

## GİRİŞ

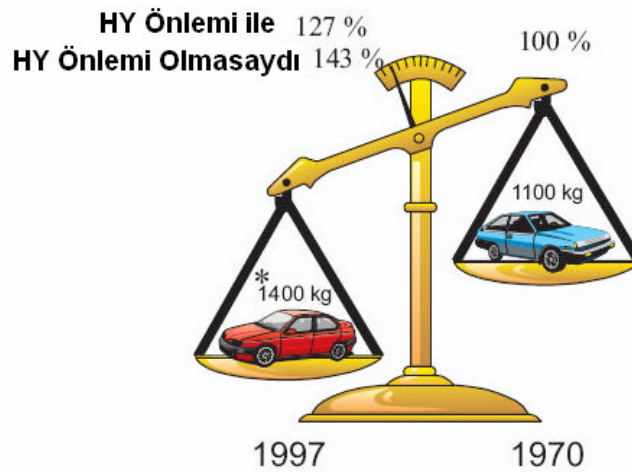
Son yıllarda makine ve taşıt imalatında şimdiki dek görülmemiş bir şekilde yenilik ve ekonomiklik tartışmaları ön plana çıkmıştır. Bundaki en önemli etkenlerden bazıları firmalar arasındaki rekabet ve dünya enerji kaynaklarının daha verimli kullanılabilmesi olmuştur. Genel amaç ise ürünü en kısa sürede, yüksek kalite ve düşük maliyette geliştirmektir. Bu amaçlar doğrultusunda yapılan çalışmalar esnasında Hafif Yapı kavramı ön plana çıkmış ve bu konu üzerindeki çalışmalar arttırılmıştır. Bu çalışmalarla beraber hafif yapı kavramı, malzemenin gerektiği kadar ve en uygun formda kullanılmasıyla optimum malzeme maliyetine ulaşma olarak tanımlanmış ve günümüzde anahtar bir konuma gelmiştir.

Hafif yapıyla ilgili çalışmalar, bu kavramın sadece bilinen uygun malzeme seçimi ve sonlu elemanlar yöntemi ile boyut kestirimi yaklaşımından ibaret olmadığını göstermiştir. Hafif yapı daha fazla anlam ifade etmektedir. Çok kapsamlı bir sistematik düşünce gerektirmekte ve bu yolla da alışılmışın dışında faydalar sağlamaktadır. Bu problem sadece hafif yapı malzemeleri kullanılarak çözülebilecek bir konu değildir. Çünkü hafif yapı malzemeleri birim ağırlıkta klasik çeliğe göre daha pahalıdır ve bu da düşük maliyet hedefi ile çelişmektedir. Dolayısıyla hafif yapı kavramının faydası çok fonksiyonlu hibrid çözümlerle imalat sürecinin tamamının düşünülmesine bağlıdır.

## 1. KURAMSAL TEMELLER

### 1.1. Hafif Yapılar Yaklaşımı

Günümüzde özellikle otomotiv, beyaz eşya ve inşaat sektörlerinin güncel konstrüksiyonlarında, yapı rijitliğinin aynı kalması (bazen daha da arttırılması) buna karşın toplam kütlenin azaltılması (aynı şekilde maliyetin de düşürülmesi) en önemli isteklerden biri haline gelmiştir. Bu istekler doğrultusunda yapılan çalışmalar sonucunda da hafif yapı kavramı ortaya çıkmıştır. Hafif yapı kavramıyla ilgili çalışmalar arttırıldıkça bu konunun sadece hafif malzemelerin kullanımından ibaret olmadığı ortaya çıkmıştır. Bir mühendislik disiplini olarak hafif yapı; malzeme, imalat, bağlama ve deneysel metodik teknolojilerin arakesitinde yer almıştır. Özellikle otomobil teknolojisinde; taşıtların ağırlıklarının düşürülmesi, ataletlerin azaltılması yolu ile yakıt tüketimlerinin düşürülmesi sonucu şehir trafiğinin çevreye yaptığı zararlı etkiler önemli oranda azaltılabilecektir. Bazen de –otomotiv sektöründe olduğu gibi- yapıya eklenen yeni fonksiyonlar nedeniyle oluşan kütle artışları, diğer elemanlar üzerinde alınan tedbirler sayesinde sağlanabilen kütle azalışları ile dengelenmeye çalışılmaktadır. Örneğin BMW 5 serisi bir otomobil 1970 yılında 1100 kg iken, eklenen özellikleri ile 1997’de 1400 kg’a ve 2003 yılında da 1600 kg’a ulaşmıştır. Ancak otomobil üzerinde, özellikle karoseri üzerinde alınan konstrüksiyonu hafifletme tedbirleri sayesinde otomobil üzerinde sağlanan kütle düşüşü 175 kg’dır. (Şekil 1.1)



Şekil 1.1 BMW 5 Serisi otomobilin farklı zamanlardaki ağırlığı (Klein 2005)

Ağırlık artışına sebep olan gelişmeler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

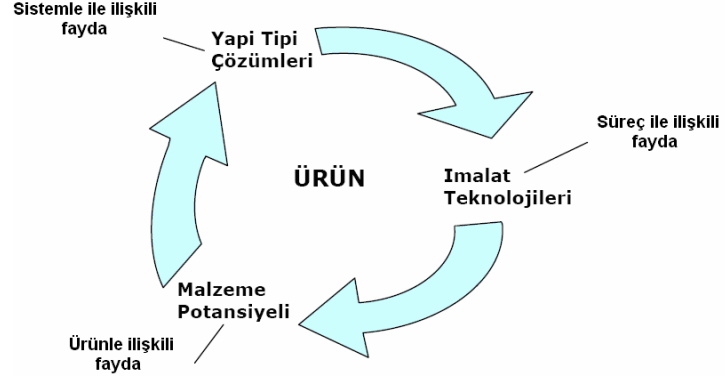
GELİŞTİRME	EK AĞIRLIK (KG)
İç ortam korumaları (airbag, emniyet kemeri)	30
Oturma konforu (baş dayanağı, koltuk, yaylar)	10
Çevre koruma (Motor elektroniği, katalizör)	5
Korozyon koruma	25
Ses ve titreşim konforu	35
Çarpma emniyeti	80
Yeni tasarım elemanları	20
Motor gücü artışı	90
5 vites mekanizma	15
Alt elemanlar	30
Isıtma, klima	25
Bord elektroniği	60
Doldurulan malzemeler (motor, yağ, yakıt)	30
Servo mekanizma	15
İletişim	5
Toplam Ek Yük	475
HY ile Kazanılan Kütle	175
Sonuç Ağırlık Artışı	300

Çizelge 1.1 Otomobildeki ağırlık artışları (Klein 2005)

Toplam ağırlıkta 100 kg’lık bir azalma 100 km’lik bir yolculukta 0,3-0,6 litre arasında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bu fayda özellikle şehir trafiğinde hızlanma ve frenleme esnasında görülmektedir. Hafif yapı yakıt tasarrufu sağladığı gibi yüksek yakıt sarfiyatında ortaya çıkan CO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılmasına da olumlu yönde katkıda bulunur. (Klein 2005)

HY yaklasimi sadece “malzeme” konusu üzerine kurulup gerçekleştirilemez. Bu nedenle karar verilirken, bir sistem yaklasimi içerisinde imalat maliyetleri de dikkate

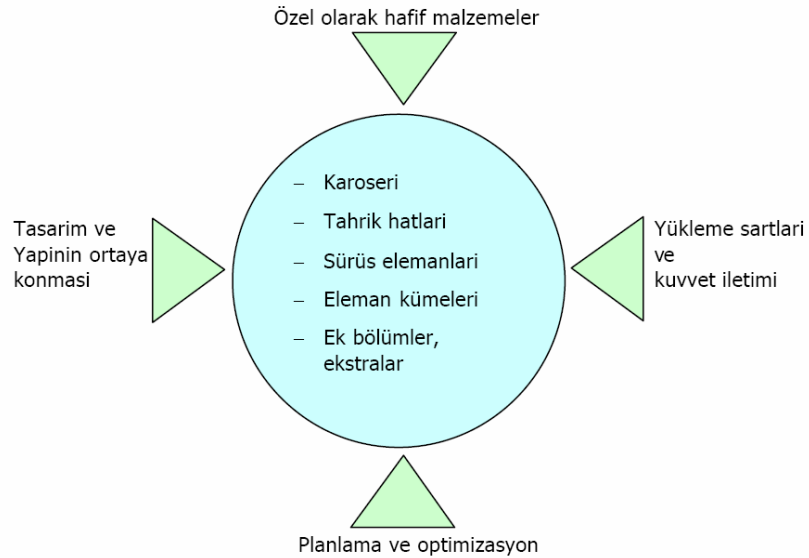
alınarak malzeme seçimi yapılmalıdır. Burada anahtar konular “toplam ekonomiklik” ve “daha çok fayda” olmalı ve bunlara bakılmalıdır. (Şekil 1.2)



Şekil 1.2 Toplam ekonomiklik ve daha çok fayda (Klein 2005)

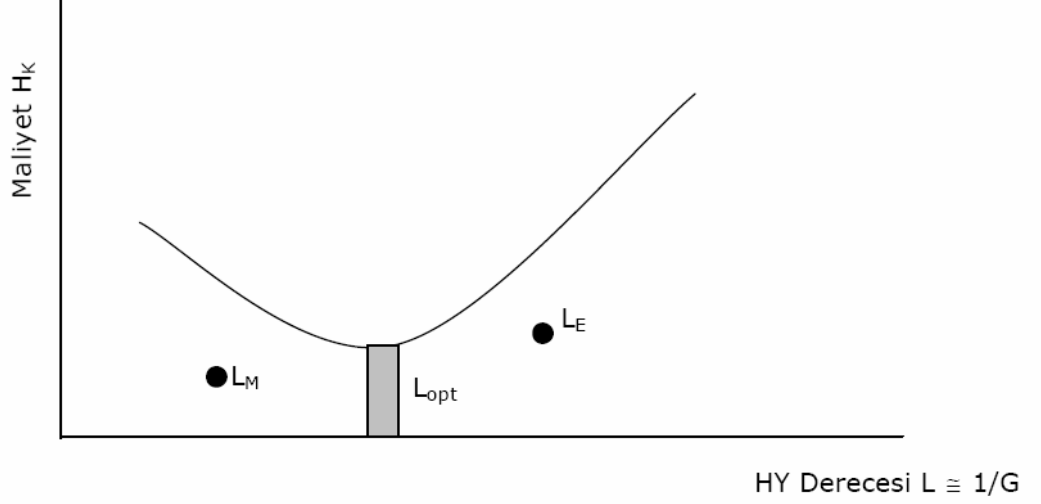
Hafif yapı her ne kadar çok kompleks bir mühendislik disiplini olarak tarif edildiyse de temelde; hafif yapı malzemeleri ile şekilsel düzenlemeler (çeşitli form ve imalat yöntemleri) ana başlıkları altında incelenmiş ve özellikle hafif yapının otomotiv sektöründeki uygulamaları üzerinde durulmuştur.

Şekil 1.3 de potansiyel kütle azaltma önlemlerini göstermektedir.



Şekil 1.3 Otomobillerde HY Potansiyeli (Klein 2005)

Hafif yapılarda kullanılan özel olarak imal edilmiş hafif malzemeler klasik malzemelere göre daha pahalıdır. Ancak tüm imalat, tasarım ve malzeme süreci düşünüldüğünde maliyet ile hafif yapı arasında Şekil 1.4 deki gibi bir ilişki vardır.



Şekil 1.4 Maliyet ile hafif yapı arasındaki ilişki (Klein 2005)

Burada;

$L_{opt}$ : Maliyeti uygun şekilde optimize edilmiş HY tasarımı

$L_E$ : Yüksek malzeme ve imalat maliyetleri olan yüksek seviyede HY tasarımı

$L_M$ : Daha çok malzemeye dayanan normal makine imalatı

olarak tanımlanmıştır.

Şekil 1.4 de gösterilen sınırlamalarla beraber hafif yapı tasarımında dikkat edilmesi gereken kriterler şu şekildedir. (Klein 2005)

- Ağırlıkla ilgili isteklerin karşılanması (yapı ağırlığının minimizasyonu)
- Fonksiyonun gerçekleştirilmesi (şekil değiştirme bağıntıları)
- Emniyetin gerçekleştirilmesi (kısa ve uzun çalışma şartları)
- İyi çalıştırılabilirlik
- Kabul edilebilir imalat maliyetleri
- Düşük bakım maliyetleri

## 1.2. Makine Elemanlarında Rijitlik ve Şekil Değiştirme Hesapları

Mukavemet, yük etkisi altındaki cisimlerin gerilme ve şekil değiştirme durumlarının, iç davranışlarının incelendiği uygulamalı mekaniğin bir dalıdır. Buradaki cisim kelimesiyle çubuklar, plak ve kabuklar, kolon ve miller ile bu elemanların birleştirilmesiyle oluşan yapı ve makineler kastedilmektedir. Cisimlerin dayanımı veya şekil değiştiren cisimler mekaniği olarak da adlandırılan malzeme mekaniğinde öncelikle gerilme analizi ve cisimlerin mekanik özellikleri incelenir.

Mukavemette temel amaç, cisimlerin yük taşıma kapasitelerinin dayanım, rijitlik ve stabilite bakımlarından araştırılmasıdır. Sözü edilen kavramlarla bir cismin sırasıyla sürekli şekil değiştirme veya kırılmaya karşı direnci, şekil değiştirme direnci ve cismin denge konumunun kararlılığı kastedilmektedir. Gerçek yapılardaki karmaşık gerilme durumunu deneysel olarak tespit edilen eksenel gerilmeye bağlayan kırılma teorilerinin vereceği gerilme düzeyi, bazen dayanım için bir ölçü olarak kullanılır. Göçme veya kırılma en genel anlamıyla yapının herhangi bir parçasının kendisinden beklenen işlevi yerine getirememesi olarak tanımlanacaktır.

Örneğin eleman şeklindeki kalıcı deformasyon, denge konumundaki değişiklik ve yapı elemanın kullanımına engel olacak şekil değişimleri bizim için ayrı bir göçme tipi oluşturur. (Sarioğlu ve ark. 2007)

Mukavemetin başlıca uğraşı alanları şöyle özetlenebilir.

- 1- Yük etkisindeki cisimlerde gerilme ve şekil değiştirme durumunun araştırılması
- 2- Yapıların hasar görmeden ve/veya göçmeden ve kendisinden beklenen işlevi kaybetmeden taşıyabileceği en büyük yükün analiz ya da deneyle bulunması
- 3- Belirli şartlar altında tanımlanmış yüklere karşı en etkin şekilde direnebilecek malzeme ve eleman şeklinin belirlenmesi (boyutlandırma)

### 1.2.1. Tasarımda Başlıca Adımlar

Tasarımın ana amacı, yapı elemanlarının verilen yükleri göçmeksizin taşıyabileceği ve kendisinden beklenen işlevleri yerine getirebileceği uygun malzeme, eleman şekil ve boyutlarının belirlenmesidir. Bu aslında bir optimizasyon problemdir. Yukarıda sözü

edilen amaçlara ulaşmadaki etkinlik kullanılan malzeme ve yapım maliyetinin minimum yapılmasıyla başarılır. Yük etkisindeki bir elemanın tasarımında aşağıdaki hususlar göz önüne alınmalıdır.

1. Elemanın kendisinden beklenen işlevleri hangi durum(lar)da kaybedeceği belirlenmelidir.
2. Verilen yüklemenden oluşacak gerilme ve birim şekil değiştirme durumu tespit edilmelidir.
3. Gerilme ve birim şekil değiştirme gibi önemli büyüklüklerin elemanda göçme oluşturmaksızın alabileceği en büyük değerleri belirlenmelidir.
4. Güvenlik katsayıları seçilmelidir.

Yukarıdaki işlem adımları, verilen problemin yapısına bağlı olarak uzayıp kısalabilir. Pek çok etkinin dikkate alınması söz konusu olduğunda çoğunlukla bir deneme-yanılma işlemiyle tasarım sonuçlandırılır.

Mühendislikte yük etkisi altında bulunan bir elemanın davranışını tanımlamakta iki kavram kullanılmaktadır. Bunlardan biri gerilme bir diğeri ise birim şekil değiştirmedir. Bu tez çalışmasında da analizlerde deformasyon ön planda olduğu için birim şekil değiştirme ile ilgili detaylı bilgi verilecektir. (Sarıoğlu ve ark. 2007)

### 1.2.2. Birim Şekil Değiştirme

Şekil değiştirme veya deformasyon analizi, birim şekil değiştirmelerin tanımları ile başlar. Birim şekil değiştirmeler deformasyonun şiddetinin ölçülmesinde kullanılır.

Dış kuvvetlerin etkisi altında bulunan bir cismin her noktası yer değiştirir. Herhangi bir noktanın yer değiştirmesi; şekil değiştirmeden ya da rijit cisim hareketlerinden (ötelenme ve dönme) veya bu iki etkinin bileşiminden meydana gelir. Cisim içindeki noktaların birbirlerine göre olan konumlarında bir değişme varsa cisim şekil değiştirmiştir denir. Herhangi iki nokta arasındaki uzaklık ya da herhangi üç nokta arasındaki açı değişmiyorsa yer değiştirmenin sebebi rijit cisim hareketleri olabilir.

Şekil değiştirme sonucu cismin hacminde ya da biçiminde değişme olabilir. Bir yapı elemanındaki gerçek gerilme yayılışının belirlenmesinde bu yapı elemanındaki şekil değiştirmenin dikkate alınması gerekir. Dış yükler ve sıcaklık tesiri etkisindeki hiperstatik yapıların analizinde şekil değişimi kullanılarak hiperstatik kuvvetlerin hesaplanması için gereken ilave denklemler sağlanır.

Toplam aksenal şekil değiştirme  $d$  ile gösterilecektir. Cisim içerisindeki herhangi bir noktada  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri yönündeki yer değiştirme bileşenleri  $u$ ,  $v$  ve  $w$  ile tanımlanacaktır. Birim şekil değiştirmeleri 1'in yanında küçük, çarpımlarıyla karelerini ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edilmektedir.

Normal birim şekil değiştirme prizmatik bir çubuk üzerinde tanımlanacaktır.

Birim boydaki uzunluk değişimi: Uzama oranı

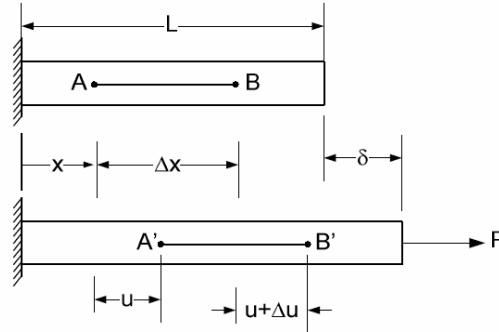
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

$\delta$  : P yükü uygulandıktan sonra çubuk boyundaki toplam uzama

L: Çubuk başlağıç boyu

$\varepsilon > 0$  Uzama  $\rightarrow$  Birimsiz

$\varepsilon < 0$  Kısalma  $\rightarrow$  Birimsiz



Şekil 1.5 Normal birim şekil değiştirme (Sarıoğlu ve ark. 2007)

Kayma şekil değiştirmesi, baslangıçta dik olan iki doğru arasındaki açının şekil değiştirme sonrası diklikten saptığı değerin tanjantına denir. Açı küçük olduğundan tanjantı yerine radyan cinsinden kendisi yazılabilir.

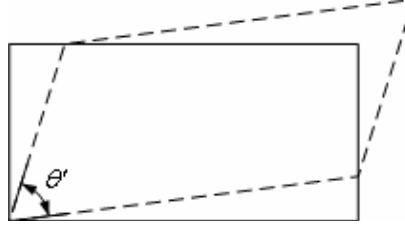


$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta'$$

$\gamma > 0$  Dik açı küçülür  $\rightarrow$  Birimsiz

$\gamma < 0$  Dik açı büyür  $\rightarrow$  Birimsiz

Elastik bölgede şekil değiştirmeler 0.002 veya 2000  $\mu$  değerlerini pek aşmaz.



Şekil 1.6 Kayma şekil değiştirmesi (Sarioğlu ve ark. 2007)

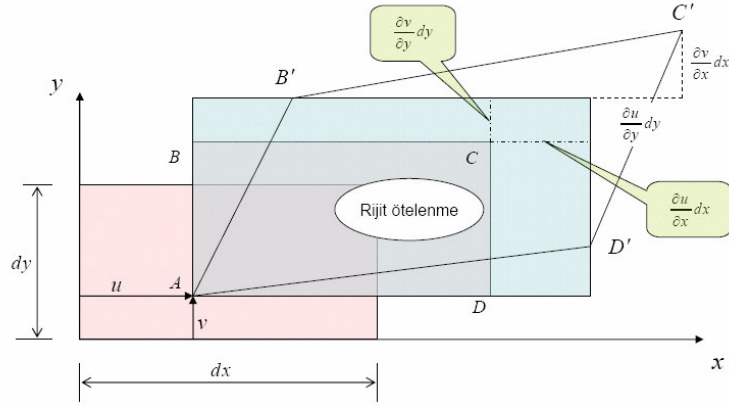
Uzunluk ve açıdaki değişimler uniform ise yukarıda verilen iki formül yeterli hassasiyette sonuç verir. Uniform olmayan bir şekil değiştirme söz konusu ise bir noktadaki birim şekil değiştirmelerin tanımlanması gerekir.

Üniform şekil değiştirme yoksa birim şekil değiştirme cismin içinde noktadan noktaya değişir. Daha önce yazdığımız bağıntıların  $\Delta x$  uzunluğundaki bir AB doğru parçası ile ilgili olması gerekir. Eksenel kuvvet altında doğru parçasının uçları  $u$  ve  $u + \Delta u$  yer değiştirmelerini yaparak  $A'$  ve  $B'$  noktalarına gelir. Yani doğru parçasının boyunda  $\Delta u$  kadarlık bir uzama gerçekleşir. Tanım gereği normal şekil değiştirme;

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \text{ olur.}$$

Burada limitin anlamı düşünülürse  $\Delta x$  sifıra giderken yalnızca  $A$  noktasında  $x$  doğrultusundaki uzama ifade edilmektedir.

Düzlem veya iki eksenli şekil değiştirme durumunda yükleme öncesi ve sonrası cisim içindeki her nokta yine aynı düzlem içinde kalır. Bu durumda birim kalınlıklı  $dx$  ve  $dy$  boyutlu bir eleman doğrusal ve açısal şekil değiştirme yapabilecektir. (Sarioğlu ve ark. 2007)



Şekil 1.7 Doğrusal ve açısal şekil değiştirme (Sarioğlu ve ark. 2007)

Düzlem elemanın doğrusal şekil değiştirmeleri;

$$\varepsilon_x = \frac{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\left(dy + \frac{\partial v}{\partial y} dy\right) - dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

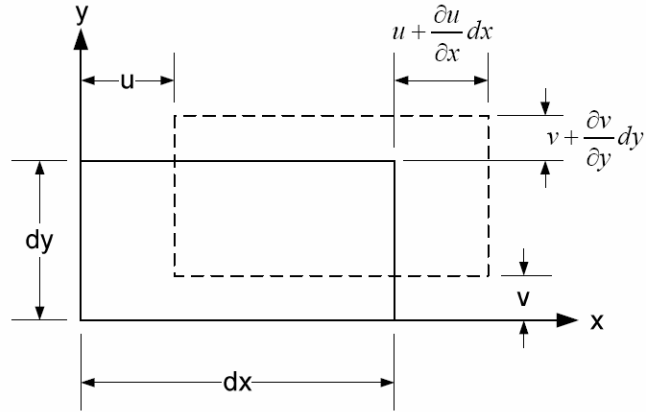
Düzlem elemanın açısal şekil değiştirmeleri;

$$\gamma_{xy} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{\left(dy + \frac{\partial v}{\partial y} dy\right)} + \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{(1 + \varepsilon_y) dy} + \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{(1 + \varepsilon_x) dx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Bir düzlem elemanın doğrusal şekil değiştirmeleri;

$$\varepsilon_x = \frac{\left(dx + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u\right) - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

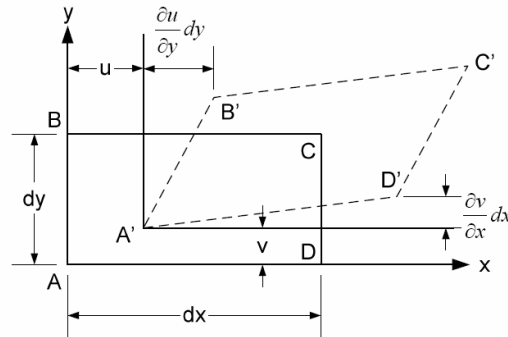
$$\varepsilon_y = \frac{\left(dy + v + \frac{\partial v}{\partial y} dy - v\right) - dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$



Şekil 1.8 Düzlem elemanın doğrusal şekil değişimi (Sarioğlu ve ark. 2007)

Bir düzlem elemanın açılal (kayma) şekil değişimi

$$\gamma_{xy} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{\left(dy + v + \frac{\partial v}{\partial y} dy\right) - v} + \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{\left(dx + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) - u} = \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{(1 + \epsilon_y) dy} + \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{(1 + \epsilon_x) dx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$



Şekil 1.9 Kayma şekil değişimi (Sarioğlu ve ark. 2007)

Örneğin  $u$ 'nun  $y$  eksenine doğrultusundaki değişimi (hızı)  $\frac{\partial u}{\partial y}$ ,

$u$ 'daki artış ise  $\frac{\partial u}{\partial y} dy$  dir. Burada  $\frac{\partial u}{\partial y}$  sonsuz küçük elemanın başlangıçta düşey

olan kenarının eğimi olur.

u ve v, x ve y'nin fonksiyonu olduklarından kısmi türev gösterimi (notasyonu) kullanılmaktadır. Benzer şekilde yatay kenar da  $\frac{\partial v}{\partial x}$  açısı yapacak şekilde yükselir.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Kenarları dx, dy ve dz olan bir prizmatik elemanın içindeki bir noktadaki şekil değiştirmeler benzer şekilde elde edilir.

Üç boyutlu şekil değiştirme bileşenleri;

$$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \text{ olur.}$$

Bulunan 6 adet şekil değiştirme bileşeni tıpkı gerilme haline benzer bir simetrik tansör oluşturur.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

Eğer bir noktadaki şekil değiştirme halini anlatan 6 bağımsız şekil değiştirme bileşeni biliniyorsa, prizmanın boyutlarındaki ve şeklindeki değişimi tam olarak belirleyebiliriz.

6 birim şekil değiştirme bileşeni eksenler doğrultusundaki yer değiştirme fonksiyonlarına türevlerle bağlıdır. Dolayısıyla bu büyüklükler birbirlerinden bağımsız olamazlar.  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$  ve  $\gamma_{xz}$ 'nin sağlaması gereken 6 adet ifadeye *uygunluk* denklemleri denir. İki boyutlu problemlerde yalnızca 1 adet uygunluk denklemi vardır. Uygunluk denklemleri şekil değiştirmenin sürekli olduğunu cismin içinde kütle kaybı (boşluk) olmayacağını gösterir. (Sarioğlu ve ark. 2007)

Düzlem hali için uygunluk denklemi;

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}$$

### 1.3. Hafif ve Yüksek Mukavemetli Malzeme Teknolojileri

Polimer bazlı kompozitler, mühendislik plastikleri ve ileri seramiklerin hafiflik, dayanım ve düşük maliyette üretim gibi avantajları nedeniyle, demir, alüminyum, nikel, kurşun, çinko, bakır ve kalay gibi geleneksel metalik malzemelerin dünya kullanımlarında, 1980'li yıllardan itibaren sürekli düşüşler kaydedilmektedir. Ancak, bu düşüşü durdurarak metalik malzemelerin rekabet gücünü artırmak amacıyla geliştirilen çağdaş üretim süreç teknolojileri sayesinde, bu malzemelerin geleneksel standart özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde önemli atılımlar kaydedilmiştir. Bu atılımların en önemlileri hafif ve yüksek mukavemetli metal ve alaşımlarda gözlenmektedir. Son yıllarda giderek artan çevre duyarlılığı ile ekolojik dengeyi bozan atık gazları ve yakıt tüketimini azaltacak teknolojileri geliştirme zorunluluğu, otomobil üreticilerini yeni arayışlara yöneltmiştir. Kyoto Protokolüne göre bir binek otomobilinin CO<sub>2</sub> emisyonları, 2008 yılına kadar %25 oranında azaltılarak, 140 g/km seviyelerine düşürülmek durumundadır (bugünkü seviyesi 186 g/km). Bunu sağlamak için yapılabilecekler üç grupta toplanabilir:

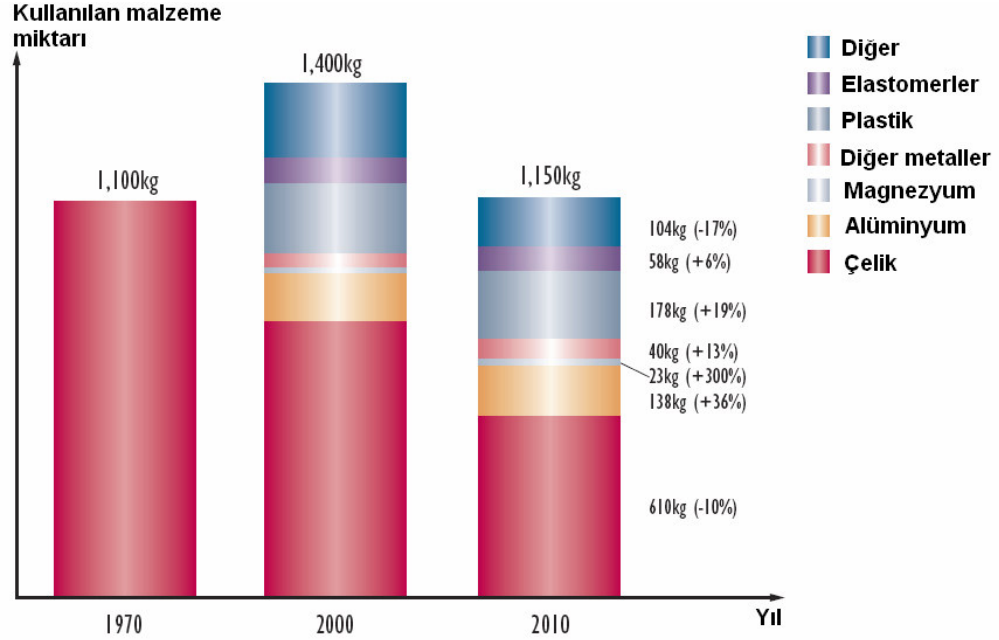
- Tahrik mekanizmasının iyileştirilmesi (hibrid-motor sistemler, dizel motorlarda direkt enjeksiyon, motor ve çalıştırma mekanizmalarının optimizasyonu v.b),
- Uygun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerde malzeme seçenekleri geliştirilerek konstrüksiyonların hafifleştirilmesi ve taşıt ölü ağırlıklarının azaltılması,
- Taşıtların aerodinamik yapılarının ve yeni imalat tekniklerinin geliştirilmesi.

Daha az yakıt tüketecek, çevre-dostu bir otomobil daha hafif olmalıdır. Çünkü taşıt toplam ağırlığındaki her % 10'luk azalma % 5–10 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Tasarım değişiklikleri dışında bunu sağlayabilmenin tek yolu, otomobil imalatında daha hafif malzemeler kullanmaktır. Güvenlikten ödün vermeden, konfordan vazgeçmeden, daha az yakıt tüketen otomobiller için daha hafif, fakat daha

mukavemetli malzemelere duyulan gereksinim, otomotiv uygulamaları için malzeme üreten firmalar arasında büyük bir rekabete yol açmıştır.

Günümüzün çağdaş teknikleri malzeme bilimcilerin, malzeme içyapısına atomik düzeylerde bile müdahale edebilmelerini sağlamaktadır. Böylece malzeme kristal düzlemlerindeki hata ve dislokasyonların rollerinin daha iyi anlaşılması mümkün olabilmekte ve buna bağlı olarak özel niteliklere sahip alaşımlar geliştirilebilmektedir. Bu sayede metalik malzemelerin tokluk, düşük kırılgenlik, hafiflik ve yüksek sıcaklık korozyon özelliklerinde önemli atılımlar gerçekleşmekte ve sürekli olarak üstün performanslı yeni metalik malzemeler kullanıma sunulmaktadır. Ayrıca, var olan metalik malzemelerin hafiflik, mukavemet ve yüksek sıcaklık dayanımlarında da yapısal kontrol ve modifikasyon yoluyla büyük gelişmeler kaydedilmektedir. Son yıllarda bu kapsamda, titanyum, magnezyum ve alüminyum gibi “hafif alaşım” olarak da bilinen metal ve alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar dikkati çekmektedir. Tipik olarak geleneksel malzemeler sınıfında olan bu malzemelerin endüstriyel pazarlarda doyum noktasına ulaşmaları, maliyetler ve diğer malzemelerin rekabeti nedenleriyle, bu alanda da özellikle süreç teknolojileri açısından önemli gelişmeler yaşanmıştır. Alüminyum alaşımlarının otomotiv sektöründe daha fazla kullanım alanı bulması, bu gelişmelerin bir sonucudur. Alüminyumdan daha hafif olması nedeniyle, magnezyum alaşımları, otomotiv sektöründe önemle üzerinde durulan diğer bir konudur. Ayrıca, geliştirilen son derece düşük yoğunluktaki alüminyum-lityum alaşımlarının uçak sanayisinde kullanılması önemli açılımlar sağlamıştır. (Baykara ve ark. 2004)

Şekil 1.10 da orta büyüklükteki bir otomobilde kullanılan malzemelerin 1970’lerden 2010’lara kadar olan gelişimini göstermektedir. Buradan da hafif malzemelerin çelik gibi ağır malzemelerin yerini aldığı kolayca anlaşılmaktadır. En fazla artma miktarı plastik, alüminyum ve magnezyum alaşımlarında görülmektedir. Bu malzemelerin kullanımı da araç kütlesini yaklaşık %20 azaltmıştır. (Wallentowitz ve ark. 2003)

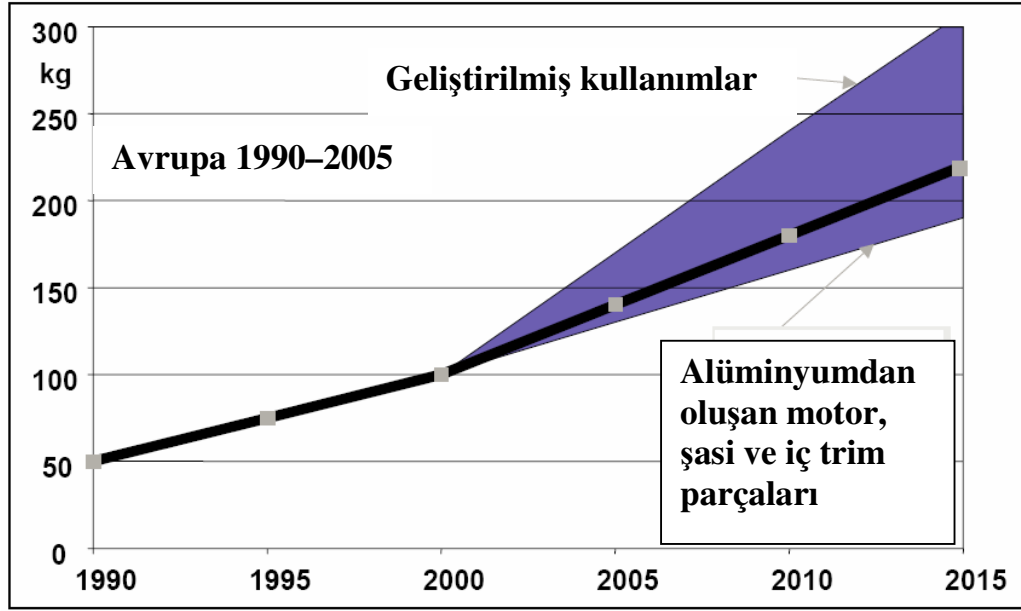


Şekil 1.10 Orta büyüklükteki bir araçta kullanılan malzemelerin yıllara göre değişimi (Wallentowitz ve ark. 2003)

Otomobillerde kullanılan hafif ve yüksek mukavemetli malzemeler kapsamında alüminyum alaşımları, kompozit malzemeler, magnezyum alaşımları ve gelişmiş çelik uygulamaları ile ilgili daha detaylı bilgiler verilmiştir.

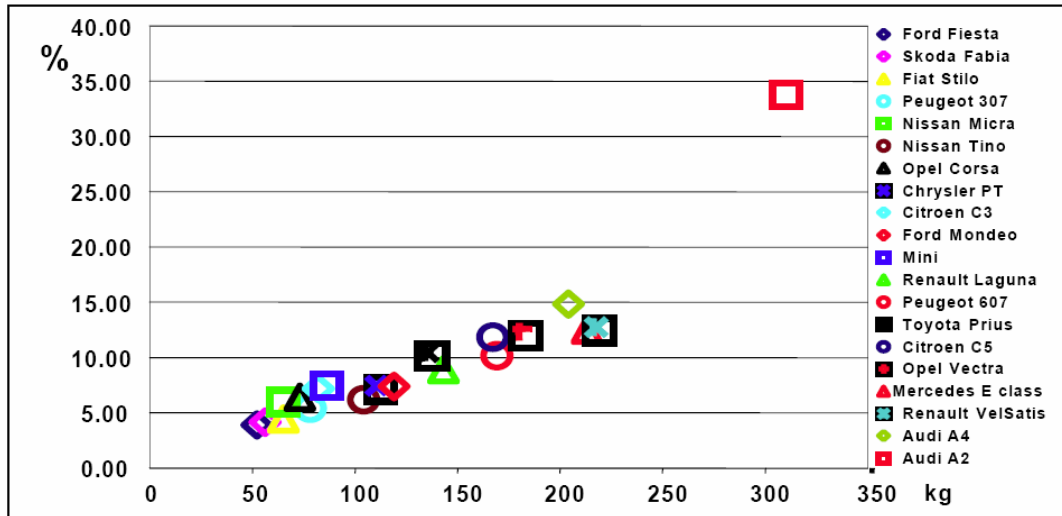
### 1.3.1. Alüminyum Alaşımları

Yoğunluğunun düşük olması, kolay şekil verilebilmesi ve yüksek korozyon dayanımından dolayı alüminyum alaşımları şasi, otomobil gövdesi ve birçok yapısal parçanın kullanımında tercih edilen bir malzeme olmuştur. Özellikle son 20-30 yılda yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunun ekonomik ve politik nedenlerden dolayı azaltılmasının istenmesi sonucu alüminyum alaşımları üzerindeki çalışmalar arttırılmıştır. Son on yıldan beri bir otomobil başına alüminyum alaşımlarının kullanım miktarı iki kattan daha fazla artmıştır. (Şekil 1.11) 2000 yılında bir otomobilde ortalama 102 kg alüminyum alaşımı (59 kg motor, 6 kg şasi, 5 kg gövde ve 11 kg yapısal parçalar 21 kg diğer) kullanılmaktadır. Bugünkü çalışmalara ve yeni otomobillerin modelleri dikkate alındığında önümüzdeki 10 yılda da otomobil başına alüminyum alaşımlarının kullanım miktarının iki katından daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. (Hirsch 2004)



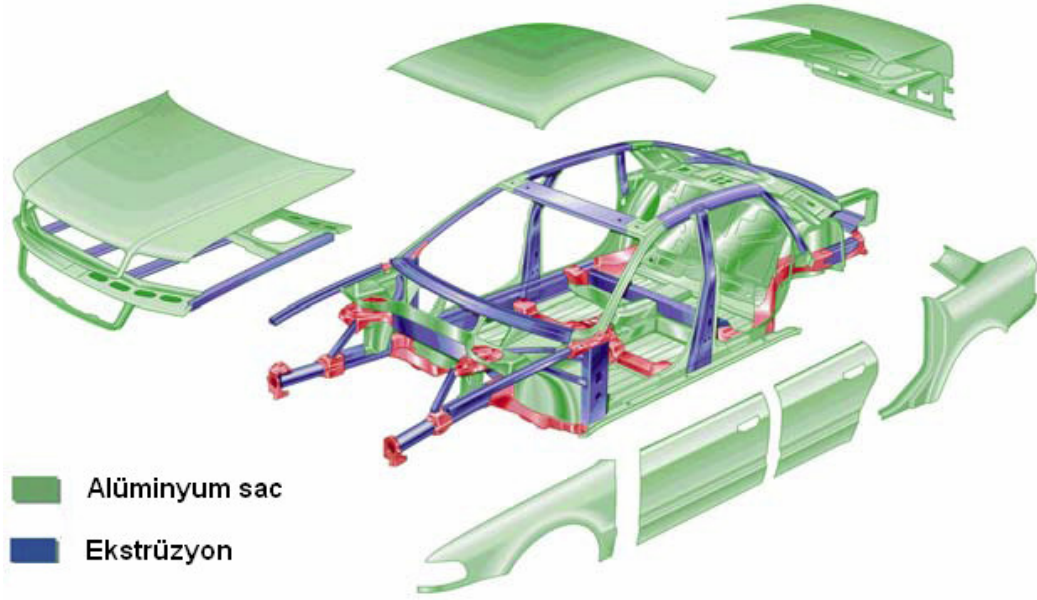
Şekil 1.11 Araç başına kullanılan ortalama alüminyum alaşımları miktarı (Hirsch 2004)

Günümüzde orta ve küçük boyutlu araçlarda alüminyum alaşımlarının kullanım miktarı 50 ile 200 kg arasında değişmesine rağmen Audi A2 ve A8 gibi otomobillerde bu rakam 300 kg'yi geçmiştir. (Şekil 1.12) Audi A8 aracında geliştirilmiş olan iskelet yapı ve kullanılan alüminyum alaşımı parçalar Şekil 1.13 de gösterilmektedir.



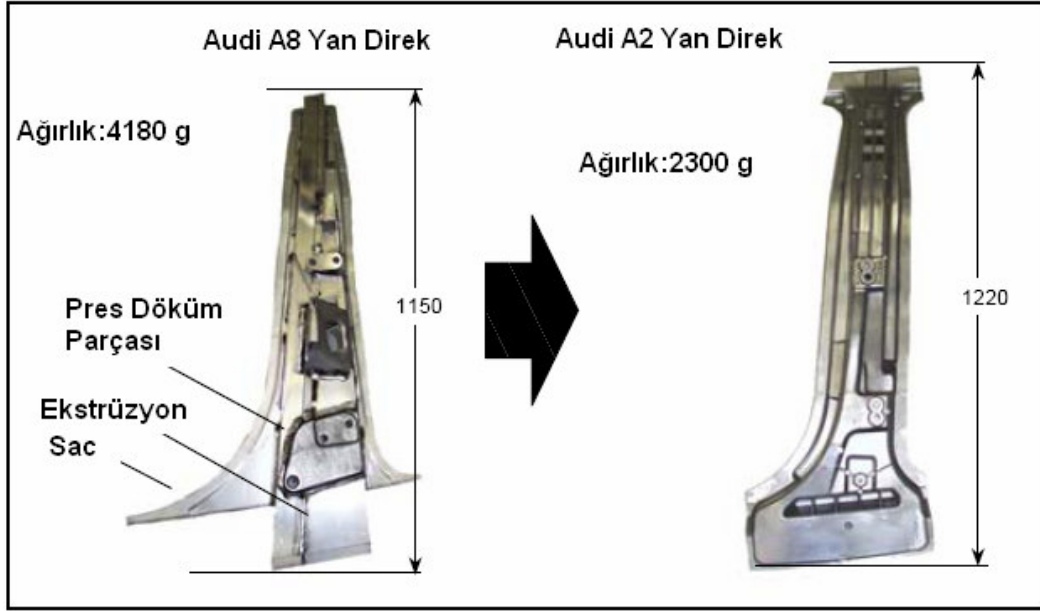
Şekil 1.12 Bazı araçlarda kullanılan alüminyum alaşımı miktarı (Hirsch 2004)





Şekil 1.13 Audi A8 İskelet yapısı ve alüminyum alaşımından oluşan parçaları  
(Hirsch 2004)

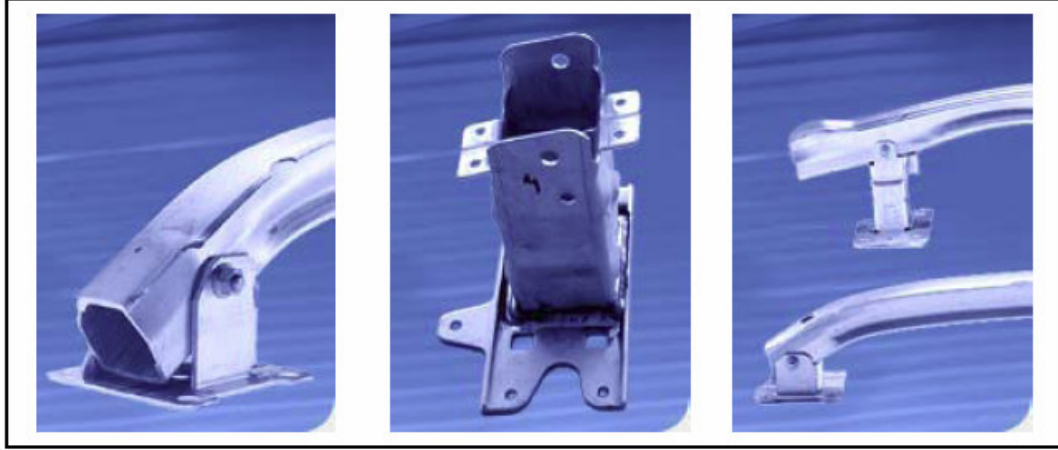
Motor bloğu, silindir başlığı ve şasi parçaları gibi alüminyum alaşımından oluşan büyük hacimli parçalar dökümdür. Alüminyumun otomobil parçalarında istenen teknik özellikleri karşılaması alaşım ve fonksiyonel birleştirme tekniklerindeki gelişmeler sayesinde olmuştur. Alüminyum alaşımli dökümler iskelet yapı, aks parçaları ve yapısal bileşenler gibi faaliyet alanlarında yenilikçi uygulamalar olarak kabul görmüşlerdir. Kompleks alüminyum alaşımli parçalar özel döküm metotlarıyla optimum mekanik özelliklere ve fonksiyonel birleştirme tekniklerine uygun olacak şekilde üretilebilmektedirler. Şekil 1.14 de görünen parçalar tek başlarına daha pahalı olmalarına rağmen, tüm komponent düşünüldüğünde daha ekonomiktir. Bunun sebebi komponentin tek parça halinde üretilerek birleştirme maliyetlerinin ortadan kaldırılmış olmasıdır. Bunun yanında parça neredeyse yarı yarıya hafiflemiştir.



Şekil 1.14 Alüminyum pres döküm birleştirme (Hirsch 2004)

Alüminyumun kullanımında bir diğer geniş alan ekstrüzyondur. Şekil 1.15 de Ekstrüzyon yöntemiyle ve hafif tasarım bakış açısıyla üretilmiş kompleks parçalar görülmektedir. Ekstrüzyon yönteminin en büyük avantajı kompleks parça üretimine imkân tanınması, fonksiyonel birleştirmeye uygun olması ve kullanımının ekonomik olmasıdır.

Otomotiv sac uygulamalarında kullanılan temel alüminyum alaşımları Al-Mg (5xxx serisi) ve Al-Mg-Si (6xxx serisi) dir. Al-Mg alaşımları mukavemet ve korozyon direncinden dolayı şasi, Al-Mg-Si alaşımları ise kolay şekil verilebilirliği ve yüzey görünümünden dolayı otomobil dış yüzeyinde daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar. (Hirsch 2004)



Şekil 1.15 Tamponda kullanılan ekstrüzyonla üretilmiş parçalar (Hirsch 2004)

### 1.3.2. Alüminyum Köpükler

Metalik köpükler sıra dışı olarak gösterdikleri fiziksel ve mekanik özelliklerden dolayı birçok mühendislik uygulamalarında kullanılır hale gelmişleridir. Örneğin sandviç panellerde kullanılan metalik köpükler yapıya hafifliğin yanında yüksek mukavemet de kazandırmıştır. Metalik köpükleri çekici yapan özellikleri hafif konstrüksiyon kavramının önemli olduğu, enerji absorpsiyonunun ve akustik / termal kontrolün istendiği yerlerde kullanılabilmesidir. Bu sayılan alanların hemen hepsi de otomotiv sektöründe mevcuttur. Diğer potansiyel kullanım alanları ise gemi imalatı ve uzay sanayidir. Metalik köpüklerin en önemli özelliklerinden aşağıda birkaç cümle ile bahsedilmiştir.

*Hafif konstrüksiyon:* Metalik köpükler mühendislik uygulamalarında spesifik olarak yüksek eğilme rijitliğinden dolayı ağırlığın önemli olduğu yerlerde kullanılabilir.

*Enerji Absorpsiyonu:* Malzemede oluşan gerilme parçanın sıkıştırma limitleri dâhilinde kaldığı sürece, yapıdaki poroziteden dolayı köpükler deformasyon esnasında büyük miktarlarda enerji absorbe edebilmektedirler.

*Akustik ve Termal Kontrol:* Metalik köpükler altında titreşim absorbe edebilmektedirler. Termal iletkenlikleri ise düşüktür. Bu bahsedilen özellikler mühendislik anlamında çok

fazla göze çarpan özellikler olmamasına rağmen, köpüklerin diğer parçalarla beraber olan kombinasyonu ortaya iyi sonuçlar çıkarmaktadır. (Baron 2001)

### 1.3.3. Kompozit Malzemeler

Polimer kompozit malzemeler yaklaşık son 20 yıldır otomotiv endüstrisinin bir parçası haline gelmişlerdir. Günümüz otomobillerinde ortalama olarak %8 oranında plastik ve kompozit malzeme bulunmaktadır. Kapı panelleri, süspansiyon, kontrol ve fren sistemleri bu tür malzemelerin kullanılabilirdiği yerlere örneklerdir. Günümüz otomotiv uygulamalarında cam fiber termoset kompozitleri daha yaygın olarak kullanılmakla beraber, termoplastik kompozitler ve karbon fiber takviyeli termosetler de bu sektör için potansiyel kullanılacak malzemeler haline gelmişlerdir. Genel olarak hafif ve mukavim olması sebebiyle karbon fiber malzemeler cam fiber kompozitlerine alternatif duruma gelmişlerdir. (Das 2001)

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır. Kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabilecektir. (Anonim)

*Yüksek Mukavemet:* Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.

*Kolay Şekillendirebilme:* Büyük ve kompleks parçalar tek işlemle bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

*Elektriksel Özellikler:* Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

*Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet:* Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

*Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:* Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

*Kalıcı Renklendirme:* Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

*Titreşim Sönümlendirme:* Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.

- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözebilecek bir malzemedir. (Anonim)

#### 1.3.4. Magnezyum Alaşımları

Günümüzde konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde magnezyum en hafif olanıdır. Yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Ayrıca magnezyum alaşımları mühendislik plastiklerine göre çok daha katı ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir. Magnezyumun yoğunluğu alüminyuma göre %33, demir ve çeliğe göre %75 daha düşüktür.

Düşük ağırlık kadar önemli olan geri dönüşebilirlik dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için malzeme seçiminde etken bir faktör haline gelmiştir. Avrupa komisyonu Avrupa otomobillerde kullanılacak malzemelerin 2003 yılına kadar % 85, 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzemelerden üretilme hedefleri getirirken Japonya'da yeni otomobillerde 2002 yılına kadar % 90, 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzeme kullanımı zorunlu hale getirilmiştir.

Magnezyum alaşımlarının kullanımını sınırlayıcı önemli faktör olan korozyon özellikleri, yüksek saflıkta üretilen alaşımlarla iyileştirilmekte, bugün magnezyum alaşımları korozyon dayanımı bakımından alüminyum alaşımları ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca magnezyum alaşımları işlenebilirlik bakımından da alüminyum alaşımlarına göre önemli avantajlar sunmaktadır. Düşük yoğunluk ve ergitme sıcaklığı diğer alternatif metallere göre dökümde ve talaşlı imalatta önemli

kolaylıklar sağlamaktadır. Magnezyumun lityum elementi ile yaptığı alaşım süper hafif bir alaşımdır ( $1,3 \text{ gr/cm}^3$ ). Lityum alkali metal grubundandır ve yoğunluğu  $0.534 \text{ gr/cm}^3$  dür. Bu kadar düşük yoğunluğa rağmen lityum içeren Mg ve Al alaşımlarının spesifik elastisite modülü çeliğe göre daha yüksektir.

Bugün hafif araba ve kamyonlara bakıldığında magnezyum alaşımlarının kullanımının çok az olduğu görülür. ABD’de araç başına magnezyum alaşımlarının kullanımı ortalama olarak 0,9 kg civarındadır. Magnezyum alaşımları endüstrisi araç ağırlığında, fiyatta ve/veya komplekslikteki azalmanın yararlarını otomotiv endüstrisine anlatmaya çalışmaktadır. Bu endüstrinin birincil odaklandığı nokta otomobil dizaynlarına parça magnezyum alaşımlarının sokulmasını sağlamak şeklindedir. Bir otomobil üretiminde ağırlıktan azalmayı sağlayacak sistemler beş ana grupta toplanabilir,

- 1) Gövde,
- 2) Motor,
- 3) Elektrik ve elektronik sistem,
- 4) Transmisyon,
- 5) Kasa, süspansiyon ve tekerlekler.

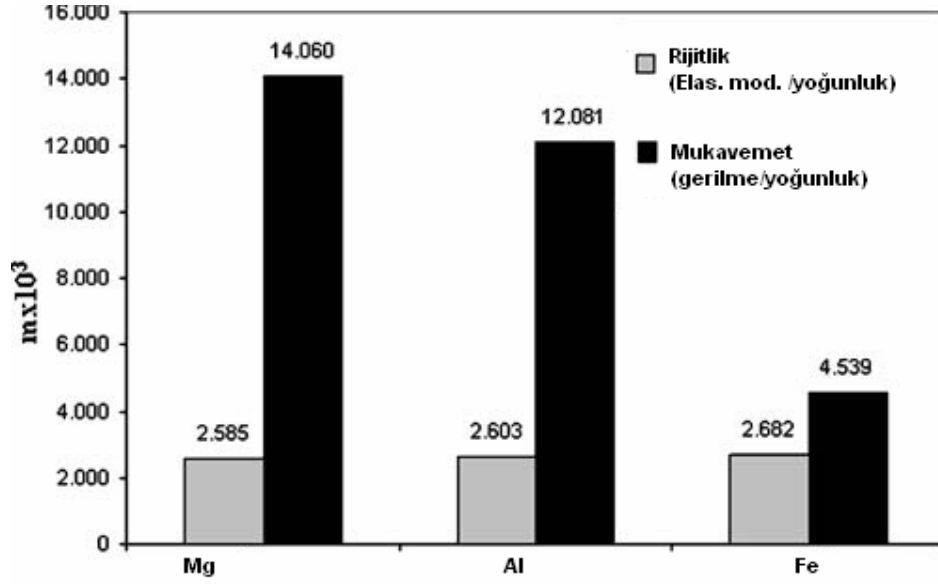
Otomobillerde kullanılan ön panel çelik ve plastik teknolojisi ile üretildiğinde 25-60 kg ve yaklaşık 60 parçadan oluşurken, magnezyum alaşımı kullanılarak üretilen parça tek bir parçadır ve ağırlığı yalnızca 10 kg’dır. Bu sadece çok çarpıcı tek bir örnektir.

Düşük ağırlıkları yanında, iyileştirilmiş korozyon davranışları, yüksek toklukları (AM50HP, AM20HP) ve iyi dökülebilirlik özellikleri ile çok büyük ama ince kesitli parçaların dökülebilmesi gibi özellikleri, magnezyum alaşımlarının otomotiv ve elektronik endüstrisinde kullanım alanının genişleyerek, pazar payını arttırmasına neden olmuştur.

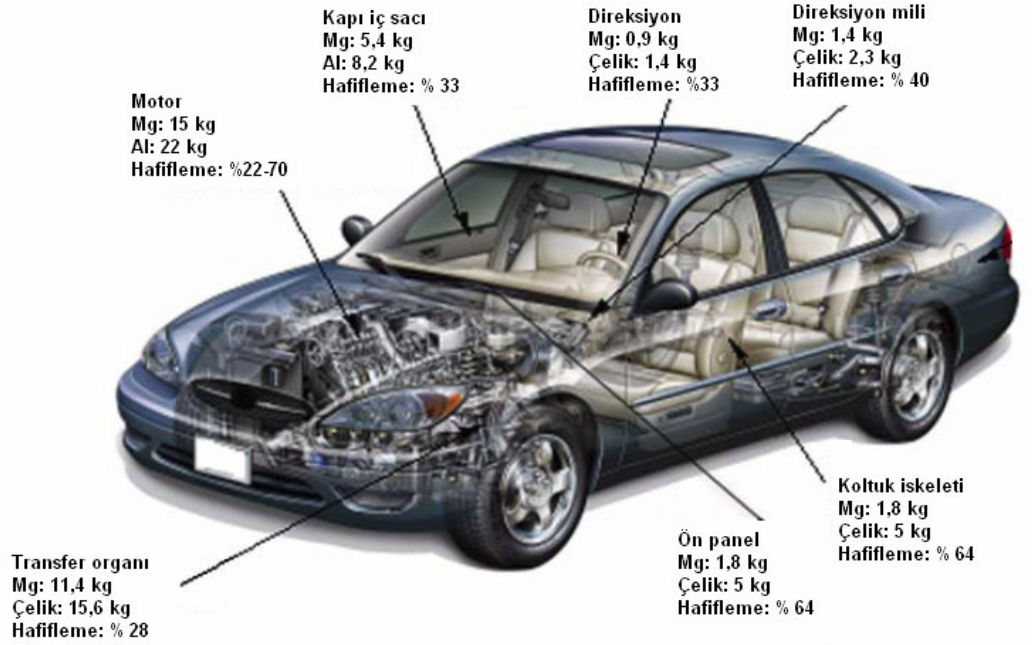
Magnezyum alaşımlarında önemli diğer bir mukavemet arttırıcı işlem fiber sertleştirmesidir. Magnezyum alaşımlarının burada alüminyum alaşımlarına göre önemli avantajı iyi kullanılabilirlik ve çok iyi yapışma özelliğidir. Magnezyum dövme alaşımlarının matrisi SiC kristalleri, Mg-döküm alaşımları ise cam, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve grafit lifleri ile sertleştirilirler. %20 SiC fiber kullanılarak AZ31 (G-MgAl<sub>3</sub>Zn<sub>1</sub>) alaşımının Elastisite modülü 100 Gpa'a yükseltilir. Bu iki kat artış demektir ve mukavemet değeri de 450 Mpa'ya yükselir. Magnezyum döküm alaşımlarında hacimce %40 grafit fiber kullanımı ile Elastisite modülü 170 Gpa değerine çıkar. Mukavemet ise 825 Mpa değerine yükselir. Gelecekte hafif malzeme gereksinimi arttıkça Mg-Li matrisli alaşımların matris olarak kullanımı da artacaktır. Ancak bu tip alaşımlarda, lityumun reaktivitesi nedeniyle, matris/lityum etkileşimi, önemli sınırlamalar getirmektedir. Bu malzemede en uygun kullanım SiC whisker kristalleri olarak karşımıza çıkmaktadır. (Zeytin 1999)

Her bir otomobilde ortalama olarak kullanılan magnezyum alaşımı miktarının 2010 yılında 20 kg ve 2015 yılında 50 kg olacağı tahmin edilmektedir. Rakamlardan da anlaşılacağı gibi magnezyum alaşımlarının kullanım miktarı günden güne artmaktadır. Bundaki en büyük etken de hafifliği ve çevre dostu olmasıdır. Magnezyumdan yapılmış olan parçalar alüminyuma göre daha pahalı olmasına rağmen düşük yakıt tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonundan dolayı tercih edilirler. şekil 1.15 de magnezyum, alüminyum ve çeliğin rijitliği ve mukavemeti karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi magnezyum, alüminyum ve çeliğin rijitlikleri arasında çok az bir fark olmasına rağmen, magnezyumun mukavemeti diğer malzemelerden göz ardı edilemeyecek kadar yüksektir. şekil 1.16 da otomobillerde kullanılan magnezyum esaslı malzemeler görülmektedir. (Külekcı 2007)





Şekil 1.15 Magnezyumun temel yapısal özelliklerinin alüminyum ve çelik ile karşılaştırılması (Külekçi 2007)



Şekil 1.16 Otomobillerde kullanılan bazı mg parçalar (Külekçi 2007)

### 1.3.5. İleri Çelik Teknolojileri

Bir araçta diğer parametreler sabit tutulduğunda araç kütlesi ile yakıt tüketimi arasında doğru orantı olduğu daha önceden belirtilmişti. Bu yüzden de araçlar belirli kütle hedeflerine göre üretilirler. Kütle azaltmanın bir yolu da hafif malzeme kullanımıdır. Demir ve çelik malzemelerinin de, araçlarda kullanılan ana malzeme olduğu için hafiflik ve diğer mekanik özelliklerini geliştirecek birçok çalışma yapılmaktadır. Bu malzemelerdeki gelişmelerle beraber çelikler, alüminyum, plastik, kompozitler ve diğer hafif metallerle yarışabilir hale gelmişlerdir. Hafif malzemelerin geliştirilmesi daha çok araç performansı ile ilgili olsa da, mukavemet, rijitlik, işlenebilirlik, titreşim ve ses özellikleri ile de ilgilidir.

Otomotiv sektöründe ağırlık düşüren teknolojiler günden güne artmasına rağmen, araçların ortalama ağırlıkları eskiye göre artabilmektedir. Bu da motor gücünün artırılması veya daha önceden olmayan teknolojilerin araçlara adapte edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Geliştirilmiş çelikler ve bu malzemelere form verme prosesleri sayesinde araç gövdesi ve çeşitli parçalarında büyük optimizasyonlar sağlanabilmektedir. Standart yüksek mukavemet çeliklerinin mukavemeti 210 MPa ile 550 MPa arasında değişirken, ultra yüksek mukavemet çeliklerinin mukavemetleri 550 MPa ında üzerindedir. Yüksek mukavemet çelikleri geleneksellere göre %50 daha pahalı olmasına rağmen, kullanıldığı yerlerde daha hafif ve mekanik özellikler göstermesinden dolayı tercih edilirler. (Decicco 2005)

### 1.4. Hafif Yapı Yaklaşımında Örnek Tasarımlar

Daha önce de belirtildiği gibi hafif yapı kavramı sadece hafif malzemelerin kullanımı ve sonlu elemanlar yöntemiyle boyut belirlenmesi değildir. Aksine hafif yapı kavramı çok kapsamlı bir sistematik düşünce gerektirmektedir. Bu bölümde de işte bu sistem ve kavramlardan bahsedilecektir.

#### 1.4.1. Uzay Çerçeve (Space Frame) Teknolojisi

Bu teknoloji çok parçadan oluşan yapıların uygun imalat yöntemleriyle tek parçadan üretilmesi şeklinde tanımlanabilir. (Şekil 1.17) Bu teknikle kasanın tamamının alüminyum olması mümkündür. Düz ve eğri kısımlar ekstrüzyon tekniği ile üretilirken, köşe ve bağlantı yerleri kompleks alüminyum basınçlı döküm tekniği ile üretilmektedir. Bu tür yapı tiplerinin avantajları altta olduğu gibidir; (Klein 2005)

##### *Konstrüktif açıdan;*

- Amaca daha uygun kuvvet iletim davranışı (örneğin çarpmalarda)
- Rijitlik dağılımının daha anlamlı olması, bu şekilde eğilme ve burulma rijitliklerinin artırılması
- Cihazların bağlanması için tanımlanmış arakesit konumları
- Daha az parça

##### *İmalat açısından;*

- Parçalardaki ön imalat yeterliklerinin yükselmesi
- Basit geometrili üstün parçalar
- Daha iyi tolerans telafisi
- Daha uygun maliyetli takımlar

##### *Montaj açısından;*

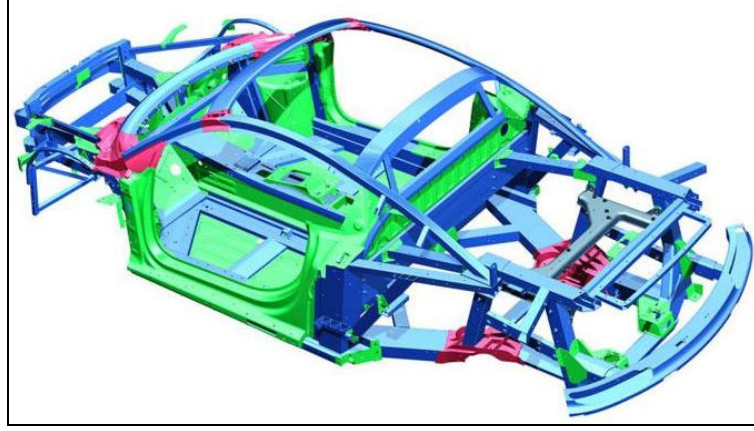
- Daha stabil, hücrelerin arasındaki açıklıklar montaj olayını daha kolaylaştırır
- Daha basit montaj operasyonları

##### *Onarım açısından;*

- Daha kolay değiştirebilme için daha iyi arakesitler mevcut
- Atölyede çalışma için kalifiye eleman ihtiyacı var

##### *Gerçekleme;*

- Tipik küçük seri imalatlar için uygun.



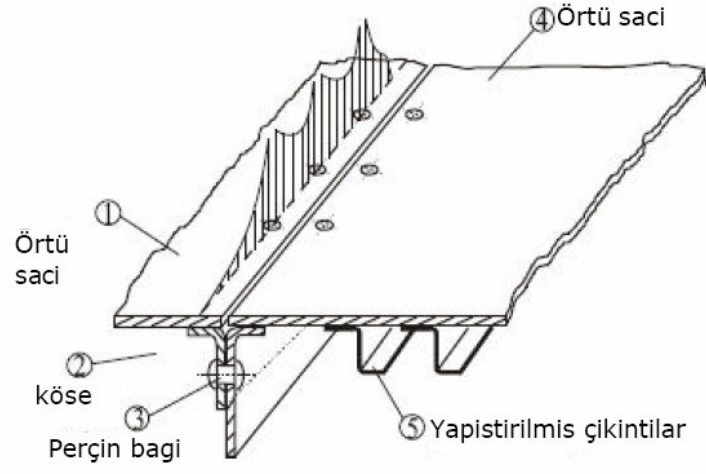
Şekil 1.17 Space Frame Yapı (<http://www.carbodydesign.com>)

#### 1.4.2. Hafif Yapılardaki Yapı Tipleri

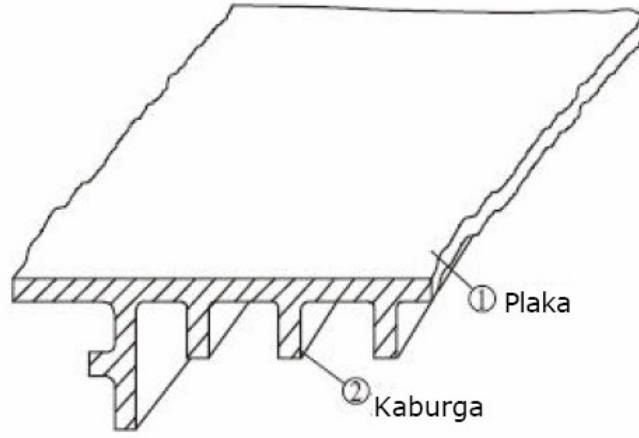
Belirli bir konstrüksiyon prensibinin seçilmesinde iç ve dış olarak belirleyici noktalar olacaktır. Hangisinin seçileceğine dair verilecek kararlarda şu noktalar düşünülmelidir: (Klein 2005)

- Tekil imalat/Seri imalat kararı
- Seçilmiş olan malzemelerin işlenebilirlikleri
- Sahip olunan işleme yetenekleri, olanakları
- Çevre faktörleri
- Montaj ve demontaj imkânları

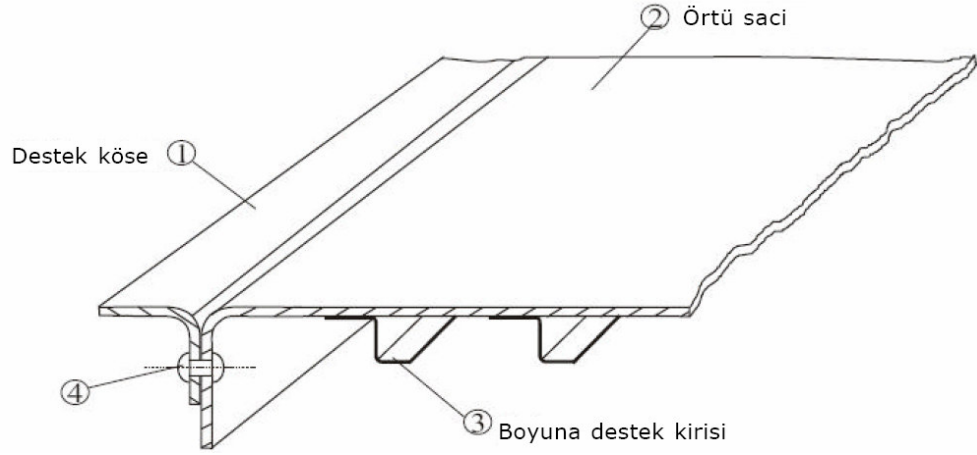
Yukarıda verilen kriterler göz önüne alındığında hafif konstrüksiyonlarda kullanılabilecek temel yapı tipleri aşağıda verildiği gibi olabilir.



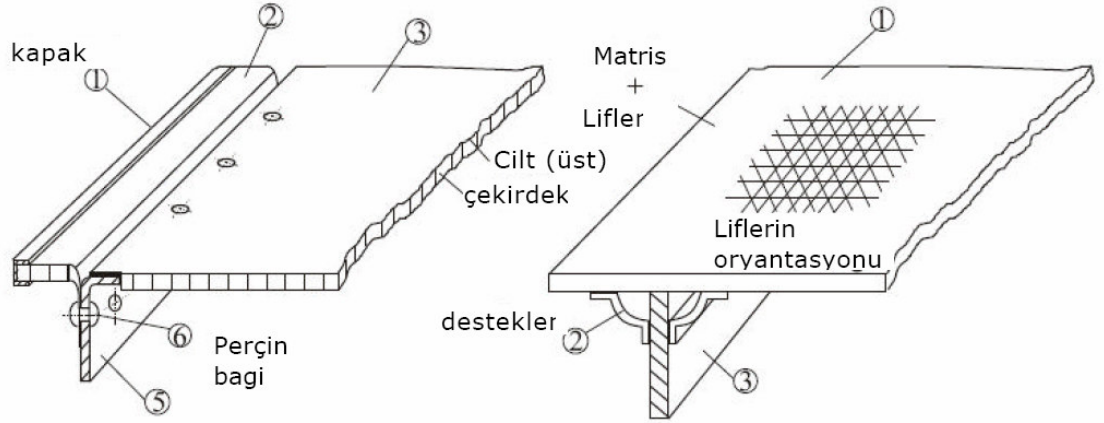
Şekil 1.18 Diferansiyel ( ayrık ) yapı (Klein 2005)



Şekil 1.19 İntegral (birleşik) yapı (Klein 2005)

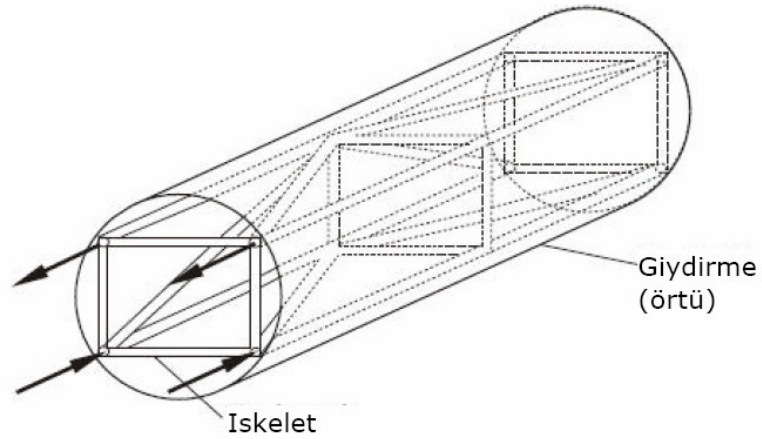


Şekil 1.20 Kombine yapı (Klein 2005)

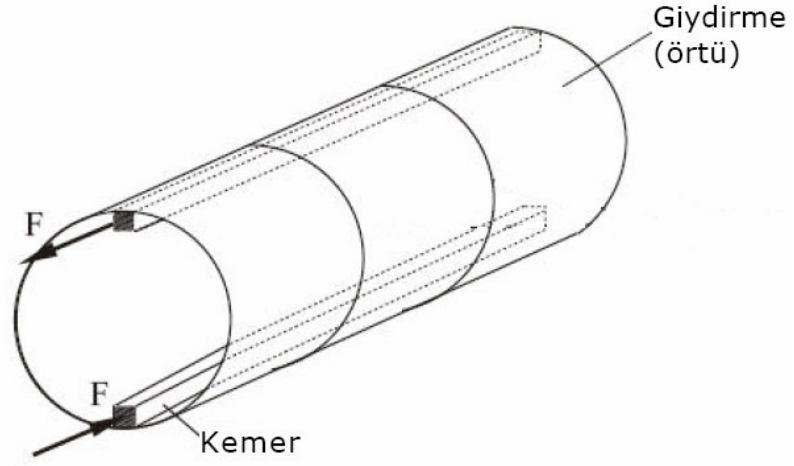


Şekil 1.21 Kompozit yapılar (Klein 2005)

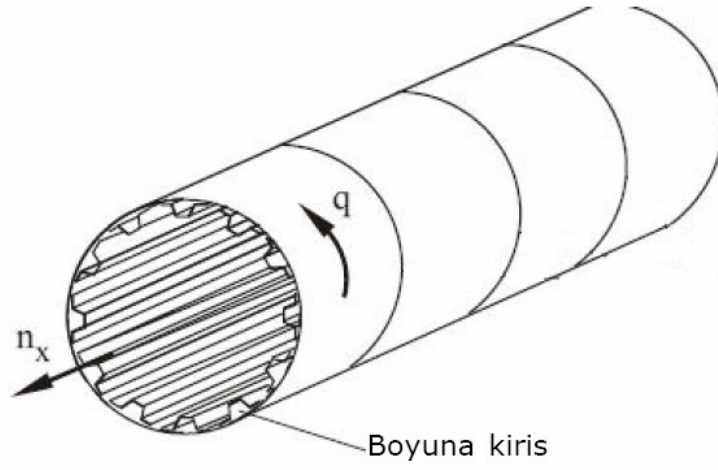
#### 1.4.3. Hafif Yapılardaki İç Yapı Tipleri



Şekil 1.22 İskelet Sistemi (Klein 2005)



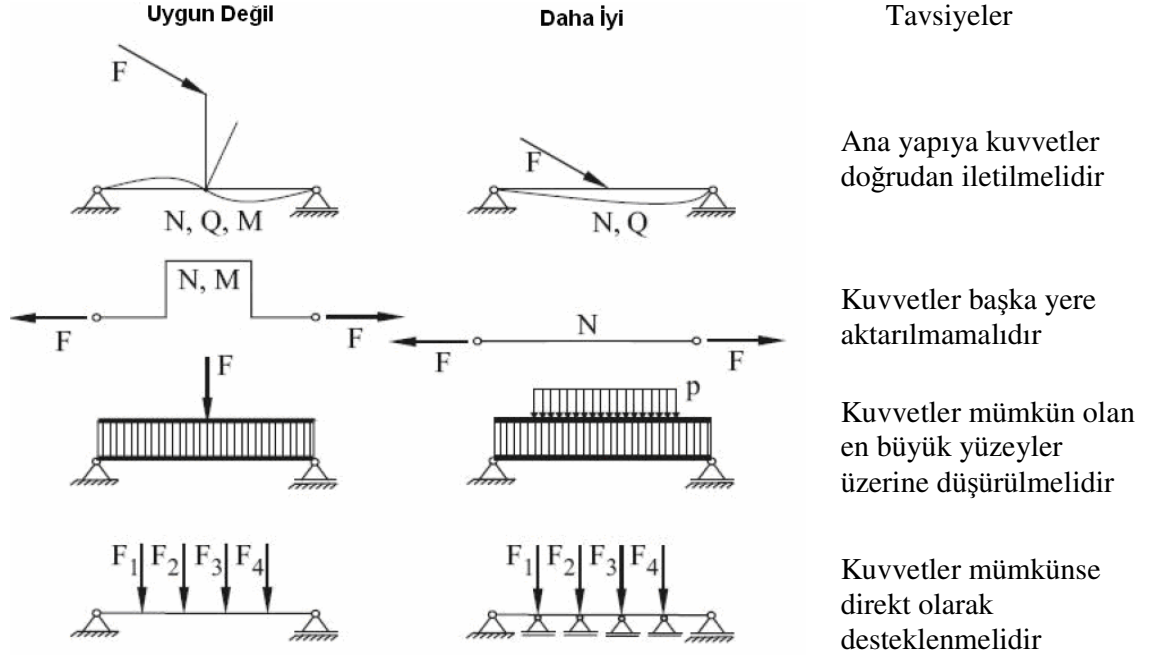
Şekil 1.23 Tam Duvar Sistemi (Klein 2005)



Şekil 1.24 Kabuk Sistem (Klein 2005)

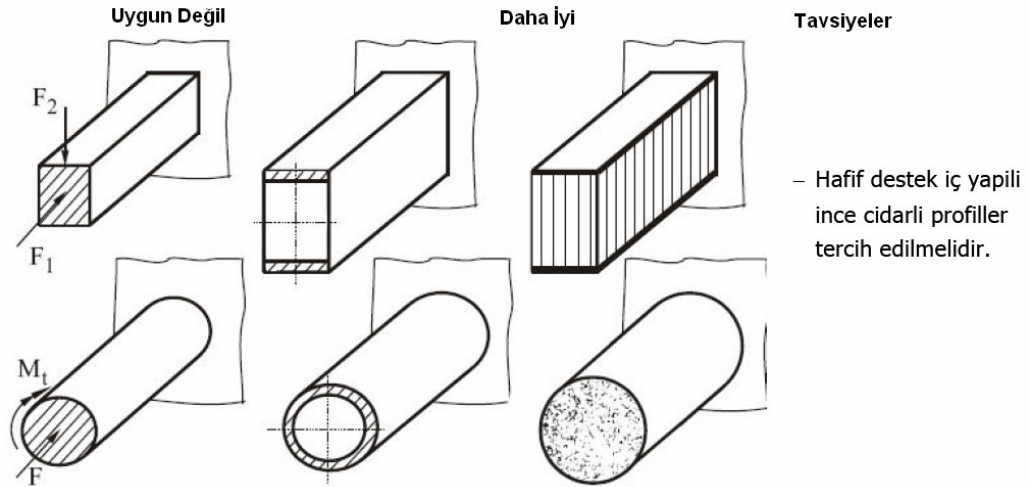
#### 1.4.4. Hafif Yapı tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Kurallar

- Kuvvet iletimi ve kuvvet dengelemesi doğrudan yapılmalıdır



Şekil 1.25 Kuvvet Dengelemesi (Klein 2005)

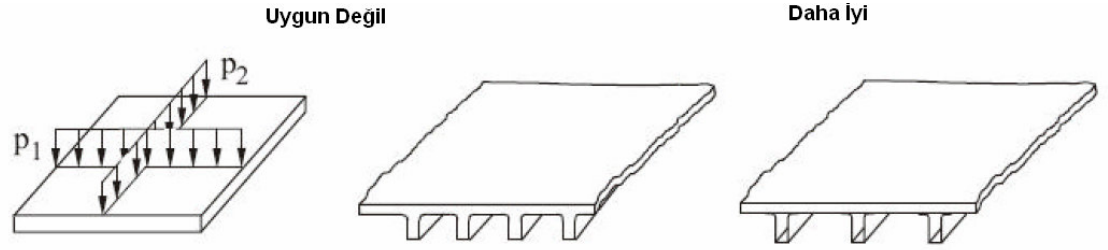
- Alan ve direnç momentleri mümkün olduğunca büyük seçilmelidir.



Şekil 1.26 Alan ve direnç momentleri (Klein 2005)



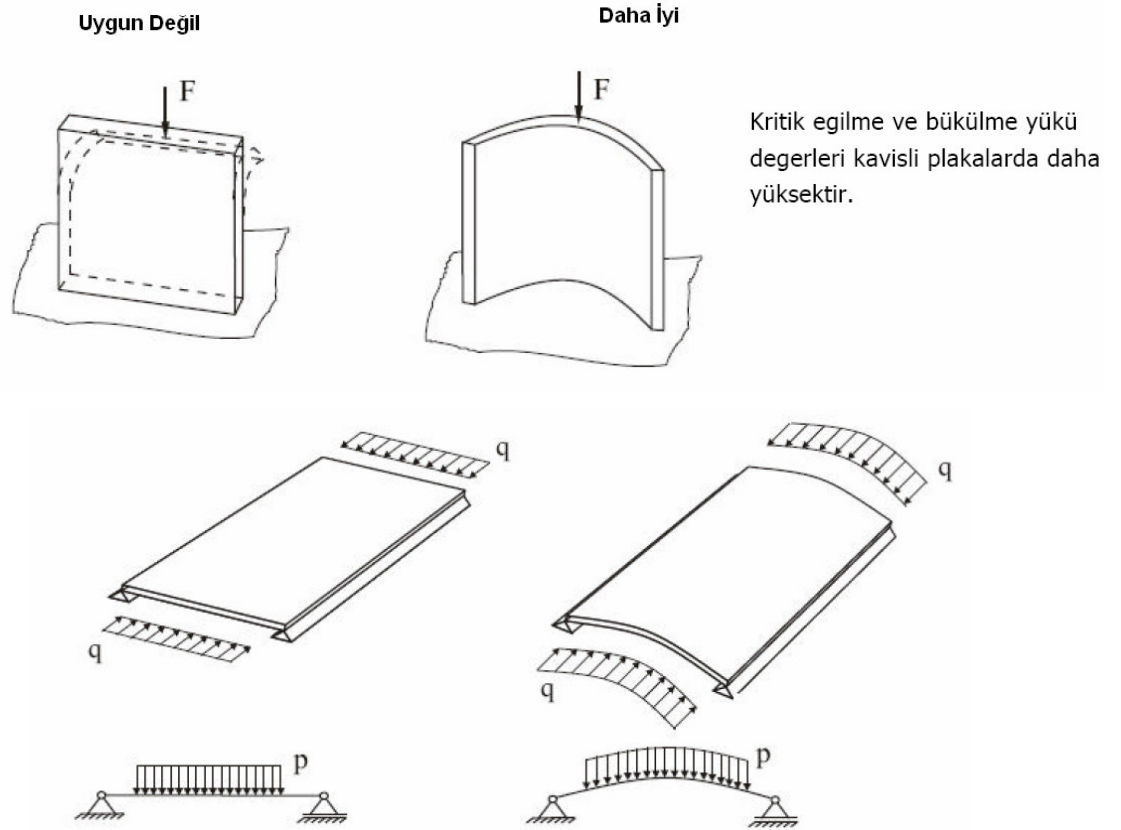
- Yapılar hassas şekilde düzenlenmelidir



Tavsiye: Tam kesitli profiller yerine ince cidarlı destekli yapılar tercih edilmelidir!

Şekil 1.27 Yapının Düzenlenmesi (Klein 2005)

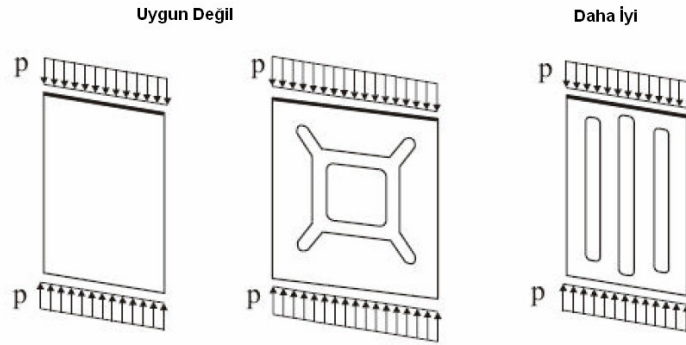
- Kavisin doğal destekleme etkisinden faydalanılmalıdır



Şekil 1.28 Kavisin doğal destekleme yükü (Klein 2005)

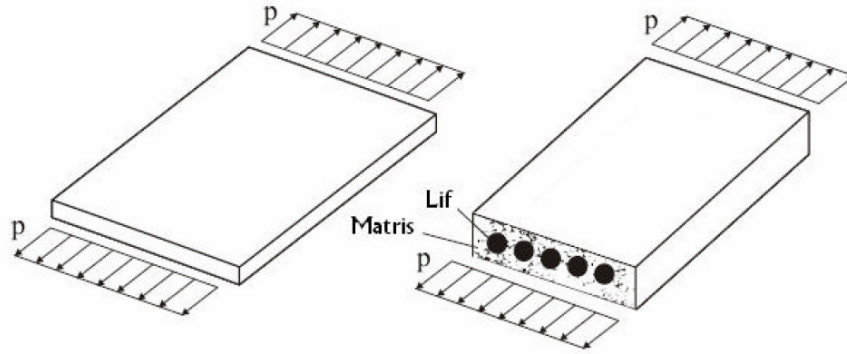
Kuvvet doğrultusuna ters yönde yapılan kavisler burkulma rijitliğini artırır, delinmeye karşı rijitliği yükseltir.

- Ana yükleme doğrultusundaki rijitliği arttırıcı konstrüksiyonlar şekildeki gibi olmalıdır.



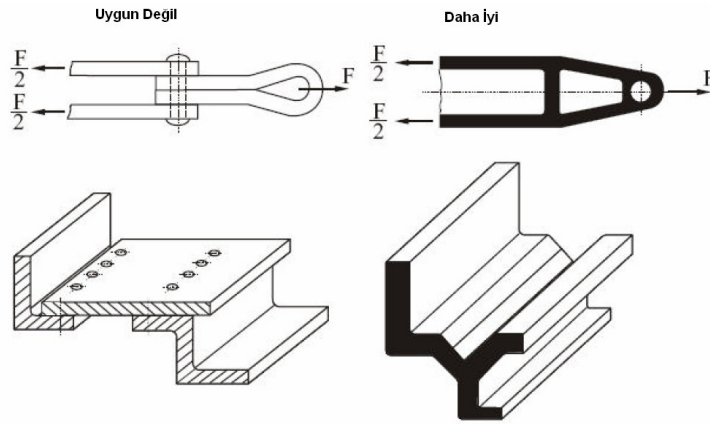
Şekil 1.29 Rijitliği arttırıcı konstrüksiyon (Klein 2005)

- Liflerin doğrultusu kuvvetlerin doğrultusu ile aynı olmalıdır



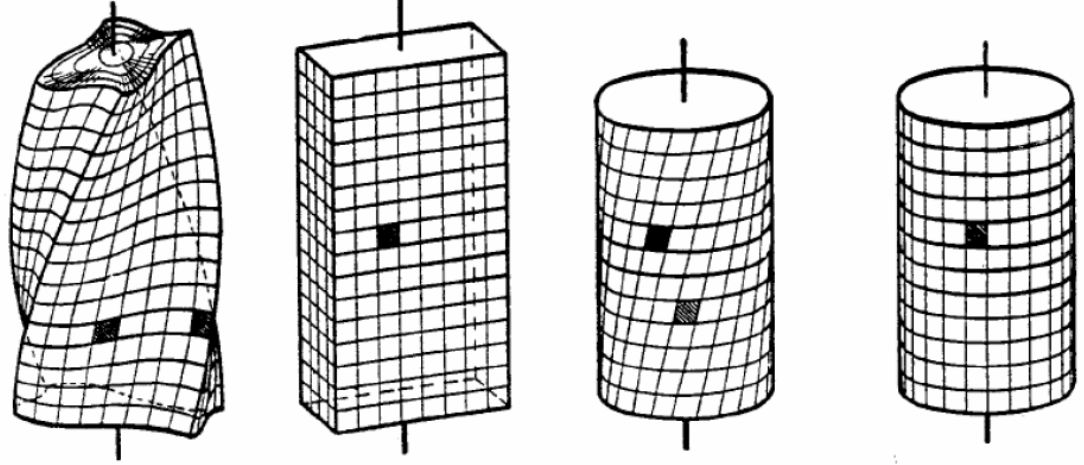
Şekil 1.30 Kompozit malzeme tasarımı (Klein 2005)

- İntegratif yapı tipinin tercih edilerek parça ve bağlantı elemanı sayısının azaltılması



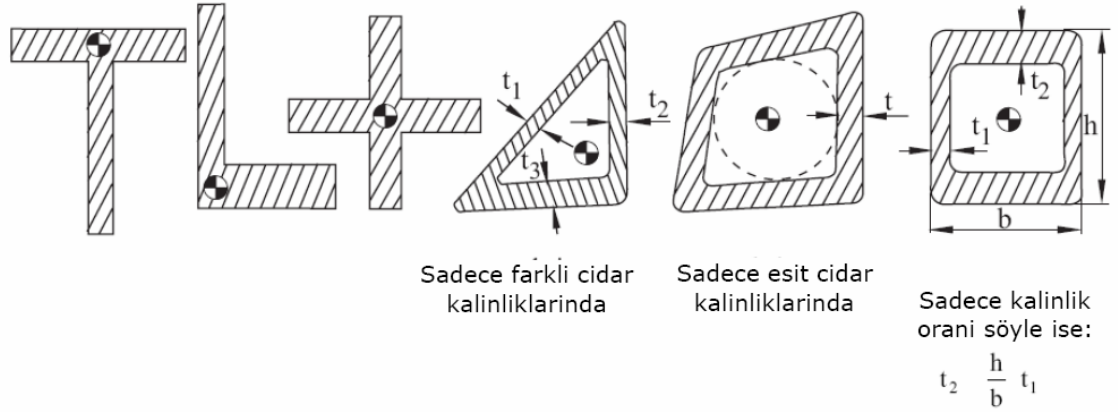
Şekil 1.31 İntegratif yapı tiplerinin tercih edilmesi (Klein 2005)

- Burulma gerilmesine maruz kalan parçalarda dolu ya da boru kesit kullanılmalıdır. Dikdörtgen, kare ve çok yüzeqli profillerde dönme olayı görülebilir.

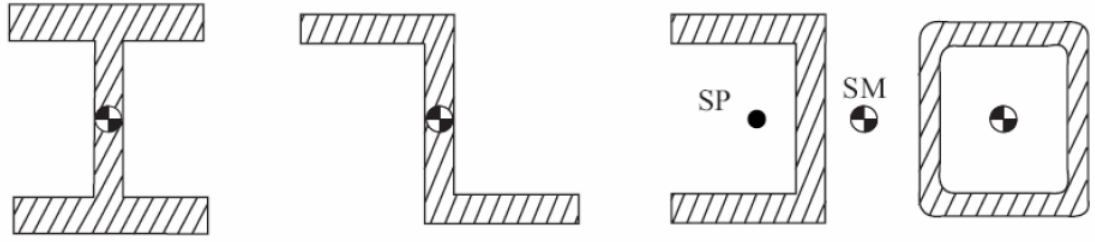


Şekil 1.32 Dikdörtgen ve yuvarlak profillerin burulması (Klein 2005)

- Dönme maruz parçalarda uygun profiller tercih edilmelidir.



Şekil 1.33 Dönme olayı oluşmayan kesitler (Klein 2005)



SP: Agirlik merkezi, SM: Kayma orta noktası

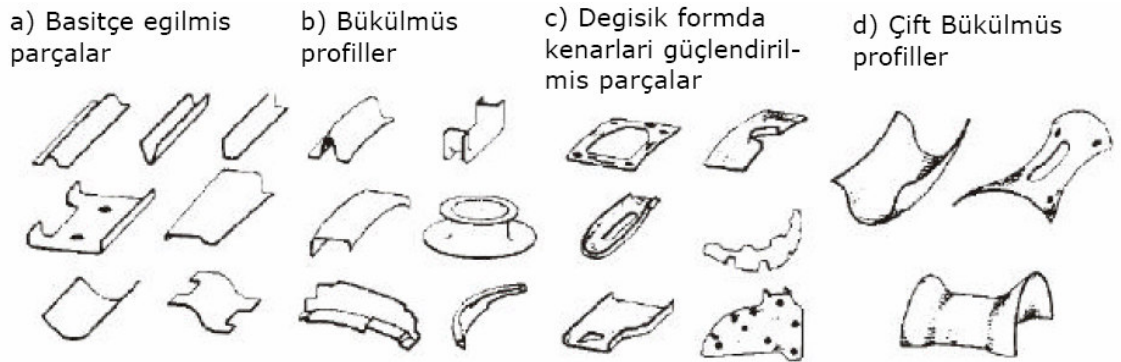
Şekil 1.34 Dönme oluşabilecek kesitler (Klein 2005)

#### 1.4.5. Konstrüktif Olarak Yapı Rijitliğinin Arttırılması

HY konstrüksiyonlarında amaç kütleyi arttırmadan en yüksek rijitlik değerine ulaşabilmektir. Rijitlik arttırma işlemi genellikle bası ve eğilme gerilmelerine karşı yapılır. Rijitlik arttırma aşağıdaki yöntemlerle yapılabilir. (Klein 2005)

- Kabuk formunda şekillendirme
- İç bölümlerde kabartıların kullanılması
- Profil kemerleri
- Kaburgalar ile kalıp yapma
- Aralarda boşlukların verilmesi
- Kenarlarda güçlendirici bükmelerin ve kıvrımların yapılması
- Metal köpüklerin yapıştırılması

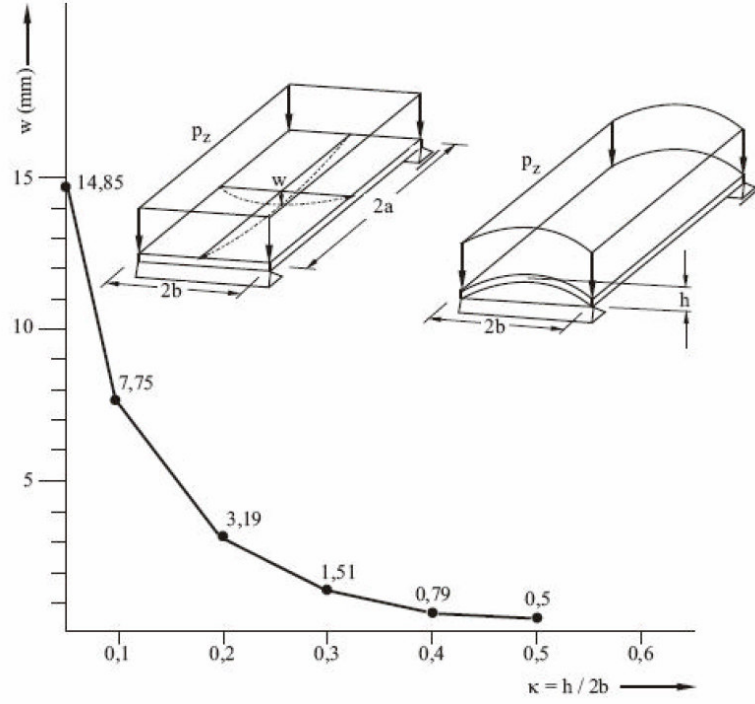
##### 1.4.5.1. Kabuk formundaki şekillendirmeler



Şekil 1.35 Kabuk formundaki şekillendirmeler (Klein 2005)

### 1.4.5.2. Ön bükmenin destekleyici etkisi

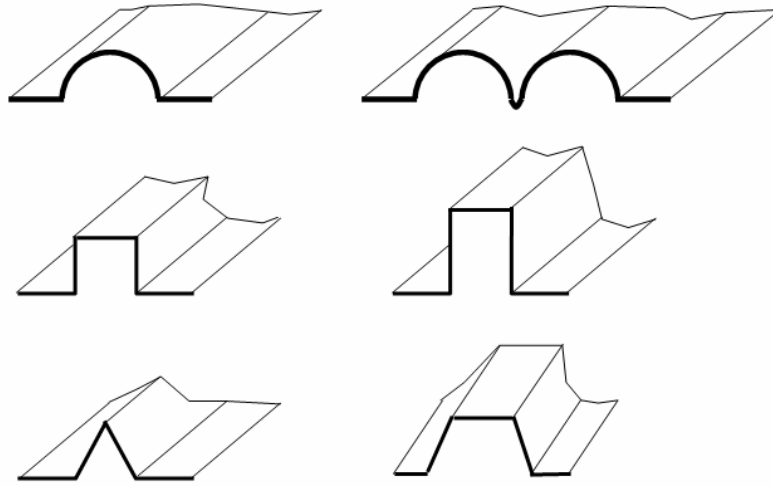
Şekil 1.36 den de görüldüğü gibi ön bükme parçada sehimi azaltacak yönde etki yapmaktadır.



Şekil 1.36 Ön bükmenin maksimum sehime etkisi (Klein 2005)

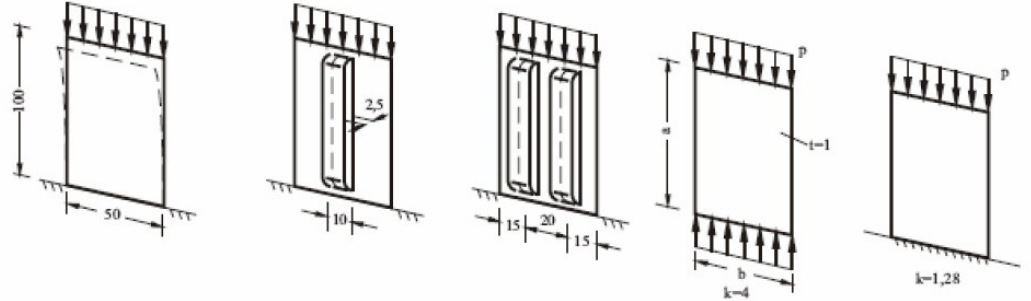
### 1.4.5.3. Kabartıların önemi

Makine elemanlarında kullanılan çeşitli kabartıların mekanik özelliklere etkisi olumludur. İleriki bölümlerde de trapez, kare profillerin rijitliklerinin hangi parametrelere göre değiştiği detaylı olarak analiz edilecektir. Şekil 1.37 de makine elemanlarında kullanılan çeşitli kabartılar görülmektedir. (Klein 2005)



Şekil 1.37 Çeşitli Kabartılar (Klein 2005)

## 1.4.5.4. Sac Duvarlarda kabartıların etkisi

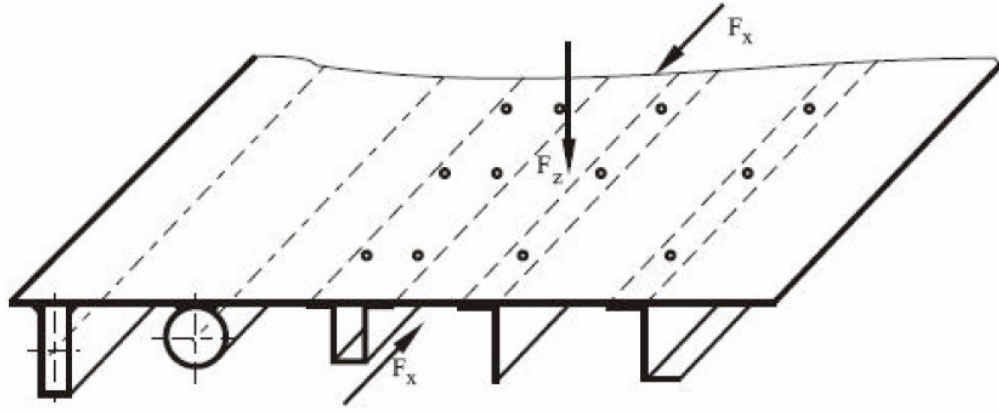


	Düz Sac	Tek Kabarti	Çift Kabarti
Teorik	$\hat{\sigma}_{Bkrit}$	$\bar{\sigma}_{Bkrit} = 5,25 \cdot \hat{\sigma}_{Bkrit}$	$\bar{\sigma}_{Bkrit} = 7,98 \cdot \hat{\sigma}_{Bkrit}$
pratik	-	$\bar{\sigma}_{Bkrit} \approx 2,89 \cdot \hat{\sigma}_{Bkrit}$	$\bar{\sigma}_{Bkrit} \approx 3,86 \cdot \hat{\sigma}_{Bkrit}$

Şekil 1.38 Kabartmaların kritik gerilmeye olan etkisi (Klein 2005)

## 1.4.5.5. Kaburgaların döküme veya sac plakaya eklenmesi

Yapıya eklenen kaburgalar eğilme rijitliğini artırır.



Şekil 1.39 Yapıya eklenmiş olan kaburgalar (Klein 2005)

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Sonlu Elemanlar Analizi

#### 2.1.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler çoğu zaman doğrudan çözülemez. Problem, çözümü daha kolay olan alt problemlere ayrılarak anlaşılır hale getirilmeye çalışılır. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, bunlarda yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür. (Anonim)

Sonlu elemanlar yöntemi( Finite Elements Method - FEM); bir nümerik teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu elemanlar yönteminde modeller sonsuz sayıda elementlere bölünür. Bu elementler belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, buna düğüm (node) denir. Katı modellerde herbir elementteki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilgilidir.

Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemntlerin gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu elemanlar yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur.

Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Diğer atraftan sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde ortam özelliği gösterdiği bilinmektedir. Bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyişi olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer veya yüksek



mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özelliği gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait olan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden lineer denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısı elde edilebilir.

Sonlu elemanlar metodu ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle günümüze kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok makine elemanının mukavemet analizini kısa sürede yapıp, optimum dizaynı gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. (Anonim)

#### 2.1.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanışı

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi öncelikle bir elemana ait sistemin özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp daha sonra tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir.

#### 2.1.3. Cismin Sonlu Elemanlara Bölünmesi

Sonlu elemanlar probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etmeleri oranında elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır.

#### 2.1.4. Sonlu Eleman Tipleri

Sonlu eleman metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılır.

##### 2.1.4.1. Tek boyutlu elemanlar

Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

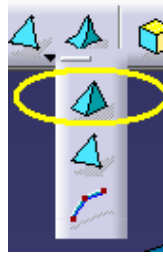
##### 2.1.4.2. İki boyutlu elemanlar

İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden

çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir.

#### 2.1.4.3. Üç boyutlu elemanlar

Bu grupta en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir. Bu tez çalışmasında yapılmış olan analizlerde kullanılan eleman tipi de üç boyutludur. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Analizlerde kullanılan üç boyutlu eleman tipi

#### 2.1.4.4. İzoparametrik sonlu elemanlar

Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışlarsa kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyetle tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla adetlerini arttırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır ve dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesi ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta, hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eşparametrelili elemanlar da denir. (Anonim)

## 2.2. Düz ve Form Verilmiş Sac Levhaların Eğilme Rijitliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi

### 2.2.1. Plaka Formunun Rijitliğin Arttırılmasına Etkisi

Literatürde plakalara verilen değişik profillerin plakanın rijitliğine etkisi üzerine çalışmalar az da olsa mevcuttur. Peng ve ark. (2007) rijitliği arttırmak için plakaya verilen sinüs ve trapez formuna sahip plakaların düz plakaya göre elastik eğilme davranış farkını incelemiştir. Analiz için Galerkin Metodu kullanılmış olup sonuçlar ANSYS paket programı ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada temel olarak plakanın orta bölgesindeki maksimum yer değiştirme değerleri araştırılmıştır.

Pasini (2007) de çalışmasında kesit formlarının rijitlik değişimine etkisini incelemiş ve eğilme davranışında kesit şekillerini iyiden kötüye sıralamıştır.

Literatürdeki araştırmalarda genellikle plakaların maksimum çökmeleri incelenmektedir. En az çökme değerine sahip plaka en rijit plaka kabul edilmektedir. Malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ile rijitliğin arttırılmasından çok şekil (profil) değişimlerinin rijitliğe etkisi araştırmalara konu olmaktadır. (Steinhilper ve Röper 1996, Merklein ve Geiger 2002 ve Zhang ve ark. 2006) Çalışmalarda genellikle plakaların sadece eğilmeye maruz kaldığı durumlar incelenmekte olup eğilmenin yanı sıra kesme gerilmelerinin de birlikte incelendiği durumlar mevcuttur. (Heitmann ve Horst 2006) Lesnic (1999) ise kirişlerin rijitlik hesabında, deneysel çalışmalardan elde edilen dataları teorik bağıntı oluşturma amacı ile kullanmıştır.

Hafif yapılarda yüklemelerin türüne göre farklı isteklerle karşılaşılır. Bu istekler de bizi farklı hesap ve uygulama yollarına götürür. Buna göre şöyle bir sınıflandırma yapmak mümkündür:

- Rijitliğe göre tayin edilen yapı elemanları: Burada şekil değiştirmeler en az tutulmaya çalışılır!

Elastisite modülü x Rijitlik sayısı:  $E \frac{A}{L}$  veya  $E \frac{I}{L^3}$

- Mukavemet hesaplarına göre tayin edilen yapı elemanları: Malzemenin kopma mukavemetine göre boyutlandırma hesapları yapılır.
- Kritik yapı elemanları: Çentik oluşumu esnasında dayanılabilecek en büyük yük tekrar sayısı  $N_i = F(\sigma_{ai})$  ve çentik hızı  $da/dn = F(\Delta K_c)$  bu ömrü sınırlandırır.
- Enerjiyi sönmleyen yapı elemanları: Elastik/Plastik şekil değiştirme enerjilerine (iç enerji) göre tasarım.
- Özel uygulamalar: Profiller, form parçaları, saç parçalar, çerçeveler.

Bir yapının rijitliği

$$c = \frac{E \cdot A}{L}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada E: malzemenin elastisite modülü ( $N/mm^2$ ), A: Kesit alanı ( $mm^2$ ) ve L de uzunluk (mm)'dir. Ortasından etkiyen F kuvvetinin etkisi altında, eğilmeye zorlanan bir plakada tam ortada oluşan maksimum eğilme gerilmesi:

$$\sigma_{e \text{ maks}} = \frac{M_{e \text{ maks}}}{W_e} = \frac{F \cdot L}{I_e} e$$

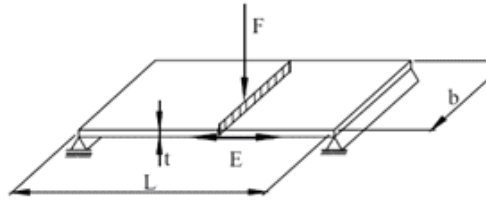
yardımıyla basitçe hesaplanabilir. Burada;  $I_e$ : Plakanın aksel atalet momenti ( $mm^4$ ),  $W_e$ : Plakanın mukavemet momenti ( $mm^3$ ) ve e: Kesitin ağırlık merkezine olan en uzak mesafesi (mm)'dir. Aynı şekilde plakanın tam orta noktasındaki maksimum çökme (sehim) de (kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir):

$$f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

denklemleri ile bulunur. Görüldüğü gibi burada etkin olan parametre yine plakanın atalet momenti I'dır. Buna göre, eğilme gerilmesini ve sehim değerini küçültmek burada öncelikli amaç olduğundan, ağırlık merkezinden en uzak bölgede kütleyi yığmak atalet momenti değerini yukarıya çekecektir. Bu şekilde kesit alanı minimize edilirken (daha hafif yapı) atalet momenti maksimize edilecektir.

Plakanın farklı malzemeden imal edilmesi de hafiflik için bir seçenektir. Çelik, alüminyum ve magnezyum alaşımlarından imal edilmiş plakalar için aynı mukavemete sahip olma şartı ile kalınlık değerleri Şekil 2.2'de görülmektedir. Bir kamyonun taban

sacı için düşünülen oluklu sac levhanın kütlede sağladığı kazanımlar ise Şekil 2.3'te verilmiştir.

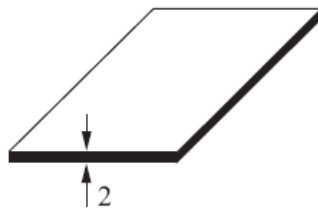


$$\text{Atalet momenti: } I = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

$$\text{Sehim: } f = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Kalınlık:

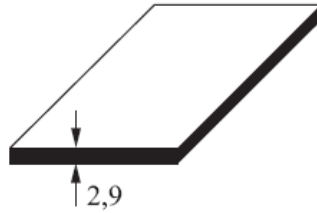
$$t_{Al} = \sqrt[3]{\frac{E_{\text{Ç}}}{E_{Al}}} \cdot t_{\text{Ç}} = 1,44 \cdot t_{\text{Ç}} \quad t_{Mg} = 1,67 \cdot t_{\text{Ç}}$$



Çelik

t= 2 mm

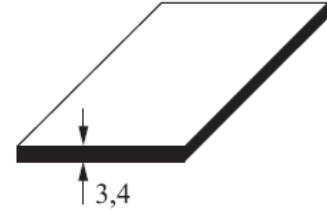
G= 16 kg/m<sup>2</sup> (%100)



Alüminyum

t= 2,9 mm

G= 7,8 kg/m<sup>2</sup> (%50)

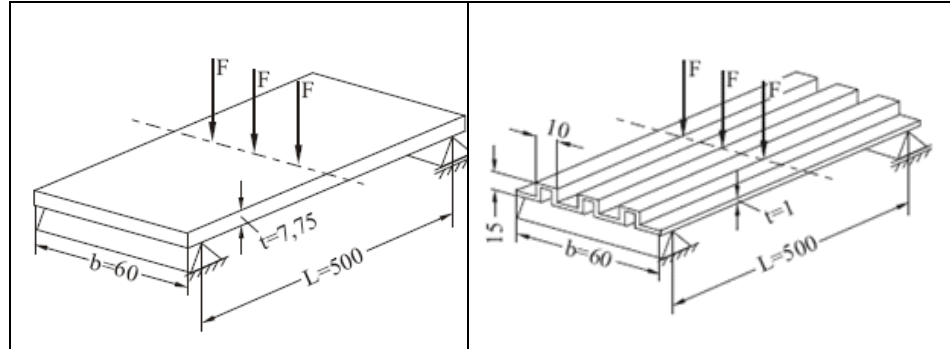


Mağnezium

t= 3,4 mm

G= 5,9 kg/m<sup>2</sup> (%35)

Şekil 2.2 Aynı mukavemete sahip Çelik, Al ve Mg plakaların kalınlık ve kütle değişimi (Klein 2005)



	değer	%	değer	%
t [mm]	7,75	100	1	13
G [kg]	1,83	100	0,59	32
W [mm <sup>3</sup> ]	600	100	600	600
I [mm <sup>4</sup> ]	2330	100	4200	180
f <sub>max</sub> [mm]	3,83	100	2,13	56

Şekil 2.3 Bir kamyonun taban sacında dikdörtgen formun düz plaka ile karşılaştırılması (Klein 2005)

### 2.2.2. Eşyönsüz (Anizotropik) Plakalar

Saç konstrüksiyonlarda kullanılan dalgalı ve katlamalı formlar plakanın eğilme ve basıya karşı rijitliğini arttırmaları. Genişlik yönündeki rijitliği arttırmak için dalgalı plakalarda tek veya çift yönlü kapatacı düz plakalar kullanılabilir. İnce bir düz plakada genişlik arttıkça:

1. Aynı malzeme miktarında boyuna yöndeki rijitlik  $D_x = E \cdot \bar{t}$  sabit kalır.
2. Enine yöndeki rijitlik azalır.
3. Artan kırışık oranı ile kayma rijitliği karesel olarak düşer:

$$\text{(Kırışıklık } \rho_a = \frac{b_a}{b} \text{ } b_a : \text{ Dalgalı alanın toplam genişliği, } b : \text{ Plakanın genişliği)}$$

Bir dalgalı plaka ile bir veya iki taraftan düz plakayı bağlarsak

Enine yöndeki engel ile birlikte uzamaya karşı gösterilen rijitlik:

$$\frac{c_{11}}{E \cdot t_o} = \frac{1 - \nu^2 \frac{t_D}{t_o}}{1 - \nu^2} \quad c_{12} = \nu \cdot c_{22} \quad \frac{c_{22}}{E \cdot t_o} = \frac{1 - \nu^2 \frac{t_D}{t_o}}{1 - \nu^2}$$

bağıntıları ile hesaplanabilir.

Burada;

$A_D$ : Dalga yüzeyli plakanın alanı,

$t_D$ : Dalga yüzeyli plakanın kalınlığı,

$t_{D0}$ : Dalga yüzeyli plakanın ortalama kalınlığı ( $t_{D0} = \rho_a \cdot t_D$ )

$A_F$ : Toplam düz plaka yüzey alanı,

$t_o$ : Ortalama malzeme kalınlığı, ( $t_o = t_D + t$ )

olarak verilmektedir.

Bu çalışmada yapılacak olan analizlerde bu bağıntılar yerine sonlu elemanlar yönteminin kullanılması yoluna gidilmiştir.

### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

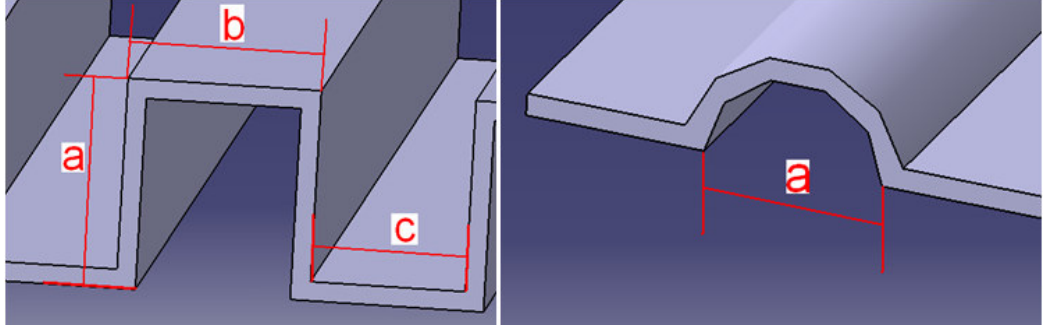
Analiz çalışmasında ilk olarak kare ve yarım daire profillerinin (Şekil 3.1) hangisinin daha rijit olduğu araştırılmıştır. Kare ve yuvarlak profilli saçlar bilgisayar destekli programlar yardımıyla hazırlanmış ve bu modellere aynı şartlar altında düzgün yayılı yük uygulanmıştır. (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3) Karşılaştırma yapabilmek amacıyla profil parametreleri seçilirken benzerlikler oluşturulmaya ve sonucu en az değiştirecek şekilde seçilmeye çalışılmıştır. Hangi modelin daha rijit olduğuna karar verirken, daha rijit modelin orta noktasında meydana gelen deformasyonun daha az olacağı kabulü kullanılmıştır. Hazırlanmış olan modeller sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayarda analiz edilmiş ve ulaşılan sonuçlar Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

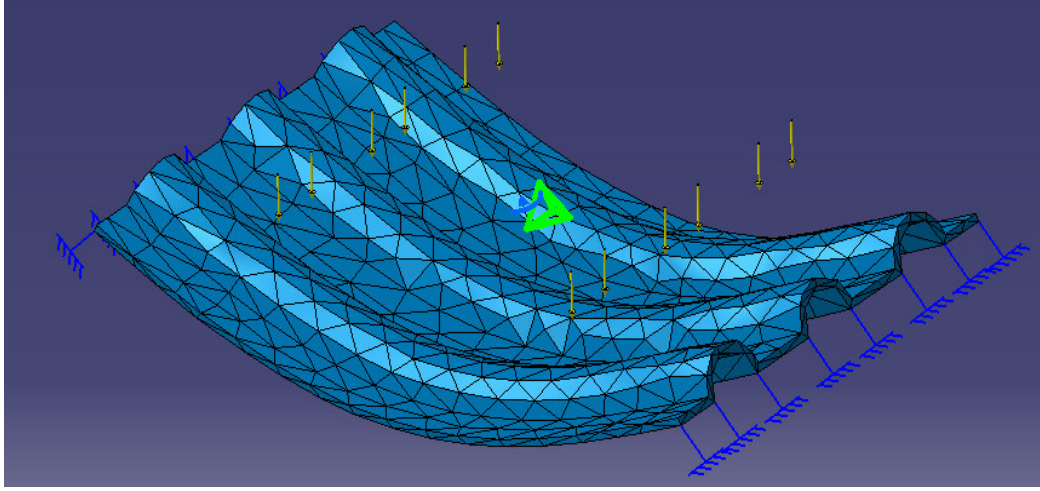
- Yuvarlak profil çapı arttırıldıkça rijitliği artmaktadır.
- Kare profilin de rijitliği a parametresinin değeri arttırıldıkça artmaktadır.
- Her iki profilde de a parametresinin değeri yükseldikçe rijitlikteki artış hızı azalmaktadır.
- Benzer geometrik parametrelere sahip kare profil yuvarlak profile göre daha rijit bir yapıya sahiptir.

MAX. DEFORMASYON (f)		
a (mm)	KARE PROFİL (mm)	YUVARLAK PROFİL (mm)
5	1,16E-05	9,28E-05
10	4,08E-06	1,42E-05
15	1,96E-06	7,82E-06
20	1,27E-06	4,35E-06
25	9,08E-07	2,74E-06
30	7,34E-07	1,77E-06
35	6,29E-07	1,21E-06
40	5,51E-07	8,54E-07

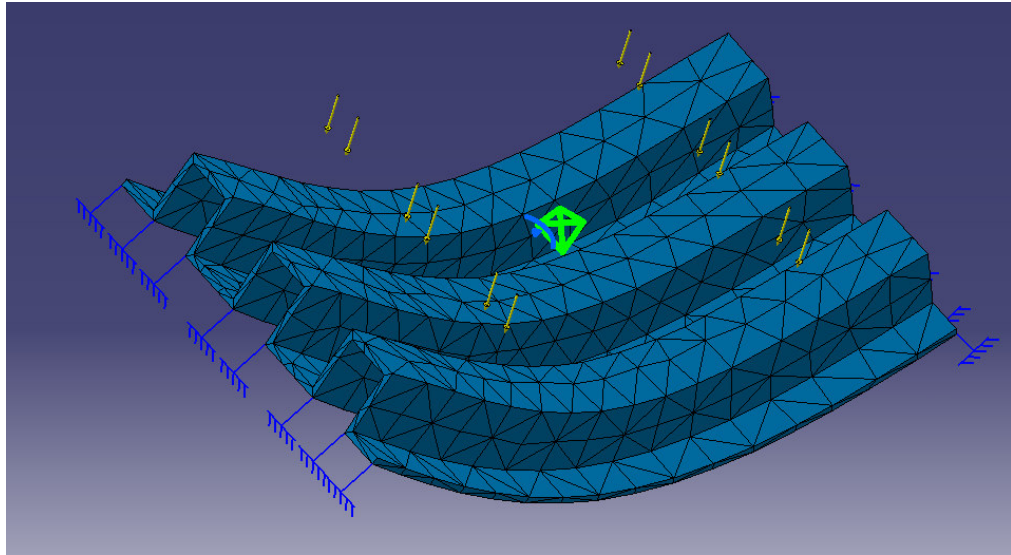
Çizelge 3.1 Kare ve Yuvarlak Profilin a Parametresine Bağlı Maksimum Deformasyon Değerleri



Şekil 3.1 Kare ve yuvarlak profil formları



Şekil 3.2 Yuvarlak profilin sacın deformasyon analizi



Şekil 3.3 Kare profilin sacın deformasyon analizi



Plaka profilinin rijitliğe etkisinin olduğu ve benzer geometrik parametrelere sahip kare profilin yuvarlak profilden daha rijit olduğu anlaşıldıktan sonra kare profil üzerinde durulmuş ve hangi parametrelerin kare profile etkisinin daha fazla olduğu araştırılmıştır. Dikdörtgen profile ait; yükseklik (a), genişlik (b) ve iki yükselti arası (c) parametreleri değiştirilmiştir. Bu değiştirme işleminde profilin iki parametresi sabit tutulmuş bir tanesi değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de görülmektedir.

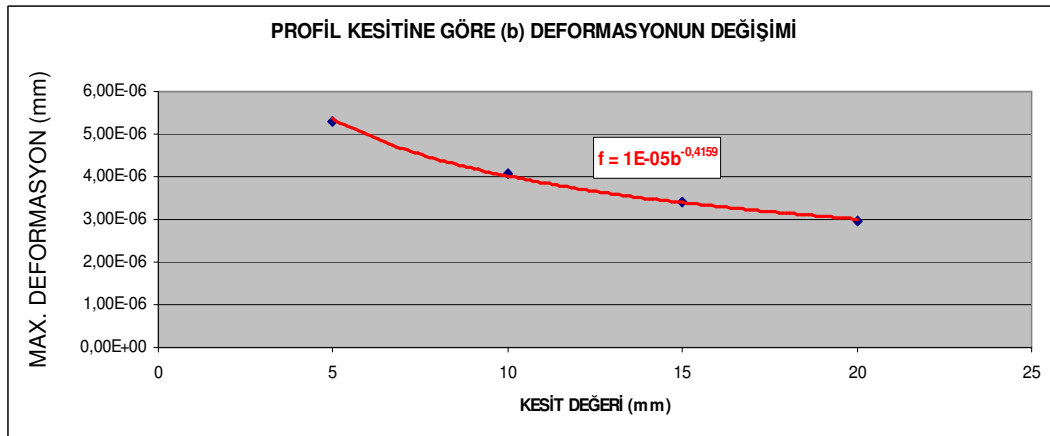
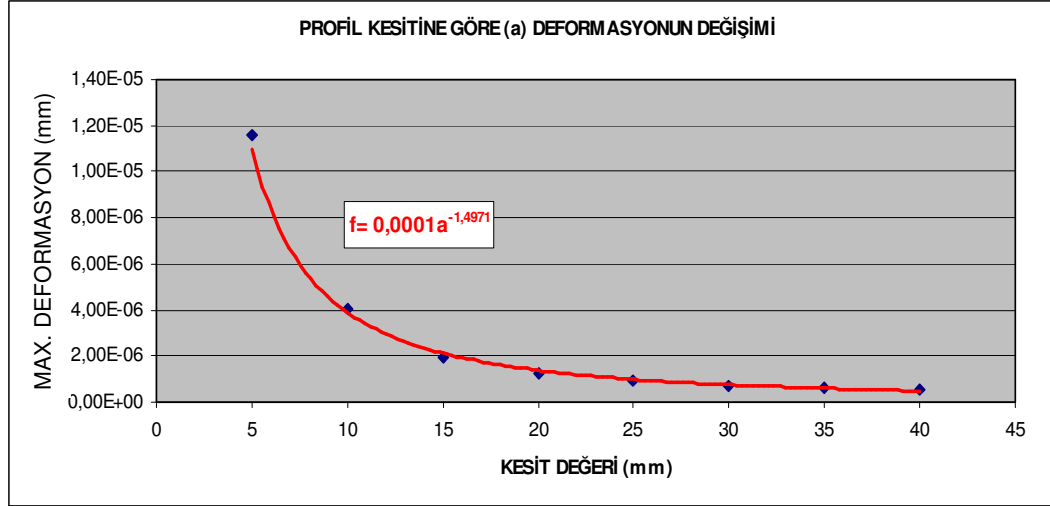
a değişkeni (b=c=10 mm)			b değişkeni (a=c=10 mm)			c değişkeni (a=b=10 mm)		
a	Maks. Sehim (f)	% Değişim	b	Maks. Sehim (f)	% Değişim	c	Maks. Sehim (f)	% Değişim
5	1,16E-05	100,00	5	5,31E-06	100,00	5	4,27E-06	100,00
10	4,08E-06	35,17	10	4,08E-06	76,84	10	4,08E-06	95,55
15	1,96E-06	16,90	15	3,42E-06	64,41	15	3,92E-06	91,80
20	1,27E-06	10,95	20	2,97E-06	55,93	20	3,85E-06	90,16
25	9,08E-07	7,83						
30	7,34E-07	6,33						
35	6,29E-07	5,42						
40	5,51E-07	4,75						

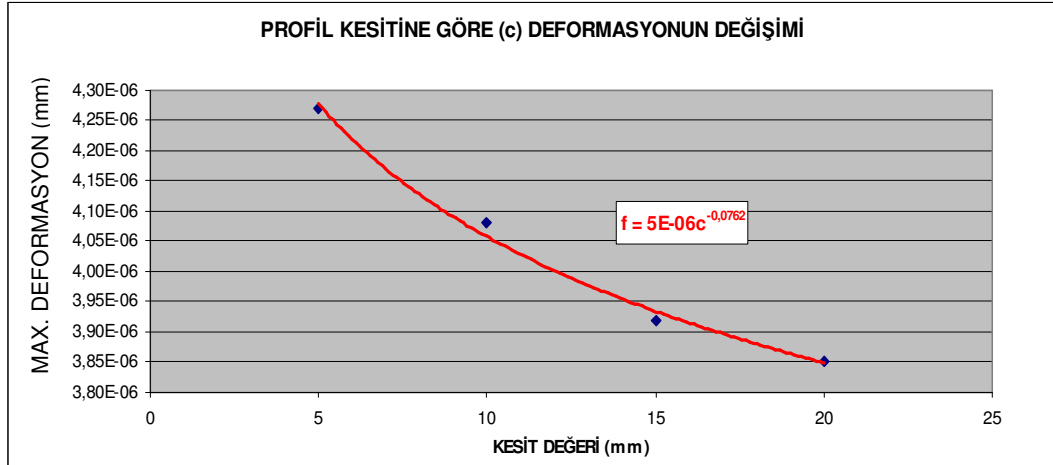
Çizelge 3.2 Kare profildeki a,b ve c parametrelerinin değişimiyle oluşan maksimum deformasyon miktarları

Çizelge 3.2’de verilen analiz sonuçları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Dikdörtgen profile sahip plakanın rijitliğini en çok etkileyen parametre profilin yüksekliği a’dır.
- Profil yüksekliği a değeri 5 mm’den 40 mm’ye değiştirildiğinde sehimde %95 değerinde bir azalma (dolayısıyla rijitlikte artış) görülmektedir. (Profil yükseklik değeri 5 mm’den 40 mm değerine çıkartılırken burkulma olayının meydana gelmediği ve tasarıma kısıt getirmediği kabul edilmiştir.)
- b parametresi c’ye göre rijitlik artışında daha etkindir.
- a parametresi arttıkça rijitliğin artış hızı azalmaktadır. Bu durum b ve c parametreleri için de geçerlidir.

Ayrıca elde edilen değerler kullanılarak üstel fonksiyonlar elde edilmiştir ve a, b ile c parametrelerinin rijitliğe olan etkileri grafiksel ve denklemsel olarak gösterilmiştir. (Şekil 3.4 )

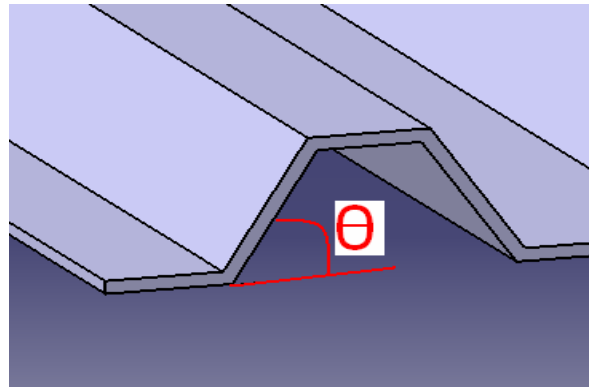




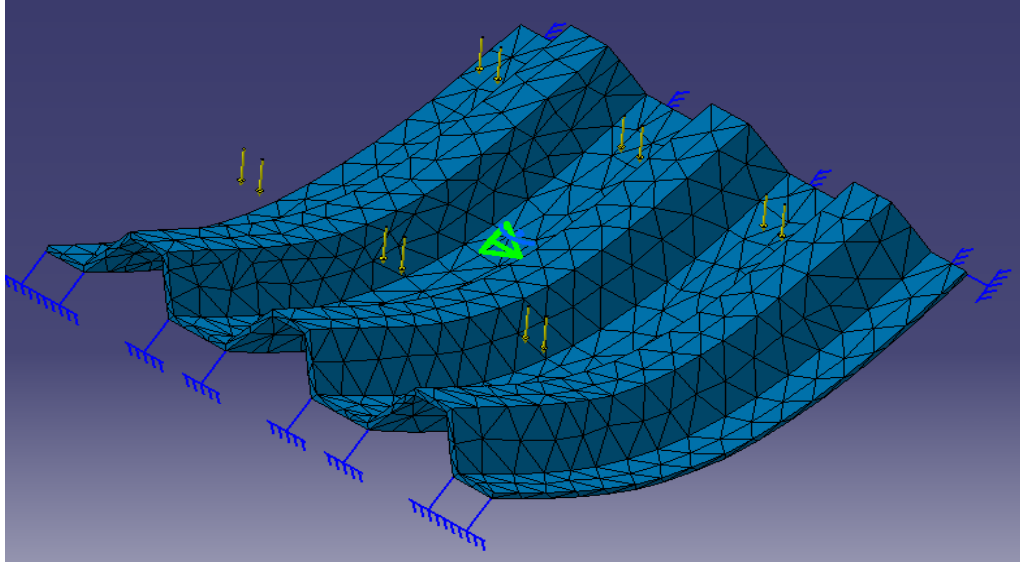
Şekil 3.6 Profil kesitine (c) göre deformasyonun değişimi

A, b, c parametrelerinin kare profile etkileri incelendikten sonra profil yüksekliğinin yani a değerinin açılı olması durumunda rijitlikte nasıl bir değişim yaratacağı incelenmiştir. (Şekil 3.7) Bu tür profillerin imalatı düşünüldüğünde tamamen dik olarak imal edilemeyecekleri açıktır.

$\Theta$  açısı 60, 67,5, 75, 82,5 ve 90 derece olarak alınıp bilgisayar destekli analiz programında maksimum deformasyonları hesaplanarak (Şekil 3.8) Çizelge 3.3 de ve bu açının deformasyon miktarına etkisi Şekil 3.9 da grafiksel olarak gösterilmiş ve bağıntısı verilmiştir.

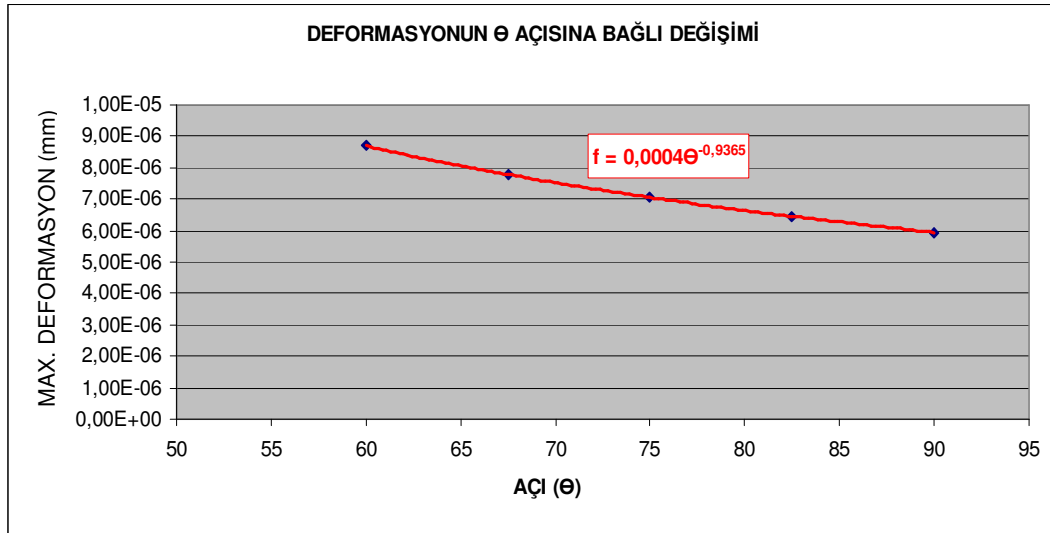


Şekil 3.7 Kare profildeki  $\Theta$  açısı



Şekil 3.8 Açılı profilin deformasyon analizi

AÇI ( $\Theta$ )	MAX. DEF. (mm)	DEFORMASYON ARTMA MİKTARI
90	5,95E-06	0,00
82,5	6,46E-06	8,57
75	7,04E-06	18,32
67,5	7,77E-06	30,59
60	8,71E-06	46,39

Çizelge 3.3  $\Theta$  Açısının değişimine bağlı deformasyon miktarıŞekil 3.9  $\Theta$  Açısındaki değişiminin maksimum deformasyon miktarına olan etkisi

Çizelge 3.3 ve Şekil 3.8 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- a)  $\Theta$  açısının azaltılması maksimum deformasyon miktarını arttırmakta yani rijitliği azaltmaktadır.
- b) Açının azaltılması deformasyon miktarını lineere yakın bir şekilde arttırmaktadır.
- c) Açı değerleri arasındaki delta aynı olmasına rağmen, değer azaldıkça deformasyon miktarındaki artım daha fazla olmuştur.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada hafif yapının temelleri üzerinde durulmuş, son yıllarda artan yenilik çalışmalarıyla ortaya çıkan bu kavramın sadece hafif malzemenin kullanılmasından ibaret olmadığı ortaya konmuştur. Aksine hafif yapının tasarım, ileri imalat teknikleri ve hafif malzemelerin optimum şartlarda bir araya getirilmesiyle elde edildiği vurgulanmıştır. Hafif yapının kendi içerisinde de seviyeleri vardır. Yüksek seviyede olan hafif yapı tasarımları daha ileri ve hafif teknoloji malzemeleri ile daha iyi üretim süreçlerini ihtiva etmektedir. Dolayısıyla bu yapıyı elde etmek daha pahalıdır. Günümüzde hafif yapıların birçok uygulama örneğini otomotiv sektöründe görebilmekteyiz.

Ayrıca değişik profillerin plaka rijitliğine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Malzemelerin rijitlikleri karşılaştırılırken daha rijit malzemede daha az sehim olacağı mantığı kullanılmıştır. Üç farklı ana grupta sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. İlk olarak benzer ölçülerde tasarlanmış olan kare ve yuvarlak profiller sonlu elemanlar metoduyla incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda hem kare hem de yuvarlak profilde boyutlar arttırıldığında (profil yüksekliği ve çapı) oluşan maksimum sehimin azaldığı dolayısıyla rijitliğin arttığı tespit edilmiştir. Her iki profilde de boyutlar eşit olarak arttırıldığında rijitlik artım miktarı azalmaktadır ve benzer boyutlara sahip olan kare profil yuvarlak profilden daha rijittir. İkinci olarak kare profilin yuvarlak profilden daha rijit olduğu anlaşıldıktan sonra, kare profildeki hangi boyutun rijitliğe en fazla etkisinin olduğu incelenmiştir. Yapılan analizler profil yüksekliğinin plaka rijitliğini en fazla etkilediğini göstermiştir. Profil yüksekliği 5 mm'den 40 mm değerine çıkartıldığında sehimin % 95 azaldığı görülmüştür. Ayrıca profil genişliğinin profiller arasındaki mesafeye göre rijitlikte daha etkin olduğu görülmüştür. Her üç parametrenin değerleri arttıkça rijitlik artım miktarı da azalmaktadır. Son olarak yapılan analizlerde ise profil yüksekliğine açı verildiğinde rijitliğin nasıl değişeceği incelenmiştir. Analiz sonucunda açının arttıkça oluşan sehimin de arttığı yani rijitliğin azaldığı sonucuna varılmıştır. Açı değerleri arasındaki fark aynı olmasına rağmen değer azaldıkça deformasyon miktarındaki artım daha fazla olmuştur. Ayrıca bu çalışma içerisinde profil yüksekliği, profil genişliği, iki profil arasındaki

mesafe ve trapez profilde bulunan açının deformasyon miktarını nasıl değiştirdiği grafiksel olarak gösterilmiş ve bununla ilgili üstel fonksiyonlar elde edilmiştir. Grafiklerdeki eğrilerden de görüldüğü gibi belirli bir seviyeden sonra rijitlikteki artışın çok az olması yapılacak olan tasarımlardaki boyut kestiriminde dikkat edilmesi gereken bir faktör olarak ön plana çıkmıştır. Bu, tasarımlarda boyutların gereksiz yere büyük seçilmesini engelleyecek bir mantık olarak kullanılabilir.

Bundan sonra yapılabilecek çalışmalardan biri sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılarak teorik olarak elde edilen denklemlerin uygulamalı olarak elde edilen denklemlerle karşılaştırılması olabilir. Ayrıca bu çalışmada analizi yapılan profillerin üretilebilirliği hususu üzerinde durulmamıştır. Dolayısıyla diğer çalışmalarda bu husus da incelenip imalat konusundaki kısıtlamalar da incelenerek ortaya konabilir. Bu tez çalışmasına paralel olarak kare profildeki profil yüksekliğinin fazla arttırıldığı durumda burkulmanın ne zaman oluşacağı, tasarıma her hangi bir kısıtlama getirip getirmeyeceği de incelenebilecek konulardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır.