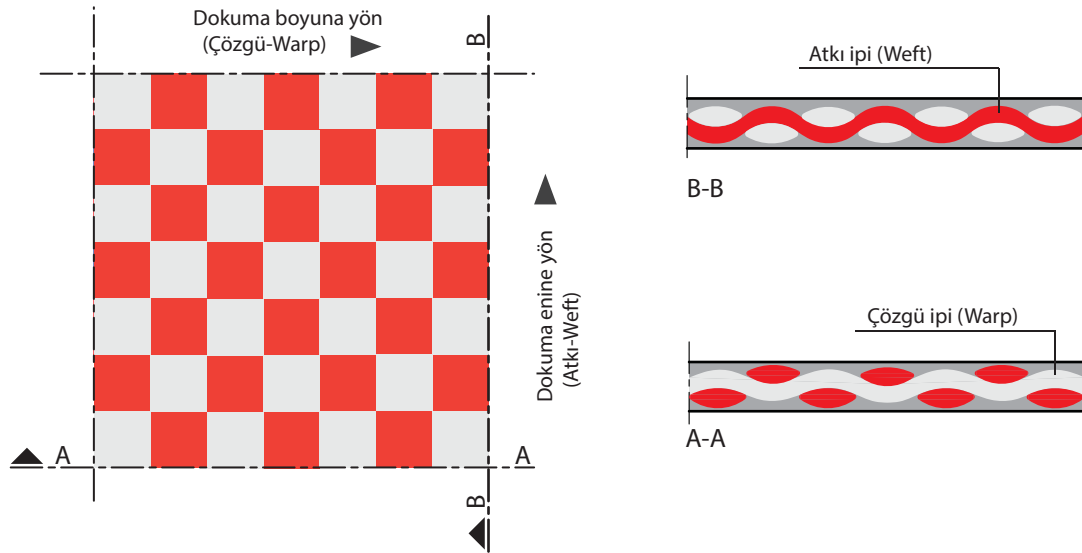
*Kaynak: European Design Guide for Tensile Surface Structures (2004)*

## 4. Membran

Taşıyıcı bir malzeme olarak membran dokunmuş, kompozit bir tekstil malzemedir. Türleri dokuma ve kaplama malzemesine bağlı olarak değişmektedir. PVC/PES Polyester ipliklerden oluşan dokuma üzerine yapılan PVC kaplama ve cam lifi (fiberglass) dokuma üzerine yapılan PTFE (Teflon) kaplama olmak üzere iki temel çeşidi vardır. PVC/PES membranların kullanımı çok daha yaygındır.

Dokumayı oluşturan iplikler atkı (weft) ve çözgü (warp) olarak birbirine 90 derece dik olarak iki yönlüdür. Çözgü yönü kumaş boyuna, atkı yönü ise kumaşın enine uzanan ipliklerden oluşur. Çözgü yönü dokuma esnasında sabit bir gerilim altında olduğu için daha doğrusaldır. Atkı yönündeki ipliklerse daha eğriseldir.\* Bu farklılık membran yapı sistemlerinin yapısal davranışını belirleyen bir unsurdur. Tasarım, analiz ve montaj süreçleri üzerinde bir dizi belirleyici etkiye sahiptir. Dokuma üzerine uygulanan kaplama malzemesi dokumayı dış etkilerden korumakta ve dokumaya stabilite kazandırmaktadır. Membranların su geçirmezliğini sağlayan kaplama malzemesidir. PVC/PES membranların bu kaplama sayesinde kaynaklanabilir olduğunu söyleyebiliriz. Polyester dokuma üzerine uygulanan PVC, PVDF (Polivinyliden Florit) ile kaplanarak membranın UV dayanımı, kir tutmama özelliği, atmosferik asit ve tuzullara karşı direnci sağlanır.

PVC/PES membranlar kopma mukavemetlerine göre 5 farklı tipte üretilmektedir.



Figür 13. Dokuma yönleri

(\* Precontraint dokuma teknolojisinde ipliklerin eğriselliği her iki yön içinde aynıdır .)