

Montaj Sırası Planlama Sistemlerinde Bir Optimizasyon Yaklaşımı

Cem SİNANOĞLU

Dr.
E.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Makine Bölümü, KAYSERİ

H. Rıza BÖRKLÜ

Doç. Dr.
Gazi Üniversitesi Teknik
Eğitim Fakültesi Makine
Eğitimi, ANKARA

Bu makalede, montaj sırası planlama sistemlerine ilişkin geliştirilen bir optimizasyon yaklaşımı açıklanmaktadır. Bu yaklaşım iki kritere dayanmaktadır. Bunlar; ağırlık ve alt montaj serbestlik derecesi kriterleridir. Ağırlık kriterinde, montaj zamanını kısaltmak ve montajı kolaylaştırmak için montajın ağır parçadan hafif parçaya doğru yapılması gerekmektedir. Montaj süresinin kısaltılması montaj maliyetini azaltmaktadır. Alt montaj serbestlik derecesi kriterinde ise; düşük serbestlik derecesine sahip alt montajların seçilmesi söz konusudur. Çünkü, düşük serbestlik dereceli alt montajlarda parçaları bir arada tutabilmek kolaydır. Her iki optimizasyon kriterini de sağlayan montaj sırası optimum olarak seçilmektedir. Yapılan çalışmada, çeşitli montaj sistemleri incelenmiştir. Öncelikle bu sistemlere ait uygun montaj sıralarının belirlenmesi ve temsili gerekmektedir. Bu kapsamda, uygun montaj sıraları çeşitli montaj sınırlayıcıları ile tespit edilmiş ve ikili vektörlerin sıralı listesi ile temsil edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, uygun sıralar içerisinde en az tercih edilen sırayı da seçmektedir. Örnek sistemlerden pense, menteşe ve kavrama montaj sistemi için birer optimum montaj sırası belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Montaj sırası planlama, optimizasyon.

GİRİŞ

Montaj sırası planlama, özellikle robotlar ile yapılan montajda imalat işleminin önemli bir parçasıdır. Geleneksel yöntemlerle montaj sırası belirleme, montaj çizimlerini dikkatli bir şekilde inceleyen bir operatör tarafından yapılmaktadır. Bu işlem oldukça zor ve zaman alıcı olmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek, daha hızlı ve etkin sıra planlaması yapabilmek için son zamanlarda yaygın olarak bilgisayarlar kullanılmaya başlanmıştır.

Önceki montaj planlama sistemleri, girdilerden montaj sıralarının üretilmesi ve geometrik muhakeme bilgisi için kullanıcılara soru sormak suretiyle, montaj sıralarını oluşturan kullanıcı etkileşimli tasarlanmıştır [1,2]. Geometrik muhakeme kabiliyetinin otomatik bilgisayar destekli elde edilmesi daha sonraki yıllarda bazı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [3, 4].

Bir ürüne ait montaj sıralarının temsili için kullanılan yaklaşımlar genel olarak dört gruba ayrılabilir. Bunlar;

- Dil Temsili

Bu montaj sırası planlama yaklaşımında, montajın ve montajı oluşturan parçaların temsili için geliştirilmiş özel diller kullanılmaktadır. PADL [5], AUTOPASS [6] ve GDP [7] bu gruba giren dillerden bazılarıdır.

- Çizge Temelli Temsil

Bunlar, kullanıcı tarafından temin edildiği kadar, ürünün BDT veri dosyalarındaki mevcut bilgiyi kullanan temsil metotlarıdır. Bu tür sistemler ile montaj işlemlerinin ayrıntılı bir analizini yapmak mümkündür. Yaygın olarak kullanılan çizge temelli temsil formları; AND/OR ve yön çizgeleri [4], PETRİ ağları [8, 9, 10, 11, 12], hiyerarşik kısmi sıralama çizgeleri [13], temas çizgeleri [14], işlem ağları [15], montaj sıralama çizgesi, yönsüz bloklama çizgeleri, öncelik çizgesi ve ilişki model çizgeleri [16] olarak verilebilir.

- Sıralı Liste Temsili

Sıralı listeler ile temsil; montaj görevlerinin bir listesi, montaj işlem basamaklarının bir listesi ve bağlantı alt kümelerinin bir listesi olarak sınıflandırılabilir. Bu temsil metodunda her bir montaj sıralaması, listelerden oluşan bir küme ile temsil edilmektedir. Montaj sıralamaları, sıralı listeler ile temsil edilebildiğinden dolayı, tüm montaj sıralamalarının bir kümesini, her biri farklı bir montaj sıralamasına karşılık gelen listelerin bir kümesi ile temsil etmek mümkündür [17, 18, 19].

- Öncelik İlişkileri

Montaj sıralamalarını temsil etmek için öncelik ilişkilerinden de faydalanılmaktadır. Burada iki tip öncelik ilişkisi mevcut olup bunlar; montaj işlem basamakları ve bir bağlantının oluşturulması arasındaki öncelik ilişkileri ve farklı bağlantıların oluşturulması arasındaki öncelik ilişkileri olarak tanımlanabilmektedir. De Fazio ve Whitney [2, 20], bir ürüne ait tüm montaj sıralamalarının üretimi için kullandıkları yöntemde öncelik ilişkilerinden bir ara temsil olarak yararlanmışlardır.

AND/OR çizgeleri ve yön çizgeleri kullanan yaklaşımlarda, ürüne ait tüm montaj sıralarını kolaylıkla elde etmek mümkündür. Yön çizge yaklaşımı, büyük sistemlerde uygulanması halinde yetersiz kalmakta ve montaj sıra araştırması zor olmaktadır. Buna karşılık AND/OR çizge yaklaşımları, çok sayıda ve karmaşık parça içeren sistemlere daha kolay uygulanabilmektedir. Ancak burada, sınırlayıcı tanımında bazı güçlükler olabilmektedir. Temas çizgeleri, düz ve eğri yüzeyli parçalarda kullanılabilir. Yönsüz blokama çizge kullanımı ile, montaj karmaşıklığı hakkında bilgi alma mümkündür. Bu durum, özellikle büyük sistemlerde oldukça önemlidir. AND/OR çizgesinde, işlem karmaşıklığı ve alt montaj serbestlik derecesine bağlı olarak çizge kenarlarına bazı değerler verilmekte ve çeşitli araştırma algoritmaları kullanılarak en uygun sıralama belirlenebilmektedir.

Bu makale kapsamında, montaj sıraları yön çizgesi ile temsil edilen çeşitli montaj sistemlerinin optimum montaj sıralarının belirlenmesine yönelik olarak geliştirilen bir yaklaşım açıklanmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle örnek montaj sistemlerine ilişkin yön çizge temsilleri oluşturulmaktadır. Yön çizgesinde kök düğümünden terminal düğüme giden her bir yol mevcut sistemin uygun montaj sıralarını temsil etmektedir. Geliştirilen optimizasyon yaklaşımı ile belirlenen bu uygun sıralar içerisinde en uygun sıra belirlenebilmektedir.

Bu yaklaşım, montajı yapılan parçaları ağırlıklarına göre değerlendiren ağırlık kriteri ve alt

montajların serbestlik derecelerine göre değerlendiren alt montaj serbestlik derecesi kriterine dayanmaktadır. Ayrıca, geliştirilen yaklaşım uygun sıralar içerisinde en az tercih edilen sırayı da tespit etmektedir. Yaklaşım, üç farklı montaj sistemine uygulanmış ve doğru sonuçlar vermiştir. Bu montaj sistemleri; dört parçalı pense ve menteşe montaj sistemi ve yedi parçalı flanşlı kavrama montaj sistemleridir.

Makale içerisinde ilk kısımda, örnek montaj sistemlerinin modellenmesi açıklanmıştır. Bu amaçla, örnek sistemlerin montaj bağlantı çizgeleri oluşturulmaktadır. Sistemlere ilişkin tüm montaj sıraları ise yön çizgesi ile temsil edilmektedir. Yön çizgesinin geliştirilmesi ikinci kısımda verilmektedir. Yön çizgesi ile uygun montaj sıraları temsil edildikten sonraki aşama ise uygun sıralar içerisinde en uygun sırayı belirlemektir. Bunun için geliştirilen optimizasyon yaklaşımının kullanımı son kısımda verilmektedir.

ÖRNEK MONTAJ SİSTEMLERİ VE MODELLENMESİ

Mekanik bir montaj, kararlı bir birim oluşturan ve birbirleri ile ilişkili parçalardan oluşan bir yapıdır. Montaj sistemini modellemek için; düğümleri, montajı yapılacak parçaları ve kenarları, parçalar arası bağlantıları temsil eden bağlantı çizgesi kullanılmaktadır. Montaj bağlantı çizgesinin geliştirilmesinde;

- Montajı oluşturan her bir parçanın rijit bir nesne oluşturduğu ve geometrik şeklinin değişmeden kaldığı
- Montajı yapılacak olan parçalar arasında tanımlanan yüzeysel temasların bağlı hareket için serbestlik derecesini indirgediği
- Aynı parça çiftlerini birden fazla yolla bağlamak mümkün olmasına karşın, her bir parça çifti için sadece bir tek montaj geometrisinin bulunduğu varsayılmaktadır.

Bir montaj işlemi, her biri alt montajları birleştirmek suretiyle daha büyük alt montajlar oluşturacak olan montaj işlem basamaklarının diziliminden oluşmaktadır. Montaj işlemi, tamamen birbirinden ayrı olan parçalarla başlamakta ve bu parçaların tamamlanmış bir montajı oluşturacak biçimde uygun olarak birleştirilmesi ile bitmektedir.

- Her bir montaj işlemi ile, iki alt montajın birbirine bağlandığı

- Parçaların bağlandıktan sonra montaj işlemi tamamlanıncaya kadar birlikte kalacağı
- İki parça birbirleri ile birleştirildiğinde bunlar arasındaki tüm temasların sağlanacağı varsayımı yapılmaktadır.

Bu varsayımlar ile bir montaj, yönlü bir çizgeyle temsil edilebilmektedir. Bu çizge $\langle P, C \rangle$ şeklinde ifade edilirse;

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (1)$$

montaj bağlantı çizgesinin düğümler kümesi,

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\} \quad (2)$$

çizgenin kenarlar kümesidir.

Montaj sistemini modellemek amacıyla geliştirilen montaj bağlantı çizgesi, montaj durumunda parçalar arası yüzeysel temas ilişkileri referans alınarak oluşturulmaktadır. Örnek montaj sistemleri ve bunlara ilişkin montaj bağlantı çizgeleri Tablo 1'de verilmektedir.

MONTAJ SIRALARININ YÖN ÇİZGE TEMSİLİ

Bir montaj sistemine ilişkin tüm olası montaj sıralarını temsil etmek için yön çizge temsili kullanılmaktadır. Bu çizgenin düğümleri; vektörlerle veya parça küme bölünmeleri ile temsil edilen montaj işlem basamaklarına karşılık gelmekte, çizgenin kenarları ise; geometrik ve mekanik olarak uygun montaj işlemlerini göstermektedir. Montaj işlem basamakları vektörler veya parça küme bölünmeleri ile temsil edilmektedir. Vektör temsilde, vektörün her bir elemanı parçalar arası bağlantıların sağlanma durumunu belirtmektedir $[c_1, c_2, c_3, \dots, c_L]$. Bu eleman, iki parça arası bağlantı sağlanmış ise; "1", sağlanmamış ise "0" ile gösterilmektedir.

Parça küme bölünmeleri ile temsilde ise, montaj işlem basamakları çeşitli parça alt kümeleri içeren parça kümeleri ile temsil edilir. Örneğin, pense montaj sisteminde; parçaların birbirinden farklı konumlarda bulunduğu ilk montaj işlem basamağı; $\{\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}\}$ kümesi ile temsil edilirken, montajın tamamlandığı durum $\{a, b, c, d\}$ kümesi ile belirtilmektedir. Bu montaj işlem basamaklarının vektör gösterimi ise sırasıyla, $[00000]$ ve $[11111]$ 'dir. Pense montaj sisteminde, civata ve alt tutamak arası bağlantının (c_1) sağlandığını gösteren montaj işlem basamağının parça küme bölünmesi

temsili; $\{\{a, b\}, \{c\}, \{d\}\}$, vektör temsili ise, $[10000]$ 'dir.

Bir ürünün tüm montaj sıralarını temsil eden yön çizgesinin kodlanması amacıyla kullanılan bağlantı sağlanma şartlarının elde edilebilmesi için yön çizge düğümlerine yerleştirilen montaj işlem basamaklarının vektörler ile temsil edilmesi gerekmektedir.

Bir montaj sisteminin tüm vektör temsilleri bir montaj işlem basamağına karşılık gelmez. Montaj işlem basamağı oluşturan vektörler bağlantı çizgesi yardımıyla belirlenmektedir. Burada vektör içerisinde sağlanmış bağlantılar ve montaj bağlantı çizgesi eş zamanlı değerlendirilmektedir. Vektördeki sağlanmış bağlantılara göre bağlantı çizgesinden sağlanması gerekli bağlantılar belirlenmektedir. Bu bağlantılarda ilgili vektör temsiline sağlanmışlarsa bu vektörler bir montaj işlem basamağı oluşturmaktadır. Aksi durumlarda bir montaj işlem basamağı oluşturmazlar. Pense montaj sisteminin tüm vektör temsilleri;

[00000] [10000] [01000] [00100] [00010] [00001]
 [11000] [10100] [10010] [10001] [01001] [00101]
 [01100] [01010] [00110] [00011] [11100] [10011]
 [01110] [11010] [11001] [10110] [10101] [01101]
 [01011] [00111] [11110] [11101] [11011] [10111]
 [01111] [11111]

şeklinde elde edilmektedir. Bu vektörlerden bir montaj işlem basamağına karşılık gelenler ise;

[00000] [10000] [01000] [00100] [00010] [00001]
 [11000] [10100] [01001] [00101] [10011] [01110]
 [11111]

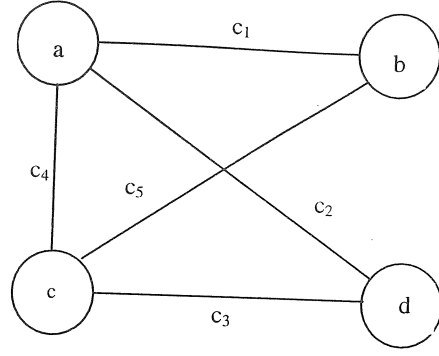
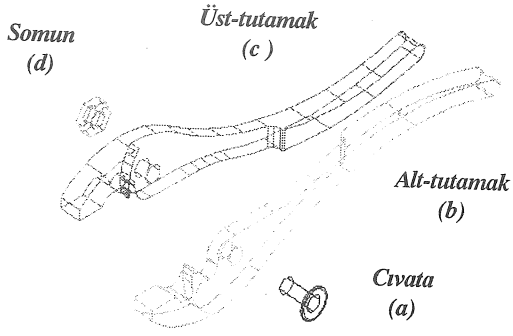
şeklinde tanımlanabilir.

Pense montaj sistemine ilişkin 32 vektör temsiline 13'ü bir montaj işlem basamağı oluşturmaktadır. Örneğin, $[10001]$ vektöründe, a ve b parçaları arası c_1 bağlantısı ve b ve c parçaları arası c_5 bağlantıları sağlanmıştır ('1').

Bu bağlantıların sağlanmış olması, a ve c parçaları arası c_4 bağlantısının sağlanmasını gerektirmektedir (Şekil 1). Ancak bu bağlantı $[10001]$ vektöründe sağlanmamış ('0') olduğundan, $[10001]$ vektörü bir montaj işlem basamağı oluşturmaz.

Tablo 1. Örnek montaj sistemleri ve bağlantı çizge temsilleri

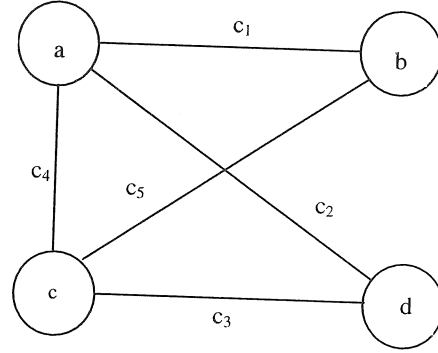
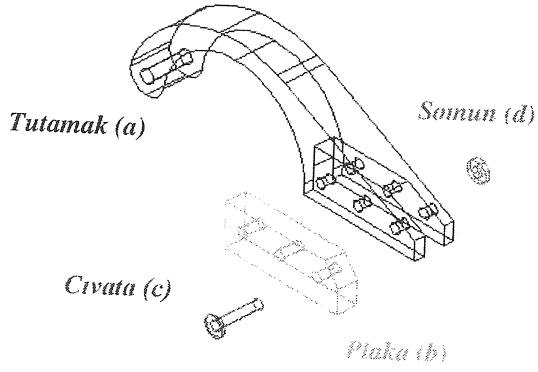
PENSE MONTAJ SİSTEMİ



Çizge düğümleri : a, b, c, d

Çizge kenarları : c_1, c_2, c_3, c_4, c_5

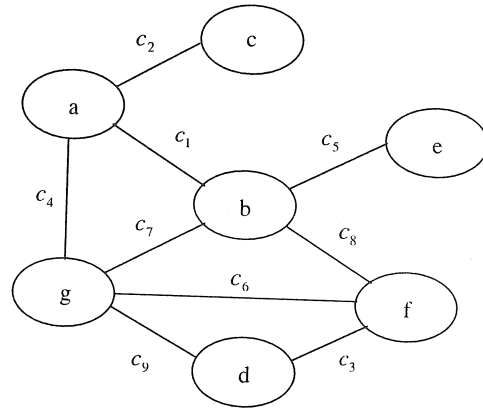
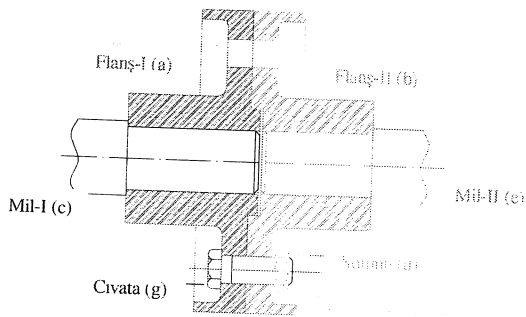
MENTEŞE MONTAJ SİSTEMİ



Çizge düğümleri : a, b, c, d

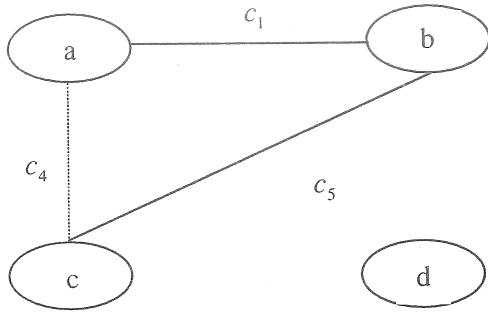
Çizge kenarları : c_1, c_2, c_3, c_4, c_5

FLANŞLI KAVRAMA MONTAJ SİSTEMİ



Çizge düğümleri : a, b, c, d, e, f, g

Çizge kenarları : $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$



Şekil 1. Pense montaj sisteminde c_1 ve c_5 bağlantılarının sağlanması durumunda c_4 bağlantısının sağlanma gereksinimi

Menteşe montaj sistemine ilişkin tüm vektör temsilleri ise;

[00000] [10000] [01000] [00100] [00010] [00001]
 [11000] [10100] [10010] [10001] [01100] [01010]
 [01001] [00110] [00101] [00011] [11100] [11010]
 [11001] [10110] [10101] [10011] [01110] [01101]
 [01011] [00111] [11110] [11101] [11011] [10111]
 [01111] [11111]

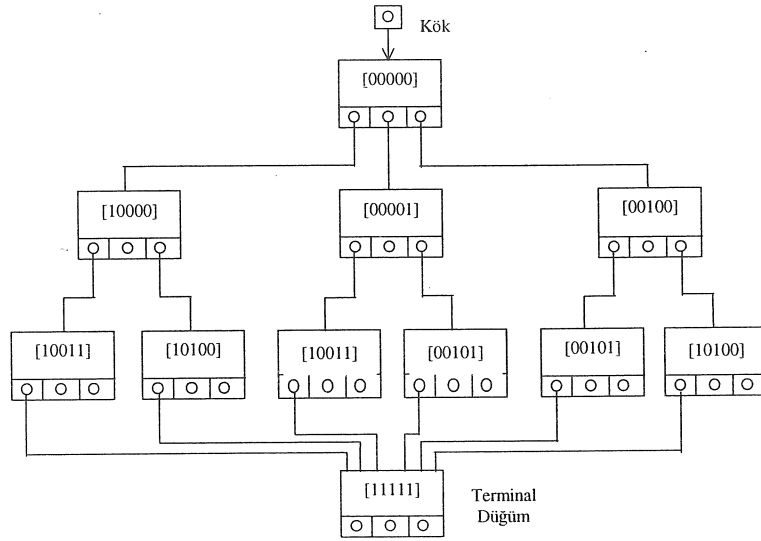
şeklinde. Bu ikili vektör temsilleri içerisinde montaj işlem basamağına karşılık gelenler;

[11000] [10100] [01001] [00101] [10011] [01110]
 [00000] [10000] [01000] [00100] [00010] [00001]
 [11111]

biçiminde belirlenmektedir. Mentеше montaj sisteminde de, 32 vektör ve 13 montaj işlem basamağı bulunmaktadır. Mentеше montaj sisteminin montaj işlem basamakları aşağıda görülmektedir.

[000000] [100000] [010000] [001000] [000100]
 [000010] [000001] [110000] [101000] [100100]
 [100010] [100001] [010010] [010001] [001010]
 [001001] [110010] [110001] [101010] [101001]
 [11111]

Yön çizgesinin oluşturulmasında, montaj işlem basamakları içerdikleri sağlanmış bağlantı sayılarına göre çizge düğümlerine yerleştirilmektedir. Yön çizgesinin kök düğümünden terminal düğüme giden her bir yol ürüne ilişkin uygun bir montaj sırasını vermektedir. Örnek montaj sistemlerinden pensenin yön çizge temsili Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Pense montaj sistemi yön çizge temsili

Pense montaj sistemine ilişkin yön çizgesinden altı uygun montaj sırasının olduğu görülmektedir. Bu montaj sıraları;

1. Montaj Sırası

{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { a, b }, { c }, { d } }	: [10000]
{ { a, b, c }, { d } }	: [10011]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]

3. Montaj Sırası

{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { b, c }, { a }, { d } }	: [00001]
{ { a, b, c }, { d } }	: [10011]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]

5. Montaj Sırası

{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { c, d }, { a }, { b } }	: [00100]
{ { c, d, b }, { a } }	: [00101]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]

2. Montaj Sırası

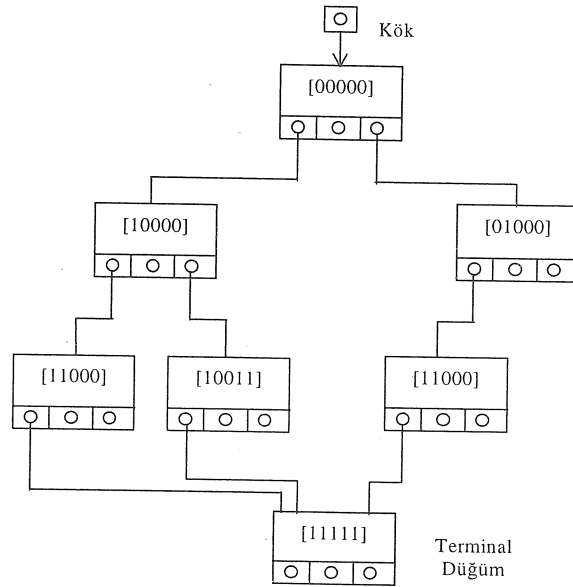
{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { a, b }, { c }, { d } }	: [10000]
{ { a, b }, { c, d } }	: [10100]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]

4. Montaj Sırası

{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { b, c }, { a }, { d } }	: [00001]
{ { b, c, d }, { a } }	: [00101]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]

6. Montaj Sırası

{ { a }, { b }, { c }, { d } }	: [00000]
{ { c, d }, { a }, { b } }	: [00100]
{ { c, d }, { a, b } }	: [10100]
{ { a, b, c, d } }	: [11111]



Şekil 3. Menteşe montaj sistemi yön çizge temsili

Menteşe montaj sisteminin yön çizge temsili Şekil 3'de gösterilmektedir.

Menteşe montaj sisteminde de yön çizgesinin kök düğümünden terminal düğümüne giden her bir yol uygun bir montaj sırasına karşılık gelmektedir.

Burada, üç uygun montaj sırası belirlenmiştir. Bu uygun montaj sıraları aşağıda görülmektedir.

1. Montaj Sırası

$\{ \{ a \}, \{ b \}, \{ c \}, \{ d \} \}$: [00000]
$\{ \{ a, b \}, \{ c \}, \{ d \} \}$: [10000]
$\{ \{ a, b, d \}, \{ c \} \}$: [11000]
$\{ \{ a, b, c, d \} \}$: [11111]

2. Montaj Sırası

$\{ \{ a \}, \{ b \}, \{ c \}, \{ d \} \}$: [00000]
$\{ \{ a, b \}, \{ c \}, \{ d \} \}$: [10000]
$\{ \{ a, b, c \}, \{ d \} \}$: [10011]
$\{ \{ a, b, c, d \} \}$: [11111]

3. Montaj Sırası

$\{ \{ a \}, \{ b \}, \{ c \}, \{ d \} \}$: [00000]
$\{ \{ a, d \}, \{ b \}, \{ c \} \}$: [01000]
$\{ \{ a, b, d \}, \{ c \} \}$: [11000]
$\{ \{ a, b, c, d \} \}$: [11111]

Flanşlı kavrama montaj sistemine ilişkin 370 uygun montaj sırası belirlenmiştir. Bu sıralardan bir kısmı Tablo 2'de verilmektedir.

Yön çizgesinin düğümlerine yerleştirilen montaj işlem basamaklarının her birisi, montaj sırası oluşturmaya yönelik bazı sınırlayıcıları sağlamaktadır. Bu sınırlayıcılar; geometrik ve mekanik uygunluk, alt montaj ve kararlılık sınırlayıcılarıdır. Bu şartların tümünü sağlayan montaj işlem basamakları yön çizge düğümlerine yerleştirilir.

Geometrik uygunluk sınırlayıcısı montaj işlem basamağının belirttiği montaj işleminin geometrik olarak uygun olmasını ifade etmektedir. Örneğin pense montaj sisteminde, civata (a) ve somun (d) parçaları arası c_2 bağlantısının sağlandığını belirten [01000] vektörü bir montaj işlem basamağı oluşturur. Ancak, civata ve somun bir kez monte edildikten sonra oluşan bu alt montaja alt-tutamak ve üst-tutamağın montajı olanaksızdır. Dolayısıyla bu montaj işlem basamağı geometrik olarak uygun değildir ve yön çizgesinde yer almamalıdır.

Alt montaj sınırlayıcısı ise, montaj işlem basamağının alt montaj şartını sağlama durumunu ifade etmektedir. Bir montaj işlem basamağı, içerisinde montaj bağlantı çizgesinde bulunmayan bir bağlantıyı içermediği sürece bir alt montaj oluşturmaktadır.

Örneğin menteşe montaj sisteminde plaka (b) ve somun (d) parçaları arası bağlantının sağlandığını gösteren $\{ \{ b, d \}, \{ a \}, \{ c \} \}$ montaj işlem basamağı alt montaj şartını sağlamaz. Çünkü burada menteşe montaj bağlantı çizgesinde aralarında bağlantı olmayan iki parçanın birbirine bağlandığını gösteren $\{ b, d \}$ alt kümesi bulunmaktadır. Vektör temsilleri bağlantı çizgesinde olmayan bir bağlantıyı içermediğinden dolayı bunların her biri bir alt montaj oluşturmaktadır.

Kararlılık sınırlayıcısında yerçekimi kuvveti etkisi altında parçalar arası bağlantının çözülmemesi söz konusudur. Yapılan çalışmada, alt montaj şartını sağlayan tüm montaj işlem basamaklarının kararlı bir yapı oluşturduğu varsayımı yapılmaktadır.

Tablo 2. Flanşlı kavrama montaj sistemi için örnek montaj sıraları

000000000	100000000	110000000	110010000	111010000	111010010	111111111
000000000	100000000	110000000	110010000	110011000		111111111
000000000	100000000	110000000	110010000	110010010	111010010	111111111
000000000	100000000	110000000	110010000	110010010	111010010	111111111
000000000	100000000	110000000	110010000	110010001		111111111

MONTAJ SIRALARI OPTİMİZASYONU

Bu kısım kapsamında, montaj sırası planlama sistemi için geliştirilen optimizasyon yaklaşımı açıklanmaktadır. Bu amaçla, örnek montaj sistemleri kullanılmaktadır. Önceki kısımda, bu örnek sistemlere ilişkin uygun montaj sıraları elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım iki temel kritere dayanmaktadır. Bunlardan ilkinde; montaj işlem basamakları ağırlıklarına göre değerlendirilmekte ikincisinde ise, işlem basamaklarının belirttiği alt montajların serbestlik dereceleri dikkate alınmaktadır. Böylece, yön çizgesinde her bir montaj işlem basamağına giren çizge kenarlarına belirli ağırlıklar (maliyet) verilmektedir. İki kritere göre maliyetleri belirlenen yön çizgesinde, kökten terminal düğüme giden her bir yolun (montaj sırası) toplam maliyet değerleri hesaplanmaktadır. Sonuçta minimum maliyete sahip montaj sırası optimum olarak seçilmektedir. Geliştirilen bu yaklaşım ile sadece en uygun montaj sırası belirlenmeyip, uygun sıralar içerisinde en az uygun olanları da tespit edilmektedir.

Ağırlık Kriterine Göre Optimizasyon

Montaj sıraları içerisinde optimumu belirlemek için, montaj sıralarını oluşturan tüm montaj işlem basamakları dikkate alınmalıdır. Burada amaç, öncelikle büyük kütleli veya hacimli parçaları temel parça (*Base Part*) olarak seçmek ve daha küçük ağırlıklı veya hacimli parçalara doğru montajı gerçekleştirmektir. Böylece, en küçük hacimli parçalar montajda kullanılan bağlayıcı elemanlar (civata, somun v.s.) olmaktadır.

Parça ağırlıkları veya hacimleri, kullanılan katı modelleme programında dosya olarak oluşturulmaktadır. Bu dosyalardan, ilgili parçaların ağırlık veya hacim değerleri alınmaktadır. Buna göre, en ağır parçadan başlayarak, hafif parçaya doğru gerçekleşen bir montaj işlemindeki, montaj işlem basamaklarının ağırlıkları belirlenmektedir. Bu ise, montaj işlem basamağı içerisindeki sağlanmış bağlantıların ağırlıklarını toplayarak bulunmaktadır. Böylece, her bir montaj işlem basamağının ağırlık (maliyet) değerleri tespit edilmektedir. Bu aşamadan sonra, farklı montaj işlem basamakları için, hesaplanan bu maliyet değerleri referans alınır. Montaj sıralarını oluşturan her bir montaj işlem basamağının belirlenmiş ağırlık değerleri ile, olması gereken ağırlık değerleri (optimum ağırlık) farkı hesaplanır. Bu ağırlık farkları birim ağırlık maliyeti (100) ile çarpılır. Dolayısıyla, tüm montaj işlem basamaklarının ağırlık maliyetleri bu şekilde belirlenir. Ağırlık kriterine göre maliyetleri

hesaplanmış olan yön çizgesinde, kökten terminal düğüme giden her bir yolun ağırlık maliyet değerleri (toplam maliyet) hesaplanır. Sonuçta en düşük maliyet değerine sahip olan montaj sırası ağırlık kriterine göre optimum olarak bulunur.

Ağırlık kriterine göre optimum montaj sırasında bulunan her bir montaj işlem basamağındaki sağlanmış bağlantıların ağırlıkları toplamı;

$$Ow_{m,j} = \sum_{i=1}^n (W)_O \text{ (Optimum Ağırlık)} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada W ; sağlanmış bağlantıların ağırlığı, (n); sağlanmış bağlantıların sayısı ve (m); montaj işlem basamaklarının seviyesi ve (j) ise ürünün değerlendirilmekte olan montaj sırasını göstermektedir. Ow_m ; optimum montaj sırasındaki montaj işlem basamaklarının optimum ağırlıklarıdır.

Ağırlık kriterine göre optimum montaj sırasını belirleyebilmek için, uygun montaj sıralarının her bir montaj işlem basamağının ağırlıkları hesaplanmalıdır. Bu ağırlıklar ilgili montaj işlem basamağında bulunan sağlanmış bağlantıların ağırlıkları toplamı olup;

$$Cw_{m,j} = \sum_{i=1}^n (W)_H \text{ (Hesaplanan Ağırlık)} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, W ; montaj işlem basamağındaki sağlanmış bağlantıların ağırlığı, (n); sağlanmış bağlantı sayısı, (m); montaj işlem basamağı seviyesi ve (j) ise montaj sırasını belirtir.

Uygun montaj sıralarına ait tüm montaj işlem basamaklarının optimum ve hesaplanan ağırlık değerleri belirlendikten sonra, optimum ağırlık değerleri referans olarak alınır. Hesaplanan ağırlıklar ve optimum ağırlıklar arası fark belirlenir. Ağırlık farkı;

$$Dw_{m,j} = Ow_{mj} - Cw_{mj} \quad (5)$$

biçiminde tanımlanmaktadır. Uygun sıralardaki her bir montaj işlem basamağı için belirlenen ağırlık farkları birim ağırlık maliyeti ($U_{wv} = 100$) ile çarpılır. Çarpım sonucu elde edilen Wc_m , montaj işlem basamaklarının ağırlık maliyetleridir. Burada, (m) montaj işlem basamağı seviyesini göstermektedir. (j) montaj sırasındadır.

$$Wc_{m,j} = Dw_{m,j} \cdot U_{wv} \quad (6)$$

Herhangi bir uygun montaj sırasının toplam ağırlık maliyeti;

$$W_{t,j} = \sum_{i=1}^l ((Wc)_{mj}) = \sum_{i=1}^l ((Ow_{mj} - Cw_{mj})xUwv) =$$

$$= \sum_{i=1}^l \left(\left(\sum_{i=1}^n W \right)_O - \left(\sum_{i=1}^n W \right)_H \right) xUwv \quad (7)$$

biçiminde hesaplanır. Burada, (l) uygun montaj sırasındaki montaj işlem basamaklarının sayısıdır. En düşük Wt toplam ağırlık maliyetine sahip montaj sırası ağırlık kriterine göre optimum olarak seçilmektedir. Bu ifade de (j) montaj sırasını göstermektedir.

Örnek olarak montaj sistemine ilişkin uygun montaj sıraları bir yön çizgesi ile temsil edilebilir. Bu durumda, ağırlık kriterine göre, yön çizgesinde kök düğümünden terminal düğüme kadar tüm montaj işlem basamaklarının ağırlık maliyetleri belirlenerek, her bir montaj sırasının toplam ağırlık maliyet değerleri bulunabilir. Sonuçta, minimum toplam ağırlık

maliyetine sahip olan montaj sırası optimum olarak tespit edilir.

Montaj Parçaları Özellikleri (Ağırlık ve Hacim)

Montajı oluşturan parçaların özellikleri, kullanılan katı modelleme programından doğrudan alınmaktadır. Bunun için katı modelleme programının, montaj (Assembly) kısmı altındaki, Analiz (Analysis) özelliğinden, kütle özellikleri (Mass Properties) seçilmektedir. Buradan, montaj birimi (Assembly Units); mm, Ağırlık birimi; kg, koordinat sistemi; WCS (World Coordinate System), ve malzeme olarak ta yumuşak çelik (Mild Steel) seçilmiştir. Belirlenen bu özelliklere göre her bir parçanın ağırlık, hacim veya moment gibi değerlerini içeren bir dosya oluşturulmaktadır.

Pense montaj sistemine ilişkin parça özellikleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Pense montaj sistemi için parça özellikleri

Parça/Alt montaj	Civata (a)	Alt-Tutamak (b)	Üst-Tutamak (c)	Somun (d)
Ağırlık (kg)	0.0163	0.3843	0.3843	0.0092

Tablodan, alt-tutamak ve üst-tutamak parçalarının aynı ağırlık veya hacim değerine sahip olduğu görülmektedir. Ağırlığı en az olan parça ise, somundur. Geliştirilen ağırlık kriteri optimizasyon yaklaşımında, ağırlık açısından en uygun sıraların;

- Alt-Tutamak (0.3843 kg), Üst-Tutamak (0.3843 kg), Civata (0.0163 kg), Somun (0.0092 kg)
- Üst-Tutamak (0.3843 kg), Alt-Tutamak (0.3843 kg), Civata (0.0163 kg), Somun (0.0092 kg)

olduğu belirlenmektedir. Bu montaj sıraları, küme ayrışmaları ve vektörler ile temsil edilebilir. Bu durumda;

- {{a}, {b}, {c}, {d}} [00000] (1. montaj işlem basamağı)
- {{b,c}, {a}, {b}} [00001] (2. montaj işlem basamağı)
- {{b,c,a}, {d}} [10011] (3. montaj işlem basamağı)
- {{a, b, c, d}} [11111] (4. montaj işlem basamağı)
- {{a}, {b}, {c}, {d}} [00000] (1. montaj işlem basamağı)
- {{c,b}, {a}, {d}} [00001] (2. montaj işlem basamağı)
- {{c,b,a}, {d}} [10011] (3. montaj işlem basamağı)
- {{a, b, c, d}} [11111] (4. montaj işlem basamağı)

elde edilmektedir. Bu montaj sıralarından, her bir montaj işlem basamağında olması gereken toplam sağlanmış bağlantı ağırlıkları belirlenmektedir.

Pense montaj sisteminde, 2. montaj işlem basamağında; (b) ve (c) parçaları arası; c_5 bağlantısı sağlanmıştır. 3. montaj işlem basamağında, bu bağlantıya ilaveten, (a) ve (b) parçaları arası; c_1 ile (c) ve (a) parçaları arası; c_4 bağlantıları sağlanmıştır. 4. montaj işlem basamağında ise, parçalar arası tüm bağlantılar sağlanmıştır. Her bir bağlantı ağırlığı;

$$\text{Ağırlık } (c_1) = \text{Ağırlık (a)} + \text{Ağırlık (b)} =$$

$$0.0163 + 0.3843 = 0.4006 \text{ kg}$$

$$\text{Ağırlık } (c_2) = \text{Ağırlık (a)} + \text{Ağırlık (d)} =$$

$$0.0163 + 0.0092 = 0.0255 \text{ kg}$$

$$\text{Ağırlık } (c_3) = \text{Ağırlık (c)} + \text{Ağırlık (d)} =$$

$$0.3843 + 0.0092 = 0.3935 \text{ kg}$$

$$\text{Ağırlık } (c_4) = \text{Ağırlık (a)} + \text{Ağırlık (c)} =$$

$$0.0163 + 0.3843 = 0.4006 \text{ kg}$$

$$\text{Ağırlık } (c_5) = \text{Ağırlık (b)} + \text{Ağırlık (c)} =$$

$$0.3843 + 0.3843 = 0.7686 \text{ kg}$$

şeklinde belirlenmektedir. Buradan, 2., 3. ve 4. montaj işlem basamaklarında olması gereken toplam bağlantı ağırlıkları belirlenebilir. Buna göre;

2. Montaj İşlem Basamağı:

Bu montaj işlem basamağında c_5 bağlantısı sağlanmıştır. Dolayısıyla sağlanmış bağlantıların sayısı $n = 1$ olmaktadır. Ayrıca, bu montaj işlem basamağı optimum montaj sırasında 2. seviyede olduğundan $m = 2$ 'dir. Bu montaj işlem basamağının optimum ağırlığı;

$$Ow_{2,1} = \sum_{i=1}^{n=1} (W)_O = W(c_5) = 0.7686kg$$

olarak hesaplanmaktadır.

3. Montaj İşlem Basamağı:

Bu montaj işlem basamağında, c_1 , c_4 ve c_5 bağlantıları sağlanmıştır. Dolayısıyla montaj işlem basamağındaki sağlanmış bağlantıların sayısı $n = 3$ ve montaj işlem basamağı seviyesi ise $m = 3$ 'dür. Bu montaj işlem basamağının optimum ağırlığı;

$$Ow_{3,1} = \sum_{i=1}^{n=3} (W)_O = W(c_1) + W(c_4) + W(c_5) = 0.4006 + 0.4006 + 0.7686 = 1.5698kg$$

4. Montaj İşlem Basamağı:

Bu montaj işlem basamağında parçalar arası tüm bağlantılar sağlanmıştır. Dolayısıyla, sağlanmış bağlantıların sayısı $n = 5$ 'dir. Ayrıca, bu montaj işlem basamağı 4. seviyede bulunmaktadır ($m = 4$). Bu montaj işlem basamağının optimum ağırlığı;

$$Ow_{4,1} = \sum_{i=1}^{n=5} (W)_O = W(c_1) + W(c_2) + W(c_3) + W(c_4) + W(c_5) = 0.4006 + 0.0255 + 0.3935 + 0.4006 + 0.7686 = 1.9888kg$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Dolayısıyla pense montaj sisteminde, optimum bir montaj sırasında olması gereken optimum montaj işlem basamak ağırlıkları;

$$Ow_{2,1} = 0.7686kg$$

$$Ow_{3,1} = 1.5698kg$$

$$Ow_{4,1} = 1.9888kg$$

olarak hesaplanmıştır. Ağırlık kriterine göre optimum montaj sırasının belirlenebilmesi için, hesaplanan bu ağırlık değerleri referans alınarak, pense montaj

sistemine ilişkin uygun montaj sıralarını oluşturan her bir montaj işlem basamağının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Pense montaj sistemine ilişkin montaj sıraları ve bunların değerlendirilmesi şu şekilde verilebilir;

• 1. Montaj Sırası

$$\{ \{ a \}, \{ b \}, \{ c \}, \{ d \} \} : [00000]$$

$$\{ \{ a, b \}, \{ c \}, \{ d \} \} : [10000]$$

$$\{ \{ a, b, c \}, \{ d \} \} : [10011]$$

$$\{ \{ a, b, c, d \} \} : [11111]$$

Bu montaj sırası için montaj işlem basamaklarında elde edilen ağırlık değerleri şu şekilde bulunabilir;

• 2. Montaj İşlem Basamağı:

$$\{ \{ a, b \}, \{ c \}, \{ d \} \}, [10000]$$

Bu montaj işlem basamağında, (a) ve (b) parçaları birleştirilmiş ve c_1 bağlantısı sağlanmıştır. Bu montaj işlem basamağının hesaplanan ağırlığı;

$$Cw_{2,1} = \sum_{i=1}^1 (W)_H = W(c_1) = 0.4006kg$$

olarak hesaplanır.

Bu montaj işlem basamağında, optimum ağırlık ve hesaplanan ağırlık arası fark;

$$Dw_{2,1} = Ow_{2,1} - Cw_{2,1} = 0.7686 - 0.4006 = 0.368kg$$

şekindedir. Bu ağırlık farkı birim ağırlık maliyeti $U_{wv} = 100$ ile çarpılırsa, pense montaj sisteminin 1. montaj sırasının 2. montaj işlem basamağının ağırlık maliyeti belirlenebilir.

$$Wc_{2,1} = Dw_{2,1} \cdot U_{wv} = 0.368 \times 100 \cong 37$$

• 3. Montaj İşlem Basamağı :

$$\{ \{ a, b, c \}, \{ d \} \}, [10011]$$

Bu montaj işlem basamağında, (a) ve (b) parçaları arası; c_1 , (a) ve (c) parçaları arası; c_4 ve (b) ve (c) parçaları arası; c_5 bağlantısı sağlanmıştır. Bu montaj işlem basamağının hesaplanan ağırlığı;

$$Cw_{3,1} = \sum_{i=1}^3 (W)_H = W(c_1) + W(c_4) + W(c_5) = 0.4006 + 0.4006 + 0.7686 = 1.5698kg$$

olarak elde edilir. Optimum ağırlığı $Ow_{3,1} = 1.5698kg$ olup ağırlıklar farkı;

$$Dw_{3,1} = Ow_{3,1} - Cw_{3,1} = 1.5698 - 1.5698 = 0 \text{ kg}$$

olmaktadır. Bu değer birim ağırlık maliyeti ile çarpıldığında, 1. Montaj sırasına ait bu montaj işlem basamağının ağırlık maliyeti;

$$Wc_{3,1} = Dw_{3,1} \cdot U_{wv} = 0 \times 0 = 0$$

olarak hesaplanır.

4. montaj işlem basamağında tüm bağlantılar sağlanmıştır. Bu basamağın optimum ağırlığı 1.9888 kg'dır. Bu ağırlık değeri, 4. montaj işlem basamağının hesaplanan ağırlık değerine eşit olduğundan, ağırlıklar arasındaki fark "0 kg" olarak elde edilir. Bu değerin birim ağırlık maliyeti ile çarpımı sonucunda, "0" maliyeti elde edilmektedir.

Benzer işlemler pense montaj sistemine ait diğer uygun montaj sıralarına da uygulanmaktadır. Sonuçta, pense montaj sistemine ait uygun montaj sıralarında yer alan tüm montaj işlem basamaklarının ağırlık maliyetleri belirlenir. Ancak, 1. ve 4. montaj işlem basamakları tüm montaj sıralarında aynı olduklarından optimum montaj sırasının toplam ağırlık değerinin belirlenmesinde dikkate alınmayabilir. Pense montaj sistemi için uygun sıraların montaj işlem basamakları ağırlık maliyetleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Buradan, ağırlık kriterine göre optimize edilen sıralardan en dşuk maliyetlisinin 3. montaj sırası olduğu görülmektedir. Bu sıranın toplam ağırlık maliyeti;

$$Wt,3 = Wc_{2,3} + Wc_{3,3} = 0 + 0 = 0$$

olarak hesaplanmıştır.

rnek montaj sistemlerinden, menteşe montaj sisteminin parça ağırlıkları; tutamak; 4.9253 kg, plaka; 2.8192 kg, cıvata; 0.0638 kg, somun; 0.0158 kg'dır. Menteşe montaj sisteminin montaj sıraları dört farklı montaj işlem basamağından oluşmaktadır. Bu montaj işlem basamaklarının ilki; [00000] ve sonucusu [11111]'dir. Bunlar tüm montaj sıraları için aynı olduğundan değerlendirilmesine gerek yoktur. Menteşe montaj sistemine ait montaj sıralarının hesaplanan ağırlık maliyetleri Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablodan menteşe montaj sistemi için ağırlık kriterine göre en optimum sıranın 2. montaj sırası olduğu görülmektedir. Bu sıranın toplam ağırlık maliyeti $Wt,2 = 0$ olarak hesaplanmıştır.

Diğer bir örnek montaj sistemi olan flanşlı kavrama montaj sistemine ait parça ağırlıkları ise; Flanş-I; 0.3945 kg, Flanş-II; 0.345 kg, Mil-I; 0.25 kg, Somun; 0.25 kg, Mil-II; 0.0165 kg, Rondela; 0.0093 kg ve Cıvata; 0.0042 kg'dır. Bu montaj sistemine ilişkin örnek montaj sıralarına ilişkin çeşitli montaj işlem basamaklarının ağırlık maliyetleri Tablo 6'da görülmektedir. Ayrıca, montaj sıralarının toplam ağırlık maliyetleri ve optimum montaj sırası bu tabloda gösterilmiştir. Bu tabloda hesaplanan ağırlıklar ($Cw_{m,j}$), tırnak " " içerisinde verilmiştir.

Tablo 4. Pense montaj sisteminin uygun montaj sıralarının montaj işlem basamakları ağırlık maliyetleri

1. montaj sırası		2. montaj sırası		3. montaj sırası	
$Wc_{2,1} = 37$	$Wc_{3,1} = 0$	$Wc_{2,2} = 38$	$Wc_{3,2} = 78$	$Wc_{2,3} = 0$	$Wc_{3,3} = 0$
4. montaj sırası		5. montaj sırası		6. montaj sırası	
$Wc_{2,4} = 0$	$Wc_{3,4} = 41$	$Wc_{2,5} = 38$	$Wc_{3,5} = 41$	$Wc_{2,6} = 38$	$Wc_{3,6} = 79$

Tablo 5. Menteşe montaj sisteminin uygun montaj sıralarının montaj işlem basamakları ağırlık maliyetleri

1. montaj sırası		2. montaj sırası		3. montaj sırası	
$Wc_{2,1} = 0$	$Wc_{3,1} = 293$	$Wc_{2,2} = 0$	$Wc_{3,2} = 0$	$Wc_{2,3} = 280$	$Wc_{3,3} = 293$

Tablo 6. Flanşlı kavrama montaj sistemine ilişkin birkaç montaj sırası ağırlık maliyeti

MONTAJ İŞLEM BASAMAKLARI AĞIRLIK MALİYETLERİ							
Bağlantı Sağlanmamış	Tek Bağlantı Sağlanmış	İki Bağlantı Sağlanmış	Üç, dört veya beş bağlantı Sağlanmış			Tüm bağlantılar sağlanmış	Wt, j
	$Cw_{2,j}$	$Cw_{3,j}$	$Cw_{3,j}, Cw_{4,j}, Cw_{5,j}, Cw_{6,j}$				
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	011010000 "75"			111111111	101
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	011010000 "75"	011010010 "120"	111010010 "43"	111111111	264
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	011010000 "75"	011010010 "120"		111111111	221
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	010110000 "35"			111111111	61
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	010110000 "35"	010111000 "116"		111111111	177
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	010110000 "35"	010110010 "80"		111111111	141
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	010110000 "35"	010110001 "116"		111111111	177
000000000	010000000 "12"	010010000 "14"	010011000 "74"	110011000 "80"		111111111	180

Bu montaj sisteminde de ilk ve son montaj işlem basamakları aynı olduğundan bu işlem basamaklarının ağırlık maliyetlerinin belirlenmesine gerek yoktur. Bu kritere göre flanşlı kavramaya ait optimum montaj sırası ağırlık maliyeti "61" olarak hesaplanmıştır.

Alt Montaj Serbestlik Derecesi Kriterine Göre Optimizasyon

Alt montaj serbestlik derecesi kriteri, minimum serbestlik dereceli montaj işlem basamaklarının seçilmesi esasına dayanmaktadır. Bir alt montajı oluşturan parçalar arası serbestlik derecesi ne kadar az olursa, bu parçaların bir arada tutulabilmesi ve montajı daha kolay olmaktadır. Bu kriterde, montaj işlem basamaklarının maliyet değerlerini hesaplamak için birim serbestlik derecesi maliyeti kullanılmaktadır. Alt montaj serbestlik derecesi, ağırlık kriterinden daha önemli olduğundan, ağırlık birim maliyetine göre daha küçük bir birim değer belirlenmiştir. Serbestlik derecesi birim maliyeti ($Udofv = 25$) alınmaktadır.

Bu optimizasyon yaklaşımında, öncelikle montaj sıralarını oluşturan her bir montaj işlem basamağındaki sağlanmış bağlantılar dikkate alınmaktadır. Bu bağlantıları oluşturan parça çiftleri için kartezyen koordinat sisteminin altı yönü boyunca çarpışma serbestlikleri belirlenmektedir. Elde edilen serbestlik dereceleri birim serbestlik maliyeti ile çarpılarak, yön çizgesindeki her bir montaj işlem basamağına giren çizge kenarına verilecek serbestlik maliyetleri hesaplanmaktadır.

Bir montaj işlem basamağını oluşturan parça çiftlerinin kesişim ilişkilerinden belirlenen toplam serbestlik derecesi ($Tdof_{s,j}$) olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, uygun bir montaj sırasında bulunan herhangi bir montaj işlem basamağının alt montaj serbestlik derece maliyeti;

$$DOF_{c,s,j} = Tdof_{s,j} \times Udofv \quad (8)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, (s); montaj işlem basamağının seviyesini, (j) ise montaj sırasını göstermektedir. Uygun bir montaj sırasının toplam serbestlik derece maliyeti ise;

$$DOF_{ct} = \sum_{i=1}^z DOF_{c,s,j} \quad (9)$$

olarak hesaplanır. Burada (z); bir montaj sırasında bulunan montaj işlem basamaklarının toplam sayısınıdır.

Bir ürünün toplam maliyetini hesaplamak için her iki optimizasyon kriterinin de dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla, uygun montaj sıralarının toplam maliyeti bir maliyet fonksiyonu (fc) ile gösterilebilir.

$$fc = Wt, j + DOF_{ct}$$

$$fc = \sum_{i=1}^l ((Wc)_{mj}) = \sum_{i=1}^l ((Ow_{mj} - Cw_{mj}) \times U_{wv}) = \sum_{i=1}^l \left(\left(\sum_{i=1}^n W \right)_O - \left(\sum_{i=1}^n W \right)_H \right) \times U_{wv} + Tdof_{s,j} \times Udofv \quad (10)$$

Parça çiftleri arası çarpışma serbestlikleri, kartezyen koordinat sisteminin altı yönü boyunca parçalar arası kesişim durumlarını temsil eden kesişim matrislerinden elde edilmektedir.

Pense montaj sistemine ilişkin kesişim matrisleri Tablo 7'de görülmektedir. Kesişim matrisleri, kartezyen koordinat sisteminin $\{+x,+y,+z,-x,-y,-z\}$ yönleri dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Bu matrislerde montaj sistemini oluşturan parçalar aşağıda gösterildiği gibi matrisin satır ve sütunlarına yerleştirilmektedir.

$$\begin{array}{cccc}
 & a & b & c & d \\
 A = & b & & & \\
 & c & & & \\
 & d & & &
 \end{array}$$

Kesişim matrislerini elde etmek için, montajı oluşturan parçaların birleştirilmesi esnasındaki çarpışma durumları dikkate alınmaktadır. Bu işlemde parçalar arası çarpışma mevcutsa, kesişim matris elemanı '0'; çarpışma yoksa, '1' değerini alır. Örnek montaj sistemlerinden ilki dört parçadan oluşan pense montaj sistemidir.

Örnek pense montajında, civatanın (a), $\{+x\}$ eksenini boyunca hareketi, diğer parçalar tarafından engellenmemektedir. Böylece bu eksen yönündeki çarpışma durumlarını tanımlayan A_x kesişim matrisinin ilk satır elemanları '1' olur. Ancak alt-tutamağın (b), $\{+x\}$ eksenini yönündeki hareketi civata tarafından engellenmektedir (Tablo 1). Buradaki çarpışma ilişkisini gösteren, A_x kesişim matrisinin 2. satır 1. sütun elemanı '0' olur.

Tablo 7. Pense sistemine ilişkin kesişim matrisleri ve çizge gösterimleri

	$A_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		$A_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
	$A_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$		$A_{-x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
	$A_{-y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$		$A_{-z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

Pense montaj sistemine ait montaj işlem basamaklarının serbestlik derece maliyetleri şu şekilde hesaplanabilir.

• **[10000] montaj işlem basamağı**

Bu montaj işlem basamağında $\{a\}$ ve $\{b\}$ parçaları arası c_1 bağlantısı sağlanmıştır. Bu parça çiftleri arası hareket serbestlikleri Tablo 8'de görülmektedir.

Tablo 8. $\{a\}$ ve $\{b\}$ parçaları arası hareket serbestlikleri

$c_1 \Rightarrow (a \div b)$	+x	+y	+z	-x	-y	-z
a/b	1	0	0	0	0	0
b/a	0	0	0	1	0	0

Buradan, [10000] montaj işlem basamağı için serbestlik derecesi ($Tdof_{1,1} = 2$) olarak belirlenmektedir. Bu değer birim serbestlik maliyeti ($Udofv = 25$) ile çarpıldığında, [10000] montaj işlem basamağının toplam serbestlik derecesi maliyeti;

$$DOFc_{1,1} = Tdof_{1,1} \cdot Udofv = 2 \cdot 25 = 50$$

olarak hesaplanmaktadır.

• **[10011] montaj işlem basamağı**

Bu montaj işlem basamağında $\{a\}$, $\{b\}$ parçaları arası; c_1 , $\{a\}$, $\{c\}$ parçaları arası; c_4 ve $\{b\}$ ile $\{c\}$ parçaları arası c_5 bağlantıları sağlanmıştır. Bu parça çiftleri için hareket serbestlikleri Tablo 9'da görülmektedir.

Tablo 9. $\{a\}$, $\{b\}$, $\{c\}$ parçaları arası hareket serbestlikleri

$c_1 \Rightarrow (a \div b)$						
$c_4 \Rightarrow (a \div c)$	+x	+y	+z	-x	-y	-z
$c_5 \Rightarrow (b \div c)$						
a/b	1	0	0	0	0	0
b/a	0	0	0	1	0	0
a/c	1	0	0	0	0	0
c/a	0	0	0	1	0	0
b/c	1	0	0	0	0	0
c/b	0	0	0	1	0	0

Tablodan [10011] montaj işlem basamağının toplam serbestlik derecesi ($Tdof_{2,1} = 6$) olarak belirlenir. Bu değer birim serbestlik derece maliyeti ile çarpıldığında, toplam serbestlik derece maliyeti;

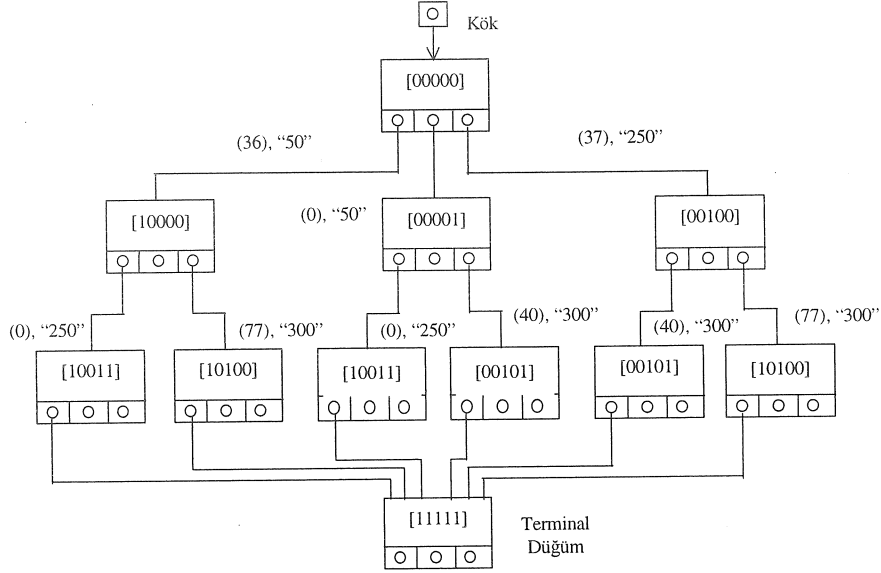
Pense montaj sisteminin her bir montaj işlem basamağı bu şekilde dikkate alınarak tüm uygun montaj sıralarının alt montaj serbestlik derecesi için serbestlik derece maliyet değerleri belirlenir. Bu sonuçlar Tablo 10'da görülmektedir.

Buradan, alt montaj serbestlik derecesi kriterine göre pense montaj sistemi için "300" toplam serbestlik derece maliyeti ile 1 ve 3. montaj sırası optimum olarak bulunmuştur.

Pense montaj sistemine ilişkin uygun montaj sıraları ve bu sıralara verilen maliyet değerleri Şekil 4'de görülmektedir. Burada ağırlık maliyeti parantez () içinde, serbestlik derece maliyeti ise tırnak " " içinde verilmektedir.

Tablo 10. Pense montaj sistemi montaj sıraları alt montaj serbestlik derece maliyetleri

1. montaj sırası		2. montaj sırası		3. montaj sırası	
$DOFc_{2,1} = 50$	$DOFc_{3,1} = 250$	$DOFc_{2,2} = 50$	$DOFc_{3,2} = 300$	$DOFc_{2,3} = 50$	$DOFc_{3,3} = 250$
4. montaj sırası		5. montaj sırası		6. montaj sırası	
$DOFc_{2,4} = 50$	$DOFc_{3,4} = 300$	$DOFc_{2,5} = 250$	$DOFc_{3,5} = 300$	$DOFc_{2,6} = 250$	$DOFc_{3,6} = 250$



Şekil 4. Pense montaj sistemi ağırlık ve serbestlik derece maliyetleri

Şekil 4'den, 2. ve 3. montaj işlem basamaklarındaki vektörler dikkate alındığında, 3. montaj sırası, "0" lık ağırlık maliyeti ve "300" lük serbestlik derece maliyeti ile optimum sıra olarak tespit edilir.

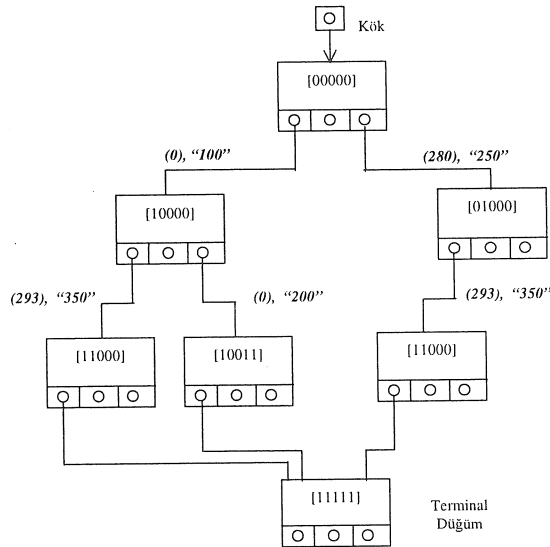
Ayrıca, "114" ağırlık maliyeti ve "550" lik serbestlik derecesi maliyeti ile 6. montaj sırası uygun sıralar içerisinde en az tercih edilen sıradır.

Örnek montaj sistemlerinden menteşe montaj sistemine ilişkin kesişim matrisleri aşağıda görülmektedir.

Bu sistemin uygun montaj sıralarının ağırlık maliyetleri ve kesişim matris elemanları kullanılarak belirlenen serbestlik derece maliyetleri Şekil 5'te gösterilmektedir.

$$A_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{-x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{-y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{-z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Şekil 5. Menteşe montajı ağırlık ve serbestlik derece maliyetleri

Şekilden, menteşe montaj sistemi için optimum sıra "0" lık toplam ağırlık maliyeti ve "300" lük toplam serbestlik derece maliyeti ile 2. montaj

$$A_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad A_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{-x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu sistem için alt montaj serbestlik derecesi kriterine göre optimum montaj sıraları "300" maliyetine sahiptir. Bu montaj sıraları şu şekilde verilebilir.

[00000000], [01000000], [01001000], [01011000], [11111111]
 [00000000], [01000000], [01001000], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00100000], [00011000], [01011000], [11111111]
 [00000000], [00001000], [01001000], [01011000], [11111111]
 [00000000], [00001000], [01001000], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00001000], [01001000], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00001000], [00011000], [01011000], [11111111]
 [00000000], [00001000], [00001010], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00000100], [00001010], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00000010], [01000010], [01001010], [11111111]
 [00000000], [00000010], [01000010], [01000011], [11111111]

şeklindedir.

Geliştirilen optimizasyon yaklaşımında bir montaj sistemine ilişkin herhangi bir uygun sıranın optimum olabilmesi için her iki optimizasyon kriterini de sağlaması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu montaj sırası pense montaj sistemi için;

[00000], [00001], [10011], [11111]

şeklindedir. Bu sıra; öncelikle alt-tutamak ve üst-tutamak arası c_5 bağlantısının sağlanmasını daha sonrasında ise bu alt montaja civatanın monte edilerek c_1 ve c_4 bağlantısının sağlanmasını ve son olarak ta somunun montajı ile tüm bağlantıların sağlanması gerektiğini belirtmektedir.

Menteşe montaj sistemi için optimum montaj sırası;

[00000], [10000], [10011], [11111]

şeklindedir. Bu montaj sırası; öncelikle plaka ve tutamak parçaları arası c_1 bağlantısının sağlanması,

sırasındır. Uygun sıralar içerisinde az tercih edileni ise, 3. montaj sırasındır.

Flanşlı kavrama montaj sistemine ait kesişim matrislerinin bir kısmı aşağıda görülmektedir.

daha sonra bu alt montaja civatanın (c_4, c_5) ve son olarak ta somunun monte edilmesi gerektiğini belirtir.

Flanşlı kavrama sistemi için her iki optimizasyon kriteri için minimum maliyete sahip olan optimum montaj sırası;

[00000000], [01000000], [01001000], [01011000], [11111111]

olup, burada; 1. montaj işlem basamağında, Flanş-I ve Mil-I parçaları, 2. montaj işlem basamağında, Flanş-II ve Mil-II parçaları monte edilmektedir. 3. montaj işlem basamağında oluşan bu alt montaja civata monte edilmekte, 4. montaj işlem basamağında ise; rondela ve somun montajı yapılarak işlem tamamlanmaktadır.

SONUÇ

Bu yaklaşım, bir montaj sistemine ilişkin ikili vektörlerden oluşan uygun montaj sıralarını optimize etmek için geliştirilmiştir. Dolayısıyla, öncelikle ürünün uygun montaj sıralarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla montaj sistemi bağlantı çizgesi ile temsil edilmektedir. Bu çizgenin düğümleri montaj parçalarını ve kenarları ise, montaj konumunda kartezyen koordinat sisteminin altı yönü boyunca parçalar arası temas ilişkilerini tanımlamaktadır. Temas ilişkileri montaj resminin çeşitli görünüşlerinin taranması ve farklı parçalara ait renk kodlarının işlenmesi ile otomatik oluşturulmaktadır. İkili vektörler montaj işlem basamaklarını temsil etmek için kullanılmıştır. Bu vektörlerin bir kısmı montaj işlem basamağı oluşturmaz. Bu durumu belirlemek amacıyla bağlantı çizgesinden faydalanılmıştır. Ayrıca, montaj işlem basamaklarının uygun bir montaj sırasında bulunanlarını belirlemek için çeşitli sınırlayıcılar kullanılmıştır. Bunlar; alt montaj, kararlılık ve geometrik uygunluk sınırlayıcılarıdır. Montaj işlem basamaklarının geometrik uygunlukları, parçalar

arası çarpışma ilişkilerini temsil eden kesişim matrisleri vasıtasıyla belirlenmiştir. Bu matrisler de montaj görünüşlerinden elde edilmiştir.

Uygun olduğu tespit edilen montaj sıralarının optimizasyonu için montaj sırası planlama sistemlerinde kullanılabilecek bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile bir ürüne ait uygun olduğu belirlenen montaj sıraları içerisinde en uygununu belirlenebilmektedir. Yaklaşım iki temel kriteriye dayanmaktadır. Bunlardan ilki ağırlık, ikincisi ise serbestlik derecesi kriterleridir. Bu yaklaşım, üç farklı montaj sistemine uygulanmıştır. Örneğin dört parçadan oluşan pense montaj sisteminde, öncelikle alt-tutamak ve üst-tutamağın birleştirilmesi, daha sonrasında bu alt montaja sırasıyla civata ve somunun monte edilmesi mantığa uygundur. Ayrıca, bu yaklaşıma dayalı tamamen otomatik çalışan bir optimizasyon sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, montaj sırası planlama amaçlı geliştirilen bir sistemin optimizasyon ünitesini oluşturmaktadır. Optimizasyon yaklaşımı, uygun montaj sıraları farklı metotlar ile temsil edilen sistemler için de verimli şekilde kullanılabilir. Ayrıca bu yaklaşım vasıtasıyla montaj sistemleri için en uygun ve uygun sıralar içinden en az tercih edilen montaj sırası da belirlenebilir.

AN OPTIMIZATION APPROACH IN ASSEMBLY SEQUENCE PLANNING SYSTEMS

This paper presents an optimization approach for assembly sequence planning systems. The approach is based on two criteria that are weight and degree of freedom for subassemblies. The weight criteria makes it necessary to assemble from heavy parts to light parts in order to reduce assembly time and to conduct assembly process easily. Reducing assembly time also decreases assembly cost. The subassembly degree of freedom criteria makes it necessary to choose subassembly which is low degree of freedom in order to hold parts in low degree of freedom. Assembly sequence which was applied to both optimization criteria was selected as optimum one. In this work, various assembly systems were examined. At first, it was necessary to determine feasible assembly sequences of these systems. Therefore, feasible assembly sequences were determined by various assembly constraints and then they were represented by sequence of binary vectors. Pincer, hinge and clutch assemblies are taken as sample systems and their optimum assembly sequences are determined.

Keywords: Assembly sequence planning, optimization.

KAYNAKÇA

1. Homem de Mello, L.S., ve Lee, S., *Computer-Aided Mechanical Assembly Planning*, Kulwer Academic Publishers, Massachusetts, 1991.
2. De Fazio, T.L. ve Whitney, D.E., Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 3 (1987) 6, 640-658.
3. Homem de Mello, L.S. ve Sanderson A. C., A Correct and Complete Algorithm for the Generation of Mechanical Assembly Sequences, *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 7 (1991) 2, 228-240.
4. Homem de Mello, L.S., ve Arthur, C.D., AND/OR Graph Representation of Assembly Plans, *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 6 (1990) 2, 188-199.
5. Wilson, R.H., *On Geometric Assembly Planning*, PhD Thesis, Stanford University, Stanford CA, 1992.
6. Lieberman, L.I. and Wesley, M.A., AUTOPASS: An Automated Programming System For Computer Controlled Mechanical Assembly, *IBM Journal of Research and Development*, 21, 321-333, 1977.
7. Pandey, P.C. and Sarvanathan, V.C., *Automated Assembly Sequence Planning System for Mechanical Parts*, M. Eng. Thesis, Industrial System Engineering Program, Asian Inst. of Tech, Bangkok, 1997.
8. Zhang, W., Representation of Assembly and Automatic Robot Planning by Petri Net, *IEEE Trans. On Systems, Man, and, Cybernetics*, 19 (1989) 2, 418-422.
9. Cao, T. ve Sanderson, A.C., Task Sequence Planning in a Robot Workcell Using AND/OR Nets, *IEEE Int. Symp. On Intelligent Control*, 239-244, Arlington, VA, 1991.
10. Suzuki, T., Kanehara, T., Inaba, A. ve Okuma, S., On Algebraic and Graph Structural Properties of Assembly Petri Nets, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 507-514, Atlanta, GA, May 1993.
11. Thomas, J.P., A Petri Net Framework for Representing Mechanical Assembly Sequences, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, 2116-2121, July 1992.
12. Groppetti, R., Santucci, A. and Senin, N., On the Application of Coloured Petri Nets to Computer Aided Assembly Planning, *IEEE Symp. On Emerging Technologies & Factory Automation*, Tokyo, Japan, 381-387, November 1994.
13. Lee, S. ve Shin, Y.G., Assembly Planning based on Geometric Reasoning, *Computation and Graphics*, 14 (1990) 2, 237-250

14. Jentsch, F. K., Automatic generation of Assembly Sequences, *Art. Int. and Inf. Control Systems of Robots*, Tcheoslovaquie, 197-200, 1984.
15. Bullinger, H.J. ve Jiedel, A., *Assembly Sequence Planning Using Operations Networks*, In *production research Approaching 21 st Century* (Editors: Pridhan, M. and O.E. Brien, C), Taylor and Francis, 495, 1991.
16. Wolter, J.D., *On the Automatic Generation of Plans for Mechanical Assembly*, PhD thesis, Univ. of Michigan, 1988.
17. McHugh, J.A., *Algorithmic Graph Theory*, Prentice-Hall Int., Inc., Int. edition, 1990.
18. Boothroyd, G., Product design for manufacture and assembly, *CAD*, 26, 7, 505-509, 1994.
19. O'Grady, P. vd., A review of approaches for assembly, *Concurrent Engineering*, 1, 3, 5-11, 1991.
20. Zeid, I., *CAD/CAM Theory and Practice*, McGraw-Hill, Inc., Press, New York, 1991.