

1. GİRİŞ	2
2. PROBLEMİN TANIMI	2
2.1. Problemin Tanımı ve Notasyonu	2
2.2. Amacın Belirlenmesi	3
3. LİTERATÜR TARAMASI	3
4. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ	5
3.1. Modellemeye Geçiş	5
3.2. Problemin Modellenmesi	6
3.3. Excel Solver'a Modellemenin Aktarımı	7
3.4. Çözüm Süreci	10
3.5. Sonuçlar	11
5. BULGULAR VE YORUMLAR	13
KAYNAKÇA	14
6. EKLER	15

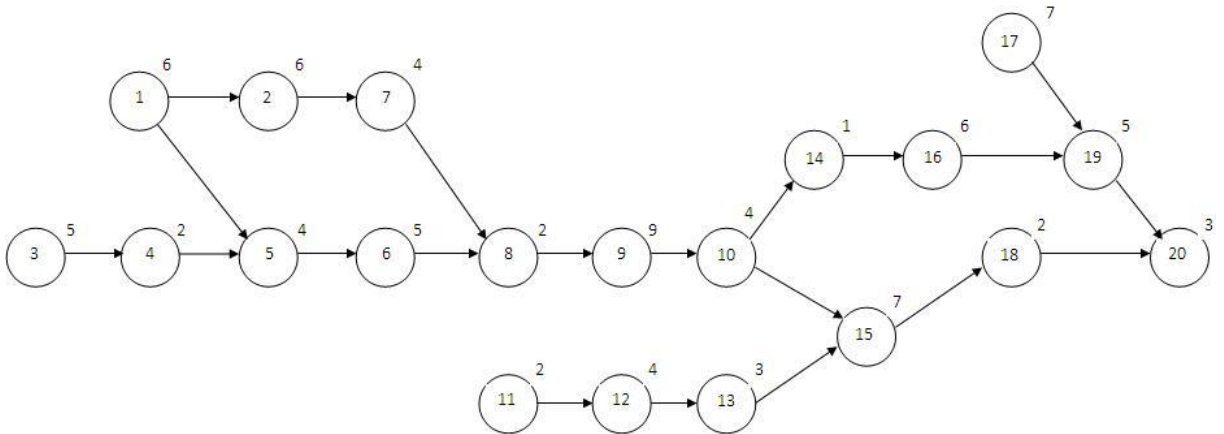
1. GİRİŞ

Az sonra detaylarına vakıf olacağımız bu çalışmada montaj hatlarının dengelenmesi kapsamında sınırlı sayıda iş ögesinden oluşan bir üretim sürecinin 0-1 tamsayılı modelleme vasıtasıyla modellenmesi ve Excel Solver kullanılarak çözdürülmesi süreçleri anlatılmıştır. En başta çok fazla değişken olmasından kaynaklanan zaman ve performans sorunu, bazı iş ögelerinin sezgisel olarak tutarlı bir şekilde atanmasıyla azaltılmış, öngörülen istasyon sayısı ile dengeleme sağlanmış ve sonuç performans ölçütleri açısından değerlendirilmiştir. Daha sonra veri setine sezgisel yöntemlerden olan konum ağırlıklı dengeleme (Helgeson ve Birnie) yöntemi uygulanarak iki çözüm kümesi performans açısından karşılaştırılmıştır.

2. PROBLEMİN TANIMI

2.1. Problemin Tanımı ve Notasyonu

Malzemelerin, akış hattı boyunca işgücü veya donanımdan yararlanılarak transfer edildiği ve parça üzerindeki işlemlerin; aralarındaki -öncelik ilişkileri ve çevrim süresi gibi- kısıtlar göz önüne alınarak birleştirilmesiyle oluşturulan istasyonların, yine bir hat boyunca sıralanmalarıyla oluşan sisteme **montaj hattı** denir. İlgilenilecek problem, 20 iş ögesinden oluşmakta olan bu montaj hattını dengelemek olup, tüm oklar FS (finish to start) ilişki tipini göstermek ve işlem süreleri sağ üstte verilmek üzere öncelik diyagramı **Figür 1'de** görüldüğü gibidir. Çevrim süresi 9 zaman birimi, olası iş istasyonu sayısı 11 olarak belirlenmiştir.



Figür 1. Öncelik Diyagramı

Varsayımlar olarak, SALBP1 probleminin tüm varsayımları geçerlidir [bkz SALBP1-simple assembly line balancing problem]. Problemin notasyonu, 0-1 tamsayılı modelleme jargonuna uygun olarak şu şekilde yapılabilir:

t_i : i iş ögesinin işlem süresi ($i = 1, 2, \dots, N$)

E_i : i iş ögesinin atanabileceği ilk iş istasyonu

L_i : i iş ögesinin atanabileceği son iş istasyonu

K : Dengeleme sonunda gerekli olacağı tahmin edilen iş istasyonu sayısı

P_i : i iş ögesinden önce bitirilmiş olması gereken iş ögelerinin kümesi

S_i : i iş ögesinden sonra bitirilebilecek iş ögelerinin kümesi

W_k : k iş istasyonuna atanabilen tüm iş ögelerinin kümesi

$\|W_k\|$: W_k kümesinin üye sayısı

2.2. Amacın Belirlenmesi

Maliyet, zaman, kalite gibi temel amaç kriterlerinin bu problem için seçilme uygunluğuna bakıldığında, mevcut verilerden maliyetin en küçüklmesi gerektiği anlaşılmakta olup, maliyet açılacak iş istasyonu sayısı ile doğru orantılıdır, dolayısıyla problemdeki asıl amacımız açılacak iş istasyonu sayısını en aza indirmek olmalıdır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Montaj hattı dengeleme problemleri de diğer birçok problem gibi NP-Zor olup bunlarla ilgili zamandan kazanmak amacıyla birçok sezgisel (heuristic) algoritma geliştirilmiştir. Baybars'ın (1986) çalışmasında değindiği üzere basit montaj hattı dengeleme problemi (SALBP) zamanla birçok parametreyi içeren değişikliklere uğramış ve birçok yeni problem tipiyle birlikte bunları çözmek üzere çözümler sunulmuştur. Baybars deterministik modellere bakmasına rağmen günümüze operasyon sürelerinin stokastik olarak değerlendirildiği birçok çalışma da mevcuttur. Bizim çalışmamızda da kabul ettiğimiz üzere, basit dengeleme probleminden kasit, karmaşık ve çoklu ürünlerin bulunmadığı, alt montaj sürelerinin ihmal edildiği ve alan ile konum gibi özel kısıtların yer almadığı problem tipidir. Optimum çözmek için lineer programlama kullanılan SALBP, problemin orta ölçekli dahi olmasıyla birlikte NP-Zor olmakta ve optimum sonuca yakın değerler elde etmek bile mümkün olmamaktadır (Bowman, 1960).

Ağpak ve diğerleri (2002) görev zamanlarının normal dağılımla göre belirlendiği U tipi montaj hattı için deterministik olan COMSOAL metoduna dayanan bir Pascal tabanlı bir

prosedür kullanmış, güvenlik seviyesi kısıt altından minimum istasyon sayısı olacak şekilde görev ataması sağlanmıştır.

Kalender ve diğerleri ise (2008) probleme bulanık mantıkla yaklaşmışlar ve istatistiksel dağılımla belirlenen verilerin mevcut olmadığı durumda bulanık operasyon süreleri kullanmışlardır. Java tabanlı algoritma bir fabrikada test edilmiş ve montaj hattı minimum istasyon sayısı ile dengelenmiştir.

Altuntaş ve İşler (2010) ise yine birliktelik kısıtlarının göz önünde bulundurulduğu ve bu kısıtların beraberinde konum ve tercih gibi özel kısıtları beraberinde getirmesi sebebiyle bilinen yöntemlerin uygulanamadığı bir montaj hattı dengeleme problemi için En Büyük Aday algoritmasında değişiklikler yaparak metot ve zaman etüdü eksenli bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda senaryolara bağlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Rubinovitz (1995) çalışmasında son yıllarda birçok problemin çözümünde kullanılan genetik algoritma yaklaşımını kullanarak sonuçlarını literatürde etkin bir biçimde kullanılan MUST algoritmasıyla karşılaştırmıştır. MUST'nin verimli çalışan fakat küçük problemler için fazla masraflı olduğunu, genetik algoritmasının ise zaman ve maliyetçe daha verimli olduğunu savunmuştur. Aslında genetik algoritmalar da iyi tasarlanmazlarsa sebep oldukları kayıp getirdikleri kazançtan daha fazla olmaktadır çünkü kodlama sürecindeki bir aksaklık algoritmanın en başına kadar giden tasarım değişikliklerine sebep olabilir.

Bu çalışmada irdelenmeyen ancak gerçek yaşam vakalarına daha uygun bir problem olan karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi Orbak ve diğerleri (2009) tarafından incelenmiştir. Bu problemlerde birden fazla tipte akış gerçekleştiğinden mevcut algoritmaların kullanılmadığını söylemişler ve probleme iki aşamalı bir yaklaşım getirmişlerdir. İlk aşamada her bir akışın gerektirdiği minimum istasyon sayısı ayrı ayrı belirlenmiş, ikinci aşamada ise bu sayılara göre aşamalı çevrim süresi artırımı yöntemiyle istasyonlara atamalar yapılmıştır. Visual Basic kullanılan algoritma optimum sonuçlar üretebilmiştir. Aynı probleme bir önceki çalışmadaki gibi bir genetik algoritma yaklaşımı ise Keskintürk ve Küçük (2006) tarafından yapılmıştır. Optimum sonuç bulunamamakla birlikte parametre değişiklikleri ile problemin daha hızlı sonuca ulaşması sağlanmıştır. Sezgisel bir algoritma olan genetik algoritmanın her zaman optimum sonuç vermeyeceği vurgulanmıştır.

4. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

3.1. Modellemeye Geçiş

Bu bölümde parametrelerin nasıl bulunduğu ve modellemeye geçişte nasıl kullanıldığı açıklanacaktır. İlk parametre olan t_i işlem sürelerini gösterir ve öncelik diyagramından aşağıdaki **Tablo 1** oluşturulabilir:

İş Ögesi	Süre	Öncüller
1	6	–
2	6	1
3	5	–
4	2	3
5	4	1,4
6	5	5
7	4	2
8	2	6,7
9	9	8
10	4	9
11	2	–
12	4	11
13	3	12
14	1	10
15	7	10,13
16	6	14
17	7	–
18	2	15
19	5	16,17
20	3	18,19

Tablo 1. İşlem Süreleri ve Öncül Öğeler

P_i ve S_i , sırasıyla i iş ögesinden önce bitirilmiş olması gereken ve sonra bitirilebilecek iş ögeleri kümesini gösterir. Örneğin, 2 numaralı iş ögesinden önce 1 numaralı iş ögesi kesinlikle bitirilmelidir, 6 numaralı iş ögesinden önce 1, 3, 4, 5 numaralı iş ögeleri bitirilmek zorundadır. Dolayısı ile P_6 kümesi $\{1,3,4,5\}$ şeklinde olacaktır. Aynı iş ögesi için E_6 kümesi, 6. iş ögesi bitirilmeden başlayamayacak bütün iş ögelerinden oluşur, yani $S_6=\{8,9,10,14,15,16,17,18,19,20\}$. Bu kümeler, ham halleriyle kullanılmayacak, fakat modelleme sürecinde kendilerinden yararlanılacaktır.

E_i ve L_i sırasıyla iş ögelerinin atanabileceği en erken ve en geç istasyonları göstermekte olup, formülleri aşağıda verildiği gibidir.

$$E_i = [(t_i + \sum t_j) / C]^+$$

$$L_i = K + 1 - [(t_i + \sum t_j) / C]^+$$

Örneğin, 6. iş ögesi için $E_6 = \lceil (5 + 6 + 5 + 2 + 4) / 9 \rceil^+ = 3$ ve $L_6 =$

$11 + 1 - \lceil (5 + 2 + 9 + 4 + 1 + 7 + 6 + 7 + 2 + 5 + 3) / 9 \rceil^+ = 12 - 6 = 6$ olur.

Bu değerler Tablo 2'de şöyle gösterilmiştir:

İş Ögesi	E	L
1	1	4
2	2	6
3	1	5
4	1	6
5	2	6
6	3	6
7	2	7
8	4	7
9	5	7
10	6	8
11	1	9
12	1	9
13	1	10
14	6	10
15	7	10
16	6	10
17	1	10
18	8	11
19	8	11
20	10	11

Tablo 2. E_i ve L_i Değerleri

Bu değerlerden sonra W_k , k iş istasyonuna atanabilecek tüm işleri, $\|W_k\|$ ise bu kümenin eleman sayısını gösterecektir. Bu değerler de ilgili iş ögesinin E ve L değerleri o iş istasyonunu içeriyorsa W kümesine dahil edilecektir. Örneğin 10. iş istasyonu için $W_{10} = \{13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20\}$ olur. Son olarak K, olası iş istasyonu sayısı, 11 alınmıştır.

3.2. Problemin Modellenmesi

0-1 tamsayılı olarak yapılacak modelleme aşamasında iki tane değişken kullanılacaktır, bunlar:

$$A_k = \begin{cases} 1, & k \text{ iş istasyonuna en az bir iş ögesi atandı ise} \\ 0, & @ \end{cases}$$

$$V_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ iş ögesi } k \text{ istasyonuna atandı ise} \\ 0, & @ \end{cases}$$

Bu değişkenler ve parametreler ışığında amaç fonksiyonunu şu şekilde tanımlayabiliriz:

$$\text{Enk } Z = \sum_{k=1}^K A_k$$

Probleme ilişkin 5 tip kısıtı şu şekilde yazabiliriz:

1. *Atama kısıtları*: Bu kısıtlar, her iş ögesinin tek istasyona atanması için gereklidir.

$$\sum_{k=E_i}^{L_i} V_{ik} = 1 \quad \forall i$$

2. *Öncelik kısıtları*: Teknolojik öncelik diyagramına göre oluşturulur. Her ilişki için a, b'den önce gelmek üzere, ($L_a \leq L_b$) durumu söz konusudur.

$$\sum_{k=E_a}^{L_a} (k * V_{ak}) - \sum_{k=E_b}^{L_b} (k * V_{bk}) \leq 0$$

3. *Çevrim süresi kısıtları*: Her istasyonun iş yükü toplamı, çevrim süresini geçmemelidir.

$$\sum_{i \in W_k} (t_i * V_{ik}) \leq C \quad \forall k$$

4. *İş istasyonu kısıtları*: Bir iş istasyonu açılırsa, yani bir iş ögesi oraya atanırsa, o istasyon kullanılmalıdır.

$$\sum_{i \in W_k} V_{ik} - \|Wk\| * A_k \leq 0 \quad \forall k$$

5. *İkili seçim kısıtları*: V ve A değişkenleri 0-1 olma durumundadır.

3.3. Excel Solver'a Modellemenin Aktarımı

Her bir kısıt, MS Excel yazılımına girilmiş olup, anlaşılması için her birine birer örnek verilecektir. Öncelikle 1'den 11'e kadar olan A_k değişkenleri yan yana yazılıp hemen altına amaç fonksiyonu iliştilmiştir ve bu hücre bu A_k değerlerinin toplamına eşit olmalıdır. **Figür 2'de** verilmiş olan kesitteki toplama dikkat ediniz.

B4													fx =TOPLA(B3:L3)	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M		
1	Ak binary var.													
2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	K=11		
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
4	min z	11	açılacak istasyon sayısını enküçülemek amacındayız											
5	V11	V63	-3,1E-17	V115		V147	0	V1810	0					
6	V12	V64	0	V116		V148	2,47E-32	V1811	0			t		
7	V13	1 V65	0	V117		V149	0	V198	0			6		
8	V14	V66	1	V118		V1410	1	V199	0			6		
9	V22	-1,7E-33	V67	0	V119		V157	0	V1910	0		5		
10	V23	0	V72	0	V121		V158	7,94E-18	V1911	1		2		
11	V24	1	V73	0	V122	1	V159	1	V2010	0		4		
12	V25	0	V74	0	V123		V1510	0	V2011	1		5		
13	V26	0	V75	1	V124		V166	0				4		
14	V31	V76	4,44E-17	V125		V167	0		Assignment Constraints			2		
15	V32	1	V77	0	V126		V168	1,11E-16	1	1	1	9		
16	V33	V84	0	V127		V169	0		2	1	1	4		
17	V34	V85	0	V128		V1610	1		3	1	1	2		
18	V35	V86	1	V129		V171	1		4	1	1	4		
19	V41	0	V87	0	V131		V172		5	1	1	3		
20	V42	0	V95	0	V132		V173		6	1	1	1		

Figür 2. MS Excel Amaç Fonksiyonu

Yukarıda açıkladığımız sırayla gidecek olursak atanma kısıtları Figür 3'te Assignment Constraints başlığı altında, J sütununda kısıt tanımı ve K sütununda değeri yer almaktadır. Örneğin, 4 iş ögesi, atanabileceği 1,2,3,4,5,6 veya 7 numaralı istasyonlardan birine atanmalıdır.

J18													fx =TOPLA(B19:B24)	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L			
13	V26	0	V75	1	V124		V166	0						
14	V31	V76	4,44E-17	V125		V167	0		Assignment Constraints					
15	V32	1	V77	0	V126		V168	1,11E-16	1	1	1			
16	V33	V84	0	V127		V169	0		2	1	1			
17	V34	V85	0	V128		V1610	1		3	1	1			
18	V35	V86	1	V129		V171	1		4	1	1			
19	V41	0	V87	0	V131		V172		5	1	1			
20	V42	0	V95	0	V132		V173		6	1	1			
21	V43	0	V96	0	V133	1	V174		7	1	1			
22	V44	1	V97	1	V134		V175		8	1	1			
23	V45	0	V106	0	V135		V176		9	1	1			
24	V46	0	V107	0	V136		V177		10	1	1			
25	V52	1,31E-27	V108	1	V137		V178		11	1	1			
26	V53	0	V111	1	V138		V179		12	1	1			
27	V54	0	V112		V139		V1710		13	1	1			
28	V55	1	V113		V1310		V188	0	14	1	1			
29	V56	0	V114		V146	0	V189	1	15	1	1			
30									16	1	1			
31									17	1	1			
32									18	1	1			
33									19	1	1			
34									20	1	1			

Figür 3. Atama Kısıtları

Öncelik kısıtları kısıt eşitsizliğine uygun olarak Figür 4'te 1 ve 2 numaralı iş ögeleri arasındaki öncelik ilişkisi örnek verilerek gördüğümüz şekilde tanımlanmıştır.

J36													fx =(B5+2*B6+3*B7+4*B8)-2*B9-3*B10-4*B11-5*B12-6*B13	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L			
5	V11	V63	-3,1E-17	V115		V147	0	20	1	1				
6	V12	V64	0	V116		V148	2,47E-32		Precedence Constraints					
7	V13	1 V65	0	V117		V149	0	1VE2	-1	0				
8	V14	V66	1	V118		V1410	1	1VE5	-2	0				
9	V22	-1,7E-33	V67	0	V119		V157	0	3VE4	-2	0			
10	V23	0	V72	0	V121		V158	7,94E-18	4VE5	-1	0			
11	V24	1	V73	0	V122	1	V159	1	2VE7	-1	0			
12	V25	0	V74	0	V123		V1510	0	5VE6	-1	0			
13	V26	0	V75	1	V124		V166	0	6VE8	0	0			
14	V31	V76	4,44E-17	V125		V167	0	7VE8	-1	0				

Figür 4. Öncelik Kısıtları

Çevrim süresi kısıtları Cycle Time Constraints başlığı altında Figür 5’te verilmiştir. Fx satırındaki değerin yanda yazan 9 değerinden küçük olması gerektiği, çözücü bilgilerine girilerek zaten sağlanmıştır.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
5	V11		V63	-3,1E-17	V115		V147	0	V1810	0	Cycle Time Constraints		
6	V12		V64	0	V116		V148	2,47E-32	V1811	0	1	9	9
7	V13	1	V65	0	V117		V149	0	V198	0	2	9	9
8	V14		V66	1	V118		V1410	1	V199	0	3	9	9
9	V22	-1,7E-33	V67	0	V119		V157	0	V1910	0	4	8	9
10	V23	0	V72	0	V121		V158	7,94E-18	V1911	1	5	8	9
11	V24	1	V73	0	V122	1	V159	1	V2010	0	6	7	9
12	V25	0	V74	0	V123		V1510	0	V2011	1	7	9	9
13	V26	0	V75	1	V124		V166	0			8	4	9
14	V31		V76	4,44E-17	V125		V167	0			9	9	9
15	V32	1	V77	0	V126		V168	1,11E-16		1	10	7	9
16	V33		V84	0	V127		V169	0		2	11	8	9
17	V34		V85	0	V128		V1610	1		3	1		2
18	V35		V86	1	V129		V171	1		4	1	1	4
19	V41	0	V87	0	V131		V172			5	1	1	3
20	V42	0	V95	0	V132		V173			6	1	1	1
21	V43	0	V96	0	V133	1	V174			7	1	1	7
22	V44	1	V97	1	V134		V175			8	1	1	6
23	V45	0	V106	0	V135		V176			9	1	1	7
24	V46	0	V107	0	V136		V177			10	1	1	2
25	V52	1,31E-27	V108	1	V137		V178			11	1	1	5
26	V53	0	V111	1	V138		V179			12	1	1	3
27	V54	0	V112		V139		V1710			13	1	1	87
28	V55	1	V113		V1310		V188	0		14	1	1	
29	V56	0	V114		V146	0	V189	1		15	1	1	

Figür 5. Çevrim Süresi Kısıtları

İş istasyonu kısıtları, Figür 6’da görüldüğü gibi, örneğin 1. istasyona atanabilecek tüm iş öğeleri seçilip toplanarak sonra kaç tane varsa ilgili değişkenle bu sayı çarpılıp toplamdan çıkarılarak elde edilir.

Q36														=B5+B14+B19+D26+F10+F19+H18-7*B3	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
Ak binary var.													TOTAL	87	
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	K=11				
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
min z 11														açılacak istasyon sayısını enküçükleme amacındayız	
V11	V63	-3,1E-17	V115	V147	0	V1810	0	Work Station Constraints							
V12	V64	0	V116	V148	2,47E-32	V1811	0	1	-5	0					
V13	1 V65	0	V117	V149	0	V198	0	2	-8	0					
V14	V66	1	V118	V1410	1	V199	0	3	-9	0					
V22	-1,7E-33	V67	0	V119	V157	0	V1910	0	4	-10	0				
V23	0	V72	0	V121	V158	7,94E-18	V1911	1	5	-10	0				
V24	1	V73	0	V122	1 V159	1	V2010	0	6	-12	0				
V25	0	V74	0	V123	V1510	0	V2011	1	7	-11	0				
V26	0	V75	1	V124	V166	0									
V31	V76	4,44E-17	V125	V167	0										
V32	1	V77	0	V126	V168	1,11E-16	1	1	1	10	-6	0	0		
V33	V84	0	V127	V169	0	2	1	1	11	-1	0	0	0		
V34	V85	0	V128	V1610	1	3	1	1	2 E11						
V35	V86	1	V129	V171	1	4	1	1	4 E12						

Figür 6. İş İstasyonu Kısıtları

Son olarak 0-1 kısıtları, çözücüde tanımlanmıştır. Figür 7'yi inceleyiniz.

E	F	G	H	I	J	K	
A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
1	1	1	1	1	1	1	1
açılacak istasyon sayısını enküçükleme amacındayız							
V115	V147	0	V1810	0			

Çözücü Parametreleri

Hedef Hücre:

Eşittir: En Büyük En Küçük Değer:

Değişen Hücreler:

Kısıtlamalar:

-
-
-
-
-
-

Figür 7. 0-1 Kısıtları

3.4. Çözüm Süreci

Adım 1. Olası tüm değişkenler, atanabilecek istasyonların belirlenmesi neticesinde 118 tane olup, bunların hepsi çözücüye dahil edilmiştir. Fakat değişkenler 0-1 tamsayılı değişken olduğundan, çözücünün amaç fonksiyonu daha 1 ve 2 arasında geçiş yaparken 8.5 saat geçtiği görülerek bu adım sona erdirilmiştir. Zaten bilgisayar da çökmeye çok yaklaşmıştır.

Adım 2. Gözle görülebilecek ve sezgisel yöntem uygulanabilecek iş öğeleri ilk istasyonlara atanarak değişkenlerin azaltılması yoluna gidilmiştir. Söz konusu atanan iş öğeleri **Tablo 3**'te verilmiştir.

İş İstasyonu	Atanan Öğeler	Artık Süre
1	11,17	0
2	3,12	0
3	1,13	0

Tablo 3. Model Çözümünden Önce Atanan Öğeler

Görüldüğü gibi, bu atamalar sonucunda, hem istasyonlarda hiç artık süre kalmayarak değişken sayısını 118'den 68'e indiren bir atama yapılmış, hem de öncelik ilişkileri dikkate alınarak doğru bir atama olması sağlanmıştır.

Adım 3. Problem, bir kez de Helgeson ve Birnie'nin konum ağırlıklı dengeleme problemi ile çözülmüştür, yöntemin ayrıntısına girilmeyecektir.

3.5. Sonuçlar

Uygulama matrisi ve atama sonuçları sırasıyla **Figür 8 ve 9'da** verilmiştir. Bu yöntemle 12 istasyonla dengeleme yapılmıştır.

	süre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	G
1	6		1			1	x	x	x	x	x				x	x	x		x	x	x	58
2	6							2	x	x	x				x	x	x		x	x	x	49
3	5				3	x	x		x	x	x				x	x	x		x	x	x	55
4	2					4	x		x	x	x				x	x	x		x	x	x	50
5	4						5		x	x	x				x	x	x		x	x	x	48
6	5								6	x	x				x	x	x		x	x	x	44
7	4								7	x	x				x	x	x		x	x	x	43
8	2									8	x				x	x	x		x	x	x	39
9	9										9				x	x	x		x	x	x	37
10	4														10	10	x		x	x	x	32
11	2												11	x		x			x		x	21
12	4													12		x			x		x	19
13	3															13			x		x	15
14	1																14			x	x	15
15	7																		15		x	12
16	6																			16	x	14
17	7																			17	x	15
18	2																				18	5
19	5																				19	8
20	3																					3

Figür 8. Konum Ağırlıklı Dengeleme Yöntemi Matrisi

İstasyon	Öğeler
1	1,11
2	3,4
3	2
4	5,6
5	7,8
6	9
7	10,12
8	13,14
9	17
10	16
11	15,18
12	19,2

1-3-4-2-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-17-16-15-19-18-20

Figür 9. Sıralama ve Atama

Son haliyle modelin çözümü 2,5 dakika sürmüştür, Excel sonuç raporu ayarlanabilir hücreler yani değişkenlerin değerleri **Ek 1’de**, kısıtların son değerleri **Ek 2’de** verilmiştir. Buradan **Tablo 4’te**ki iş öğelerinin atandığı iş istasyonları özetlenebilir. Toplamda amaç fonksiyonu 11 değerini almış, yani öngörülen iş istasyonu sayısını geçmemiştir. Tabi burada sorulabilecek bir soru 9 veya 10 iş istasyonu en başta öngörülerek dengeleme yapılabilir mi sorusu olabilir, fakat bunlar denenmiş ve bir sonuç alınmamıştır çünkü 10. iş öğesi çok kritik bir konumda bulunmakta ve kendi iş istasyonuna bir öğenin atanmasını engellemektedir.

İş İstasyonu	Atanan Öğeler	Artık Süre
1	11,17	0
2	3,12	0
3	1,13	0
4	2,4	1
5	5,7	1
6	6,8	2
7	9	0
8	10	5
9	15,18	0
10	14,16	2
11	19,2	1

Tablo 4. İş Öğelerinin Ataması

İki çözümü performans ölçütleri cinsinden karşılaştırdığımızda, ortalama iş istasyonu süresinin sezgisel yöntem için $87/12=7.25$, model için $87/11=7.91$ olduğu ve modelin daha dolu istasyonlar verdiği görülmektedir. Denge kaybı bazında karşılaştırma yaparsak,

$n_{enaz} = Enb (n_{enk} ; n_{olası}) = Enb (10;9)=10$ ve model için denge kaybı $[(99-87)/99] \times 100 = \%12$ ve sezgisel için $[(108-87)/108] \times 100 = \%19.4$ olup, yine modelin performansı daha iyidir. Düzgünlük indeksi cinsinden, sezgisel için $\%7.17$, model için $\%6.39$ değerlerini buluruz ki yine model daha iyi performans göstermektedir. Hat etkinliği sezgisel için $\%81$, model için $\%88$ 'dir, yine model daha iyi sonuç vermiştir. Sezgisel yöntemin daha iyi olduğu kıstas ise çözüme ulaşmak için harcanan süredir. Modelleme süreci yaklaşık 4 saat alırken sezgisel yöntemi uygulayıp sonuca ulaşmak yarım saat sürmüştür.

5. BULGULAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada basit montaj hattı dengeleme problemi çerçevesinde 20 iş öğeli 9 zaman birim çevrim süresine sahip bir üretim süreci modellenmiş ve Excel Çözücü kullanılarak optimum çözüm 11 iş istasyonu açılarak bulunmuştur. Excel Çözücü'nün GAMS veya LINDO gibi yazılımlardan farkı, bu tip problemlerde kullanmak için daha rahat ulaşılabilir olmasıdır. Fakat modelleme aşamasında diğer yazılımlara göre biraz daha zorluk içermekte, üstelik yapılan bir hatada hatanın hangi hücrede veya kısımda olduğunu diğer yazılımların aksine belirtmemektedir. İleride yapılacak bir çalışmada, bu modellemelerin hazır modülleri Excel'de kullanılırsa çözüme daha çabuk ulaşılabilir, ya da Excel yerine diğer yazılımlar maliyeti göze alarak satın alınabilir. Eğer zaman konusundaki kaygılar maliyetten daha önemli ve müşteri memnuniyeti ön planda ise sezgisel yöntem ya da yöntemlerin uygulanması daha uygun olacaktır, fakat büyük çaplı problemler de bu da sorgulanabilir.

KAYNAKÇA

Ağpak K., Gökçen H., Saray N., Özel S. (2002). “Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel.” *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4).

Altuntaş, S., İşler A.(2010). “Birliktelik Kısıtları Altında Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Biz Çözüm Yaklaşımı Önerisi ve Bir İşletmede Uygulama” *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 16, Sayı 1 s.29-44

Baybars, İ. (1986). “A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem” *Management Science*, 32(8), s. 909-932

Bowman, E.H. (1960) “Assembly Line Balancing by Linear Programming” *Operations Research*, 8(3), s. 385-389

Kalender, FY., Yılmaz MM., Türker O. (2008) “Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Bir Yaklaşım.” *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, Cilt 23, Sayı 1, s. 129

Keskintürk, K., Küçük B. (2006). “Karışık Modelli Montaj Hatlarının Genetik Algoritma Kullanılarak Dengelenmesi” *Yönetim*, Yıl 17, Sayı 53

Orbak, A., Özalp B., Korkmaz P. (2009).”Karışık Modelli Bir Montaj Hattında Hat Dengeleme Çalışmaları” *YAEM 29. Ulusal Kongresi*

Rubinovitz J. (1995). “Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing” *International Journal of Production Economics* 41(1-3), s.343-354

6. EKLER

Ek 1. Sonuç Raporu Değişkenler

Hedef Hücre (En Küçük)

Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer
ŞBŞ4	min z A1	11	11

Ayarlanabilir Hücreler

Hücre	Ad	İlk Değer	Son Değer
ŞEŞ3	A4	1	1
ŞFŞ3	A5	1	1
ŞGŞ3	A6	1	1
ŞHŞ3	A7	1	1
ŞIŞ3	A8	1	1
ŞJŞ3	A9	1	1
ŞKŞ3	A10	1	1
ŞLŞ3	A11	1	1
ŞBŞ9	V22 A1	0	-1,7386E-33
ŞBŞ10	V23 A1	0	0
ŞBŞ11	V24 A1	1	1
ŞBŞ12	V25 A1	-1,7386E-33	0
ŞBŞ13	V26 A1	0	0
ŞBŞ19	V41 A1	0	0
ŞBŞ20	V42 A1	0	0
ŞBŞ21	V43 A1	0	0
ŞBŞ22	V44 A1	1	1
ŞBŞ23	V45 A1	0	0
ŞBŞ24	V46 A1	0	0
ŞBŞ25	V52 A1	1,31485E-27	1,31485E-27
ŞBŞ26	V53 A1	3,91499E-17	0
ŞBŞ27	V54 A1	0	0
ŞBŞ28	V55 A1	1	1
ŞBŞ29	V56 A1	0	0
ŞDŞ5	V63 A3	-3,13199E-17	-3,13199E-17
ŞDŞ6	V64 A3	0	0
ŞDŞ7	V65 A3	0	0
ŞDŞ8	V66 A3	1	1
ŞDŞ9	V67 A3	0	0
ŞDŞ10	V72 A3	0	0
ŞDŞ11	V73 A3	0	0
ŞDŞ12	V74 A3	0	0
ŞDŞ13	V75 A3	1	1
ŞDŞ14	V76 A3	4,44116E-17	4,44116E-17
ŞDŞ15	V77 A3	0	0

\$D\$16	V84 A3	4,69798E-17	0
\$D\$17	V85 A3	0	0
\$D\$18	V86 A3	1	1
\$D\$19	V87 A3	0	0
\$D\$20	V95 A3	0	0
\$D\$21	V96 A3	0	0
\$D\$22	V97 A3	1	1
\$D\$23	V106 A3	0	0
\$D\$24	V107 A3	0	0
\$D\$25	V108 A3	1	1
\$F\$29	V146 A5	-6,66134E-12	0
\$H\$5	V147 A7	0	0
\$H\$6	V148 A7	0	2,46534E-32
\$H\$7	V149 A7	0	0
\$H\$8	V1410 A7	1	1
\$H\$9	V157 A7	0	0
\$H\$10	V158 A7	0	7,94186E-18
\$H\$11	V159 A7	1	1
\$H\$12	V1510 A7	1,4552E-11	0
\$H\$13	V166 A7	0	0
\$H\$14	V167 A7	0	0
\$H\$15	V168 A7	1,11036E-16	1,11036E-16
\$H\$16	V169 A7	0	0
\$H\$17	V1610 A7	1	1
\$H\$28	V188 A7	0	0
\$H\$29	V189 A7	1	1
\$J\$5	V1810 A9	0	0
\$J\$6	V1811 A9	0	0
\$J\$7	V198 A9	0	0
\$J\$8	V199 A9	0	0
\$J\$9	V1910 A9	0	0
\$J\$10	V1911 A9	1	1
\$J\$11	V2010 A9	-2,22045E-16	0
\$J\$12	V2011 A9	1	1

Ek 2. Sonuç Raporu Kısıtlar

Hücre	Ad	Hücre Değeri	formül	Durum	Serbestlik
\$J\$15	V168 Assignment Constraints	1	\$J\$15=\$K\$15	Farklı	0
\$Q\$36	1VE2	-5	\$Q\$36<=\$R\$36	Farklı	5
\$Q\$37	1VE5	-8	\$Q\$37<=\$R\$37	Farklı	8
\$Q\$38	3VE4	-9	\$Q\$38<=\$R\$38	Farklı	9
\$Q\$39	4VE5	-10	\$Q\$39<=\$R\$39	Farklı	10
\$Q\$40	2VE7	-10	\$Q\$40<=\$R\$40	Farklı	10
\$Q\$41	5VE6	-12	\$Q\$41<=\$R\$41	Farklı	12
\$Q\$42	6VE8	-11	\$Q\$42<=\$R\$42	Farklı	11
\$Q\$43	7VE8	-9	\$Q\$43<=\$R\$43	Farklı	9
\$Q\$44	8VE9	-7	\$Q\$44<=\$R\$44	Farklı	7
\$Q\$45	9VE10	-6	\$Q\$45<=\$R\$45	Farklı	6
\$Q\$46	11VE12	-1	\$Q\$46<=\$R\$46	Farklı	1
\$J\$16	V169 Assignment Constraints	1	\$J\$16=\$K\$16	Farklı	0
\$J\$36	1VE2 Precedence Constraints	-1	\$J\$36<=0	Farklı	1
\$J\$37	1VE5 Precedence Constraints	-2	\$J\$37<=0	Farklı	2
\$J\$38	3VE4 Precedence Constraints	-2	\$J\$38<=0	Farklı	2
\$J\$39	4VE5 Precedence Constraints	-1	\$J\$39<=0	Farklı	1
\$J\$40	2VE7 Precedence Constraints	-1	\$J\$40<=0	Farklı	1
\$J\$41	5VE6 Precedence Constraints	-1	\$J\$41<=0	Farklı	1
\$J\$42	6VE8 Precedence Constraints	0	\$J\$42<=0	Aynı	0
\$J\$43	7VE8 Precedence Constraints	-1	\$J\$43<=0	Farklı	1
\$J\$44	8VE9 Precedence Constraints	-1	\$J\$44<=0	Farklı	1
\$J\$45	9VE10 Precedence Constraints	-1	\$J\$45<=0	Farklı	1
\$J\$46	11VE12 Precedence Constraints	-1	\$J\$46<=0	Farklı	1
\$J\$47	12VE13 Precedence Constraints	-1	\$J\$47<=0	Farklı	1
\$J\$48	13VE15 Precedence Constraints	-6	\$J\$48<=0	Farklı	6
\$J\$49	10VE14 Precedence Constraints	-2	\$J\$49<=0	Farklı	2
\$J\$50	10VE15 Precedence Constraints	-1	\$J\$50<=0	Farklı	1
\$J\$51	14VE16 Precedence Constraints	0	\$J\$51<=0	Aynı	0
\$J\$52	15VE18 Precedence Constraints	0	\$J\$52<=0	Aynı	0
\$J\$53	16VE19 Precedence Constraints	-1	\$J\$53<=0	Farklı	1
\$J\$54	17VE19 Precedence Constraints	-10	\$J\$54<=0	Farklı	10
\$J\$55	19VE20 Precedence Constraints	0	\$J\$55<=0	Aynı	0
\$J\$56	18VE20 Precedence Constraints	-2	\$J\$56<=0	Farklı	2
\$J\$18	V171 Assignment Constraints	1	\$J\$18=\$K\$18	Farklı	0
\$J\$19	V172 Assignment Constraints	1	\$J\$19=\$K\$19	Aynı	0
\$J\$20	V173 Assignment Constraints	1	\$J\$20=\$K\$20	Farklı	0
\$J\$21	V174 Assignment Constraints	1	\$J\$21=\$K\$21	Farklı	0
\$J\$22	V175 Assignment Constraints	1	\$J\$22=\$K\$22	Farklı	0
\$J\$23	V176 Assignment Constraints	1	\$J\$23=\$K\$23	Farklı	0
\$J\$24	V177 Assignment Constraints	1	\$J\$24=\$K\$24	Farklı	0

\$J\$25	V178 Assignment Constraints	1	\$J\$25=\$K\$25	Farklı	0
\$J\$26	V179 Assignment Constraints	1	\$J\$26=\$K\$26	Aynı	0
\$J\$27	V1710 Assignment Constraints	1	\$J\$27=\$K\$27	Farklı	0
\$J\$28	V188 Assignment Constraints	1	\$J\$28=\$K\$28	Farklı	0
\$J\$29	V189 Assignment Constraints	1	\$J\$29=\$K\$29	Farklı	0
\$J\$30	Assignment Constraints	1	\$J\$30=\$K\$30	Farklı	0
\$J\$32	Assignment Constraints	1	\$J\$32=\$K\$32	Farklı	0
\$J\$31	Assignment Constraints	1	\$J\$31=\$K\$31	Farklı	0
\$J\$33	Assignment Constraints	1	\$J\$33=\$K\$33	Farklı	0
\$J\$34	Assignment Constraints	1	\$J\$34=\$K\$34	Farklı	0
\$N\$46	11VE12 E20	8	\$N\$46<=\$O\$46	Farklı	1
\$N\$36	1VE2 E20	9	\$N\$36<=\$O\$36	Aynı	0
\$N\$37	1VE5 E20	9	\$N\$37<=\$O\$37	Aynı	0
\$N\$38	3VE4 E20	9	\$N\$38<=\$O\$38	Aynı	0
\$N\$39	4VE5 E20	8	\$N\$39<=\$O\$39	Farklı	1
\$N\$40	2VE7 E20	8	\$N\$40<=\$O\$40	Farklı	1
\$N\$41	5VE6 E20	7	\$N\$41<=\$O\$41	Farklı	2
\$N\$42	6VE8 E20	9	\$N\$42<=\$O\$42	Aynı	0
\$N\$43	7VE8 E20	4	\$N\$43<=\$O\$43	Farklı	5
\$N\$44	8VE9 E20	9	\$N\$44<=\$O\$44	Aynı	0
\$N\$45	9VE10 E20	7	\$N\$45<=\$O\$45	Farklı	2
\$J\$17	V1610 Assignment Constraints	1	\$J\$17=\$K\$17	Aynı	0
\$E\$3	A4	1	\$E\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$F\$3	A5	1	\$F\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$G\$3	A6	1	\$G\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$3	A7	1	\$H\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$I\$3	A8	1	\$I\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$3	A9	1	\$J\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$K\$3	A10	1	\$K\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$L\$3	A11	1	\$L\$3=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$9	V22 A1	-1,7386E-33	\$B\$9=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$10	V23 A1	0	\$B\$10=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$11	V24 A1	1	\$B\$11=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$12	V25 A1	0	\$B\$12=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$13	V26 A1	0	\$B\$13=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$19	V41 A1	0	\$B\$19=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$20	V42 A1	0	\$B\$20=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$21	V43 A1	0	\$B\$21=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$22	V44 A1	1	\$B\$22=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$23	V45 A1	0	\$B\$23=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$24	V46 A1	0	\$B\$24=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$25	V52 A1	1,31485E-27	\$B\$25=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$26	V53 A1	0	\$B\$26=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$27	V54 A1	0	\$B\$27=ikili düzen	Aynı	0
\$B\$28	V55 A1	1	\$B\$28=ikili düzen	Aynı	0

\$B\$29	V56 A1	0	\$B\$29=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$5	V63 A3	-3,13199E-17	\$D\$5=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$6	V64 A3	0	\$D\$6=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$7	V65 A3	0	\$D\$7=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$8	V66 A3	1	\$D\$8=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$9	V67 A3	0	\$D\$9=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$10	V72 A3	0	\$D\$10=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$11	V73 A3	0	\$D\$11=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$12	V74 A3	0	\$D\$12=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$13	V75 A3	1	\$D\$13=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$14	V76 A3	4,44116E-17	\$D\$14=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$15	V77 A3	0	\$D\$15=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$16	V84 A3	0	\$D\$16=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$17	V85 A3	0	\$D\$17=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$18	V86 A3	1	\$D\$18=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$19	V87 A3	0	\$D\$19=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$20	V95 A3	0	\$D\$20=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$21	V96 A3	0	\$D\$21=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$22	V97 A3	1	\$D\$22=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$23	V106 A3	0	\$D\$23=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$24	V107 A3	0	\$D\$24=ikili düzen	Aynı	0
\$D\$25	V108 A3	1	\$D\$25=ikili düzen	Aynı	0
\$F\$29	V146 A5	0	\$F\$29=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$5	V147 A7	0	\$H\$5=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$6	V148 A7	2,46534E-32	\$H\$6=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$7	V149 A7	0	\$H\$7=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$8	V1410 A7	1	\$H\$8=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$9	V157 A7	0	\$H\$9=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$10	V158 A7	7,94186E-18	\$H\$10=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$11	V159 A7	1	\$H\$11=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$12	V1510 A7	0	\$H\$12=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$13	V166 A7	0	\$H\$13=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$14	V167 A7	0	\$H\$14=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$15	V168 A7	1,11036E-16	\$H\$15=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$16	V169 A7	0	\$H\$16=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$17	V1610 A7	1	\$H\$17=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$28	V188 A7	0	\$H\$28=ikili düzen	Aynı	0
\$H\$29	V189 A7	1	\$H\$29=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$5	V1810 A9	0	\$J\$5=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$6	V1811 A9	0	\$J\$6=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$7	V198 A9	0	\$J\$7=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$8	V199 A9	0	\$J\$8=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$9	V1910 A9	0	\$J\$9=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$10	V1911 A9	1	\$J\$10=ikili düzen	Aynı	0
\$J\$11	V2010 A9	0	\$J\$11=ikili düzen	Aynı	0

